

Теоретические основы разработки и модели- рования несложных от- дельных модулей и ме- хатронных систем

С К И Ф



Авиационный колледж ДГТУ

Лекционный курс

Автор

Смирнов Ю. А.

Ростов-на-Дону,
2019

Аннотация

Лекционный курс предназначен для студентов очной формы обучения направления 15.02.07 «Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям)»



Автор

Смирнов Юрий Александрович –

к.т.н., доцент, преподаватель 1 категории АК ДГТУ

Сфера научных интересов – Вычислительная техника
и автоматика

ОГЛАВЛЕНИЕ

Тема 1.1.1. Концепция построения мехатронных модулей	6
Тема 1.1.2. Конструкции мехатронных модулей.....	36
Тема 1.1.3. Двигатели мехатронных модулей.....	72
Тема 1.1.8. Гидропривод мехатронных модулей	108
Тема 1.1.9. Тормозные устройства и направляющие мехатронных модулей	156
Тема 1.1.10. Информационные устройства мехатронных модулей	191
Тема 1.2.1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДУЛИ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ. ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ	229
Тема 1.2.2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ	245
Тема 1.2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КИНЕМАТИКИ И ПРЕОБРАЗУЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ ЭММ.....	260
Тема 1.2.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭММ.....	278
Тема 1.2.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭММ.....	290
Тема 1.2.9. ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	303
Тема 1.3.1. Современные мехатронные модули	325
Тема 1.3.2. Современные мехатронные системы	346
Тема 1.3.3. Современные мехатронные системы (Мехатронные системы в автоматизированном машиностроении)	359
Тема 1.3.4. Современные мехатронные системы (Производственные машины с параллельной и гибкой кинематикой).....	369
Тема 1.3.5. Методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем (Подход к проектированию интегрированных мехатронных модулей и систем)	374
Тема 1.3.6. Методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем (Метод исключения промежуточных преобразователей и интерфейсов)	386
Тема 1.3.7. Методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем (Метод объединения элементов мехатронного модуля в едином корпусе)	395
Тема 1.3.8. Методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем (Анализ мехатронных систем на основе показателя функционально-структурной интеграции)	400

Тема 1.3.9. Методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем (Метод переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства)	411
Тема 1.3.10. Математическое моделирование и оптимизация движений мехатронных систем (Тензорно-геометрический метод построения математических моделей многосвязных машин)	424
Тема 1.3.11. Математическое моделирование и оптимизация движений мехатронных систем (Параметрические модели динамики многосвязных механизмов).....	440
Тема 1.3.12. Математическое моделирование и оптимизация движений мехатронных систем (Синтез оптимальных движений многосвязных систем).....	454
Тема 1.3.12. Математическое моделирование и оптимизация движений мехатронных систем (Синтез оптимальных движений многосвязных систем).....	459
Тема 1.3.13-14. Математическое моделирование и оптимизация движений мехатронных систем (Построение динамических моделей многосвязных роботов на основе метода нормализованных переменных).....	466
Тема 1.3.15. Управление движением мехатронных систем на основе интернет-технологии	481
Тема 2.1.1. Моделирование и мехатроника	497
Тема 2.1.2. Пакет Simulink – визуальная среда проектирования мехатронных систем	510
Тема 2.1.4. Динамика объектов управления мехатронных систем	520
Тема 2.1.6. Оценка качества и требования к динамическим характеристикам мехатронных систем.....	524
Тема 2.1.7-8. Регуляторы в мехатронных системах.....	531
Тема 2.1.9. Преобразование непрерывных регуляторов к цифровым аналогам	553
Тема 2.2.1. Элементы устройств силовой электроники в пакете Sim Power System.....	566
Тема 2.1.2. Пакет Simulink – визуальная среда проектирования мехатронных систем	576
Тема 2.1.2. Пакет Simulink – визуальная среда проектирования мехатронных систем	586
Тема 2.5.1. Модельное проектирование синхронных мехатронных систем	596
Тема 3.1.1. Структура и принципы интеграции мехатронных систем	603
Тема 3.1.2. Применение мехатронных машин	619
Тема 3.1.3. Проблемы и современные методы управления мехатронными модулями и системами.....	627
Тема 3.1.4. Структура, классификация и основы кинематики манипуляционных систем промышленных роботов	651
положение i -го звена относительно предыдущего $(i-1)$ -го устанавливается с помощью обобщенной координаты q_i (рис. 6.6):.....	663

Тема 3.1.5. Прямая задача кинематики манипуляторов роботов. Абсолютные скорости и ускорения в манипуляционных системах промышленных роботов	676
Тема 3.1.6. Обратная задача кинематики манипуляционных роботов	693
Тема 3.2.1. Построение расчетных математических моделей роботов вертикального перемещения	709
Тема 3.2.2. Определение схем роботов вертикального перемещения для выполнения различных технологических задач	724
Тема 3.2.3. Испытания и анализ функционирования роботов вертикального перемещения в различных технологических комплексах	754
Тема 3.2.4. Испытания и анализ функционирования роботов вертикального перемещения в различных технологических комплексах	776
Тема 3.2.5. Испытания и анализ функционирования роботов вертикального перемещения в различных технологических комплексах	799
Тема 3.3.1. Значение мобильных роботов повышенной проходимости ...	812
Тема 3.3.2. Системы мобильных роботов повышенной проходимости	831
Тема 3.3.3. Принципы управления мобильными роботами повышенной проходимости	905
Тема 3.3.4. Методы и алгоритмы управления мобильными роботами повышенной проходимости	984
по теме 4.1.1. Системы автоматизированного управления	1034
по теме 4.1.2. Виды обеспечения САПР	1078
по теме 4.1.3. Системы автоматизированного управления	1101
по теме №4.2.1. Приборы контроля и управления технологическими процессами	1111
по теме №4.2.2. Программируемые логические контроллеры	1176
по теме №4.2.3. Оборудование и компоненты, распределенных систем управления	1313
по теме 4.4.1. Технические средства автоматизации конструирования, моделирования и проектирования	1401
по теме 4.4.2. Программные средства автоматизации конструирования, моделирования и проектирования	1407
по теме 4.5.1-2. Характеристика технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ)	1423
по теме 4.5.3. Анализ схем и методы расчета показателей надежности и безопасности АСУТП	1430
По теме «ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ»	1440

Лекция

Тема 1.1.1. Концепция построения мехатронных модулей

ВОПРОСЫ

1. Общие положения проектирования мехатронных модулей
2. Функции, структура и синергетическая интеграция в мехатронных модулях (ММ).
3. Основы методики конструирования мехатронных модулей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: Учебник. – 2е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во «СТАНКИН», 2005. – 368 с.: ил. (ЛЗ с. 6-65).
2. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей: учеб.пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 336 с. (Л4 с.299-330).

1. Общие положения

В основу методики проектирования ММ положен **принцип синергетической интеграции**. **Задача конструктора** при синергетической интеграции состоит в том, чтобы не просто связать отдельные части в систему с помощью типовых соединений и преобразователей, но сделать конструктивные связи в мехатронном модуле взаимопроникающими и неразрывными [1]. Большинство успешных решений в мехатронике базируется скорее на инженерном опыте и интуиции, чем на научной методологии. Добиться качественно новых характеристик позволяет современная концепция *«встроенного проектирования»*, которая предполагает **конструктивную интеграцию элементов модуля в едином корпусе**.

Принятый подход к проектированию ММ предполагает совместный анализ функциональной, структурной и конструктивной моделей устройства. **Целью** проектирования ММ является преобразование исходных требований в конструкторскую реализацию и соответствующую документацию, по которой может быть изготовлен модуль, удовлетворяющий сформулированным показателям качества.

Ниже рассматриваются в основном технические показатели, но при выборе структуры и конструкции ММ следует также учитывать экономические и эксплуатационные оценки качества.

Алгоритм проектирования ММ представлен на рис. 8.1.

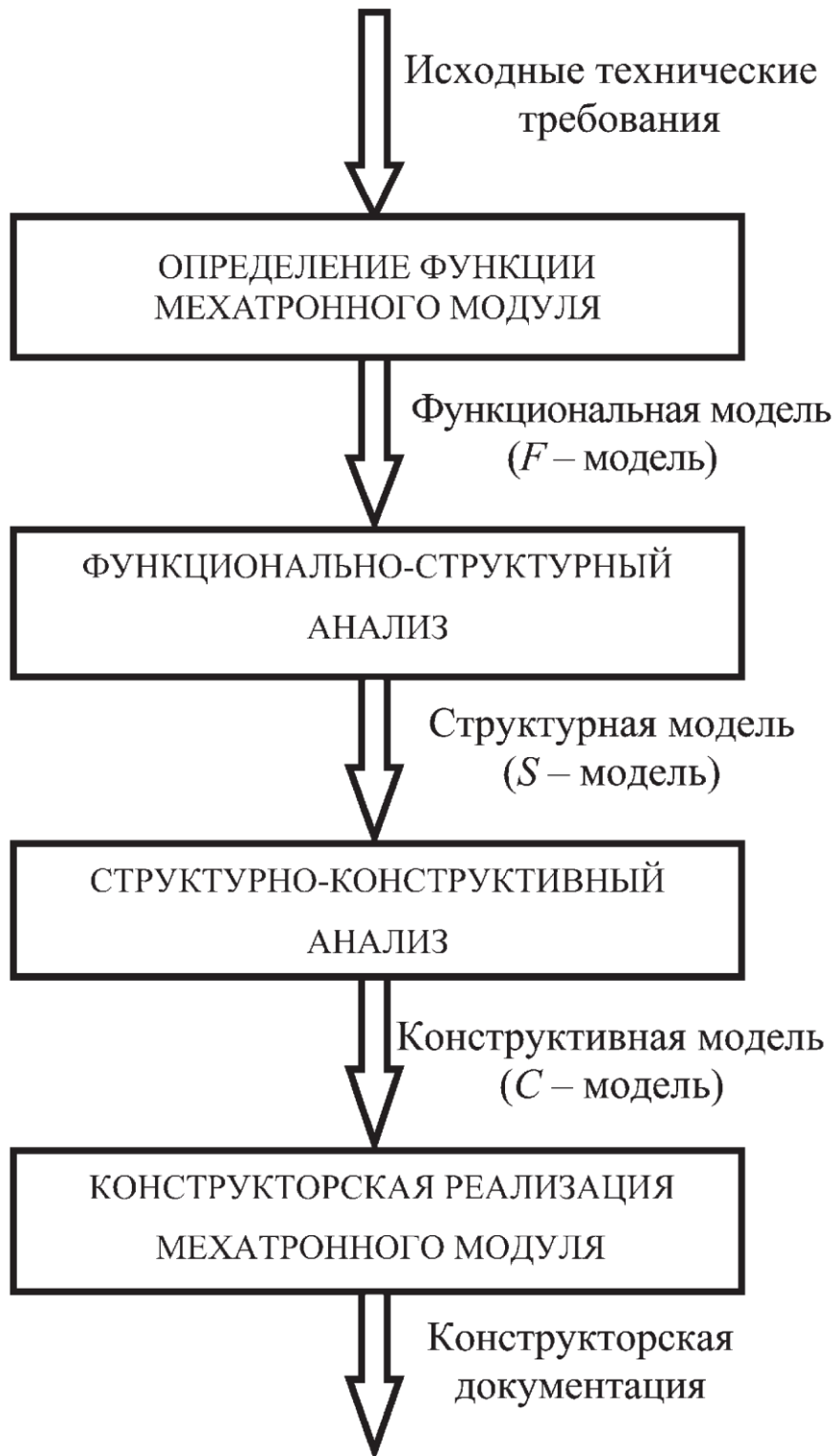


Рис. 1. Алгоритм проектирования мехатронного модуля

Данный алгоритм предусматривает три **основных этапа** проектирования — последовательно выполняемые **функциональный, структурный и конструктивный анализ** и **синтез** ММ. Применяя процедуры функционально-структурного и структурно-конструктивного анализа, разработчик оценивает принимаемые решения, стремясь добиться высокого уровня синергетической интеграции элементов. Для использования методов автоматизированного проектирования формируют взаимосвязанные функциональную (**F-модель**), структурную (**S-модель**) и конструктивную (**C-модель**) модели ММ.

Конструирование ММ включает три основных этапа:

- выбор вариантов структурных решений модуля по его заданной функции и их функционально-структурный анализ (входной информацией для этого этапа проектирования является F-модель, а на выходе формируется S-модель ММ);
- структурно-конструктивный анализ конструкторских решений и построение C-модели ММ;
- конструкторская реализация выбранного варианта модуля с разработкой конструкторской документации.

Таким образом, задача проектирования ММ заключается в нахождении наилучшего соответствия между заданной функцией и конструктивным исполнением.

Ключевой методологической идеей данного подхода является приоритет функции модуля над его структурной организацией и конструктивным решением. В ММ заданные функциональные преобразования могут быть реализованы несколькими наборами структурных блоков, а эти блоки, в свою очередь, могут иметь различное конструкторское исполнение. Таким образом, при проектировании модуля его структура и конструктивное решение являются подчиненными по отношению к заданной функции.

2. Функция и структура мехатронного модуля

Известны **два основных подхода** к построению моделей сложных технических систем. Первый заключается в **функциональном** определении рассматриваемой системы через ее поведение по отношению к внешним объектам и внешней среде. Второй подход основан на **структурном** описании состава системы и связей между ее элементами. Исследование и оптимизация взаимосвязи между функцией и структурой системы лежит в основе функционально-структурного подхода, который соответствует первым двум этапам проектирования ММ (рис. 1).

На первом этапе проводят функциональный анализ ММ, результатом которого является построение функциональной модели.

Основная **функциональная задача** ММ заключается в преобразовании информации о программе движения в целенаправленное управляемое движение выходного звена.

Программа движения может быть задана управляющим компьютером как набор команд высокого уровня или, в случае дистанционного управления, человеком-оператором с помощью человеко-машинного интерфейса. Управляемое движение осуществляется механической подсистемой ММ, и его конечное звено взаимодействует с объектами внешней среды. Внешние воздействия должны эффективно отражаться ММ в процессе движения. Информационная обратная связь необходима для оценки текущего состояния ММ как объекта управления и внешней среды в режиме реального времени.

Обозначенная основная функция не является единственной. Некоторые дополнительные функции — реконфигурация системы, обмен сигналами и информацией с другим технологическим оборудованием, самодиагностика — также должны быть реализованы для эффективной и надежной работы ММ. Но именно *выполнение функционального движения является основной мехатронной функцией, так как механическая составляющая взаимодействует с объектами работ и таким образом определяет поведение модуля во внешней среде.*

В общем случае функциональная модель мехатронного модуля может быть определена как **информационно-механический преобразователь**.

Для физической реализации мехатронного информационно-механического преобразования необходим внешний энергетический источник. Пусть ММ имеет электрический привод. Тогда, очевидно, требуется источник электроэнергии. Ввод соответствующих электроэнергетических преобразований дает F-модель ММ (рис. 2).



Рис. 2. Функциональная модель мехатронного модуля

Полученная F-модель в общем случае содержит **семь базовых функциональных преобразователей**, связанных энергетическими и информационными потоками.

Следует отметить, что электрическая энергия является только промежуточной энергетической формой между входной информацией и выходным механическим движением. Следовательно, электрическая подсистема отнюдь не является единственно возможной для выполнения мехатронной функции. Безусловно, и другие виды энергетических процессов (в частности, гидроэнергетические) могут быть использованы для промежуточных преобразований и должны рассматриваться как **альтернативные варианты** на этапе концептуального проектирования. Выбор разработчиком ММ физической природы промежуточного преобразователя определяется возможностями технической реализации, исходными требованиями и особенностями его применения. В современной инженерной практике гидравлические, пневматические, химические и другие виды энергетических преобразователей применяются достаточно широко.

Итак, в любом ММ необходимо реализовать семь функциональных преобразований (рис. 2). Три из них называются **моноэнергетическими** (информационный, электрический и механический преобразователи), где входные и выходные переменные имеют одну и ту же физическую природу. Остальные четыре являются **дualными** (двойственными), так как в них входные и выходные переменные принадлежат различным физическим видам. К этой группе относят информационно-электрический и электро-механический преобразователи, расположенные в **прямой**

цепи функциональной модели, и параллельные электро-информационный и механико-информационный преобразователи в **цепи обратной связи**.

Структурная модель ММ должна отражать состав его элементов и связи между ними. В теории автоматического управления и электромеханике принято структурные модели графически представлять в виде блок-схем. Звенья обычно обозначают в виде прямоугольника с указанием входной и выходной переменных, а уравнения или характеристики записывают внутри него.

В качестве исходной структуры ММ рассмотрим традиционный электропривод с компьютерным управлением (S-модель, см. рис. 3). Для дальнейшего анализа в представленной структурной схеме выделим управляющую и электро-механическую подсистемы. При конструировании ММ особый интерес представляет исполнительная часть, входящая в состав электромеханической подсистемы.

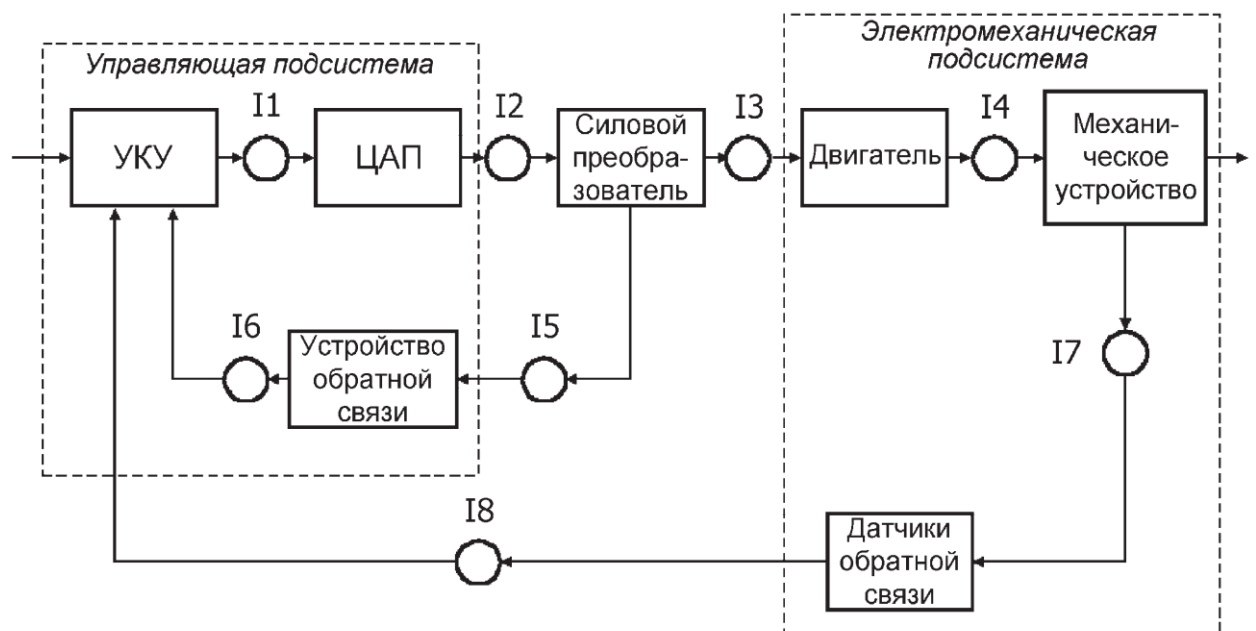


Рис. 3. Структурная модель электропривода с компьютерным управлением

S-модель электропривода (рис. 3) включает в себя следующие основные элементы:

- механическое устройство, которое реализует заданное управляемое движение и взаимодействует с внешними объектами (в модулях в качестве таких устройств применяют редукторы, вариаторы, либо непосредственно используют рабочий орган, например, в ММ типа «мотор-шпиндель»;
- управляемый электродвигатель (переменного или постоянного тока), который является электромеханическим элементом привода;
- силовой преобразователь, обычно состоящий из усилителя мощности, широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и трехфазного инвертора (для асинхронных двигателей);
- цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), реализующий функцию информационно-электрического преобразования;
- устройство обратной связи, которое используют для контроля текущих напряжений и токов в силовом преобразователе, а также управляющих функций (например, для организации контура регулирования момента, развиваемого приводом);
- датчики обратной связи по положению и скорости движения выходного звена механического устройства, выполняющие функции механико-информационного преобразования;
- компьютерное устройство управления движением, функциональной задачей которого является информационное преобразование (обработка цифровых сигналов, цифровое регулирование, расчет управляющих воздействий, обмен данными с периферийными устройствами);
- интерфейсные устройства, обозначенные на блок-схеме как I1-I8.

В зависимости от физической природы входных и выходных переменных интерфейсные блоки могут быть как механическими преобразователями движения, так и содержать электронные аппаратнопрограммные компоненты. Примерами механических интерфейсов являются передачи и трансмиссии, связывающие выходное механическое устройство с двигателем (интерфейс I4) и датчиками обратной связи (интерфейсы I7, I8).

Интерфейсные электронные устройства расположены на входах и выходах устройства компьютерного управления (УКУ) и предназначены для его сопряжения со следующими структурными элементами:

- цифро-аналоговым преобразователем (встроенный интерфейс I1) и далее с силовым преобразователем модуля (интерфейс I2);

- датчиками обратной связи (интерфейс I7); в случае применения сенсоров с аналоговым выходным сигналом соответствующие интерфейсы строятся на основе аналого-цифровых преобразователей (АЦП);
- устройствами обратной связи для контроля уровня электрических токов и напряжений в силовом преобразователе (для традиционного привода интерфейс I6 также использует стандартный АЦП).

Синергетическая интеграция в мехатронных модулях

Сравнивая функциональную модель ММ (рис. 2) и структурную модель традиционного электропривода (рис. 3), можно сделать вывод о том, что суммарное количество основных и интерфейсных блоков в структуре электропривода значительно превышает число необходимых функциональных преобразователей. Другими словами, можно говорить о **структурной избыточности** традиционного электропривода. Наличие избыточных блоков приводит к снижению надежности и точности технической системы, ухудшению ее массогабаритных и стоимостных показателей. Поэтому целесообразно стремиться к сокращению количества отдельных структурных элементов (как основных, так и интерфейсных блоков) в системе. В идеальном для пользователя варианте модуль по рис. 2, приняв на информационный вход программу движения, должен выполнить целенаправленное управляемое движение с заданными показателями качества. При этом все проблемы интеграции в модуле механических, электронных и управляющих устройств должны быть решены разработчиком для всех стадий жизненного цикла, начиная со стадии проектирования системы и заканчивая ее эксплуатацией у конечного потребителя.

Синергетическая интеграция элементов при проектировании ММ основана на **трех базовых принципах**:

- 1) реализация заданных функциональных преобразований минимально возможным числом структурных и конструктивных блоков путем объединения двух и более элементов в единые многофункциональные модули;
- 2) выбор интерфейсов в качестве локальных точек интеграции и исключение избыточных структурных блоков и интерфейсов как отдельных элементов;
- 3) перераспределение функциональной нагрузки в ММ от аппаратных блоков к интеллектуальным (электронным и компьютерным) компонентам.

Практическая реализация принципов синергетической интеграции при проектировании позволяет обеспечить основные преимущества ММ по сравнению с традиционными машинами и добиться качественно новых показателей, в первую оче-

редь по компактности конструкции, скорости и точности движений. Снятие с аппаратной («железной») части системы функциональной нагрузки и ее перенос на управляющую и электронную подсистемы придает ММ свойство гибкости, делает его способным к легкому приспособлению для решения новых технологических задач. Следует заметить, что интеграция предполагает не только аппаратное объединение элементов, но и организацию интегрированных информационных процессов в ИММ.

Синергетическую интеграцию в мехатронике осуществляют при проектировании двумя основными способами — функционально-структурной интеграцией и структурно-конструктивной интеграцией, которые объединяют в общий алгоритм проектирования ММ.

Задачей этапа **функционально-структурной интеграции** (ФС- интеграции) является поиск мехатронных структур, реализующих заданные функциональные преобразования с помощью минимального количества структурных блоков. ФС-интеграция направлена на выбор проектных решений, которые обеспечивают исключение некоторых основных блоков, а значит, и смежных с ними интерфейсов из структуры системы.

Примеры мехатронных проектных решений, основанные на способе ФС-интеграции элементов, приведены в табл. 1. Представленные решения основаны на совместном анализе F-модели ММ (рис. 2) и S-модели традиционного электропривода (рис. 3).

Таблица 1

ФС-интеграция элементов в мехатронном модуле

Мехатронное решение	Функциональное преобразование	Исключаемые сепаратные элементы	
		Основные блоки	Интерфейсы
Фотоимпульсный датчик обратной связи	Механико-информационное	Один датчик обратной связи	I7, I8
Вентильный высокомоментный двигатель	Электромеханическое и механико-информационное	Механическое устройство, сепаратные датчики обратной связи	I4, I7, I8
Интеллектуальный силовой преобразователь	Информационно-электрическое	Избыточное устройство обратной связи	I5, I6
Управляющие контроллеры на базе блоков FPGA	Электро-информационное	Цифро-аналоговый преобразователь	I1, I2

Первые два мехатронных решения относятся к электромеханической подсистеме модуля, следующие варианты интеграции можно реализовать в его управляющей подсистеме. При конструировании ММ наибольшее внимание уделяют решениям, направленным на упрощение механической части модулей и связанных с ней блоков и интерфейсов, которые реализуют электромеханическое и механико-информационные функциональные преобразования.

Первый вариант (см. табл. 8.1) предусматривает использование в обратной связи вместо двух отдельных датчиков положения и скорости только одного элемента — фотоимпульсного датчика, который позволяет получать информацию и об угле поворота вала, и о его угловой скорости. Датчик выдает выходной сигнал в кодовой форме, что позволяет вводить информацию в УКУ без дополнительного аналого-цифрового преобразования, которое было необходимо для традиционных датчиков с аналоговым выходным сигналом (тахогенераторов, потенциометров и т. п.).

Интеллектуализацию фотоимпульсного датчика обеспечивают встроенными микропроцессорами, которые выполняют следующие основные функции: кодирование информации датчика, обнаружение ошибок измерения, масштабирование сигнала и передача текущего кода в контроллер движения по стандартному протоколу. Современная тенденция в создании фотоимпульсных датчиков заключается в объединении в едином сенсорном модуле конструктивных элементов (валов, подшипников), кодировочных дисков, фотоэлементов и микропроцессора.

Таким образом, использование фотоимпульсного датчика позволяет исключить из структуры традиционного привода один датчик обратной связи с его интерфейсом (I7), а также АЦП на входе УКУ (интерфейс I8).

Применение высокомоментного двигателя [1] (второе решение в табл. 8.1) позволяет заменить исполнительную пару «двигатель + преобразователь движения» на один приводной элемент — двигатель. Этот способ ФС-интеграции означает исключение механического устройства и избыточного интерфейса I4 из структуры привода.

Ниже перечислены основные преимущества ММ с высокомоментными двигателями:

- 1) снижение материалоемкости, компактность и модульность конструкции;
- 2) повышение точностных характеристик привода благодаря отсутствию зазоров, кинематических погрешностей, упругих деформации звеньев и т. д.;

- 3) исключение трения в механической трансмиссии, что позволяет избежать нелинейных динамических эффектов, особенно на ползучих скоростях.

Для определения положения полюсов на роторе в конструкцию вентильного высокомоментного двигателя встраивают датчик положения. В исполнительных приводах информацию с этого датчика могут использовать и как сигнал обратной связи. Следовательно, применение вентильных двигателей со встроенными фотоимпульсными датчиками позволяет упростить не только механическую часть модуля, но и цепь обратной связи, так как разработчику не требуется вводить в конструкцию модуля отдельные датчики положения и скорости.

Два примера применения способа ФС-интеграции к элементам управляющей подсистемы модуля приведены в табл. 8.1.

В состав ММ могут входить интеллектуальные силовые преобразователи (ИСП). Их строят на базе полупроводниковых приборов нового поколения. Типичными представителями этих приборов являются силовые полевые транзисторы (*MOSFET*), биполярные транзисторы с изолированным затвором (*IGBT*), запираемые тиристоры с полевым управлением (*MCT*). Новое поколение приборов отличается высоким быстродействием (для транзисторов *MOSFET* — 100 кГц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (для *IGBT* предельная сила коммутируемого тока — до 1200 А, предельное коммутируемое напряжение — до 3500 В). Особенность ИСП состоит в том, что они содержат встроенные блоки микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций — Использование ИСП в составе ММ позволяет существенно снизить массогабаритные показатели силовых преобразователей, повысить их надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели.

Использование контроллеров движения с блоками *FPGA* [22] позволяет исключить цифро-аналоговое преобразование сигналов при компьютерном управлении двигателем. На выходе блоков *FPGA* сразу формируется широтно-модулированный сигнал, который имеет цифровое представление. При этом они обладают уникальным сочетанием очень высокой производительности (скорость вычислений соизмерима с аппаратными компонентами) с возможностью программирования как обычных микропроцессорных устройств.

Обобщая рассмотренные примеры, интересно обратить внимание на то, что точками для ФС-интеграции являются структурные блоки, реализующие функциональные преобразования только дуального типа (см. третий столбец табл. 8.1). К

этой группе относят информационно-электрический и электромеханический преобразователи, расположенные в прямой цепи F-модели ММ (рис. 8.2), и электро- информационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Методическим ключом при поиске вариантов СК-интеграции является рассмотрение интерфейсных блоков I1-I8 в качестве локальных точек, где потенциально возможна СК-интеграция. Можно рекомендовать при проектировании опираться сразу на несколько точек интеграции.

Примеры ММ, основанные на способе СК-интеграции элементов, приведены в табл. 8.2. Представленные решения основаны на анализе структурных моделей мехатронных модулей, разработанных на предыдущем этапе, и традиционного электропривода (см. рис. 8.3).

Таблица 8.2

СК-интеграция элементов в мехатронном модуле

Мехатронные модули	Функциональные преобразования	Встраиваемые элементы	
		Основные блоки	Интерфейсы
Модуль движения	Электромеханическое и механическое	Двигатель, механическое устройство	I4
Мехатронный модуль движения	Электромеханическое, механическое и механико-информационное	Двигатель, механическое устройство, датчик обратной связи	I4, I7, I8
Интеллектуальный мехатронный модуль	Информационное, информационно-электрическое, электрическое, электромеханическое	Управляющий контроллер, силовой преобразователь, двигатель	I1, I2, I3, I5, I6

Интеграция элементов в ММ является ведущей тенденцией при создании современных машин и систем, так как позволяет добиться качественно нового уровня по основным техническим показателям — скорости и точности движения, компактности конструкции и способности машины к быстрой реконфигурации. Практическое воплощение этой тенденции в машинах сегодняшнего дня зависит от эффективности взаимодействия конструктора, который выдвигает новые интеграционные идеи, и технолога, реализующего предложенные проектные решения в автоматизированных технологических процессах.

3. Основы методики конструирования мехатронных модулей

3.1. Техническое задание

При получении технического задания (ТЗ) на конструирование нового ММ конструктор ищет в задании возможно более полную и строгую формулировку той конечной цели, которая перед ним ставится. Если создаваемый ММ является частью более общей мехатронной системы, то конечная цель, которая ставится перед конструктором, должна быть сформулирована на основе знания места и роли модуля в системе. В этом случае целевое назначение ММ определяется целевым назначением мехатронной системы.

Необходимость критического подхода к формулировке цели является одной из особенностей стоящих перед конструктором задач [1].

Прежде всего конструктор должен тщательно изучить принципиальную схему модуля в том случае, если она приведена в ТЗ. Степень приближения принципиальной схемы к реальной конструкции может быть самой различной.

Принципиальная схема анализируется, оценивается и корректируется с точки зрения возможностей ее конструктивной реализации. Следует стремиться усовершенствовать схему в направлении *«интеграции»*, т. е. объединения частей и уплотнения их функциональной нагрузки. Очень часто множество независимых от конструктора проблем как научного, так и технического характера ограничивают такие стремления. Чем совершеннее схема, тем меньше возможностей у конструктора улучшить ее в указанном направлении.

При изучении предложенной принципиальной схемы конструктор должен проанализировать ее с точки зрения надежности. Оценка надежности принципиальной схемы может производиться по ряду факторов: оценка возможностей резервирования, использование тех или иных готовых элементов и стандартизированных деталей, обеспечение безопасности обслуживающего персонала и т. д. Схема может быть проанализирована по критериям *«цены реализации отдельных ее элементов»*, технологичности, минимизации габаритов и массы и др.

Технические требования, приведенные в ТЗ, можно назвать **исходными** техническими требованиями. В наиболее общем случае перечень исходных технических требований охватывает широкий круг вопросов. В нем приводятся *«входные»* и *«выходные»* характеристики ММ и основные параметры принципиальной схемы. Затем дается описание тех наиболее характерных внешних воздействий, которые могут иметь место при эксплуатации, а также вызванные этими воздействиями допустимые отклонения от нормальных режимов работы. Наконец, перечисляются меры, обеспечивающие удобство работы оператора, обслуживающего

персонала, потребителя. Эти требования составляют лишь часть того материала, который должен учитываться конструктором при последующей реализации задания. Поэтому до начала собственно конструирования ММ конструктор должен дополнить исходные требования ТЗ новыми требованиями, выявленными им на основе самостоятельного анализа взаимодействий модуля с окружением, а также исходя из соображений производственного, технологического и экономического характера. Дополненный перечень технических требований должен давать конструктору всестороннее и достаточно четкое представление о процессе функционирования готового ММ в реальных условиях.

Изучение технологических возможностей реализации ТЗ заключается в оценке возможности выполнения задания, а также реализации тех дополнительных требований, накопление и формирование которых происходит уже на данном этапе. Конструктор решает вопрос сравнительной сложности изготовления применительно не только ко всему модулю в целом, но и к отдельным узлам и даже деталям. Рассматриваются возможности производственной базы, технологии изготовления деталей, сборки, регулировки, настройки и т. д. Конструктор должен четко представить себе прохождение ММ через заводские цеха.

3.2 Анализ взаимосвязей мехатронного модуля с внешним окружением

Под **внешним окружением** надо понимать всю ту материальную среду, которая, находясь вне ММ, оказывает на него какие-либо воздействия или испытывает воздействия с его стороны.

Входными воздействиями называют такие воздействия на модуль, которые необходимы для его функционирования, т. е. для формирования таких **выходных воздействий** (параметров), ради которых и создается ММ. Все остальные взаимосвязи мехатронного модуля с внешним окружением в большинстве случаев необязательны и нежелательны. Не всегда бывает очевидным, какие воздействия принять за входные, какие за выходные, не всегда входы и выходы могут считаться однонаправленными, не всегда их легко отделить от остальных воздействий, не вводя те или иные условности.

Широта охвата картины взаимодействий ММ с внешним окружением зависит от располагаемой информации и потраченного на работу времени. Поэтому часть существенных для конструктора взаимосвязей иногда может остаться необнаруженной или недостаточно раскрытой ввиду ограниченности возможности получения информации и времени.

Недостаточная полнота раскрытия взаимосвязей может повлиять прежде всего на надежность будущего модуля. Не упустить из виду ни одного существенного воздействия — главное в рассмотрении взаимосвязей окружения с ММ, если к последнему предъявляются высокие требования по надежности. Анализ взаимосвязей должен вестись направленно и избирательно. Конструктор должен уметь отбросить излишние подробности, ненужные связи и концентрировать свое внимание на существенных.

3.3. Разработка технических требований

В конструкторских задачах путь от анализа взаимосвязей до четко сформулированных технических требований к ММ, необходимых конструктору, может быть более сложным, чем рассмотренный выше. Этот путь может проходить через такие стадии создания ММ, как научно-исследовательская разработка, моделирование, промежуточное макетирование, а также может сопровождаться расчетными и экспериментальными работами, далеко не всегда выполняемыми при участии конструктора. В перечне технических требований даются уже не сами связи, а технические характеристики ММ и параметры, отражающие условия его эксплуатации. Технические требования можно разделить на четыре группы.

Первая группа: требования, содержащие ограничения геометрического и конструктивного характера. Пример формулировки: предельное отклонение межосевого расстояния: $\pm 0,5$ мм.

Вторая группа: требования, выраженные при помощи технических или физических понятий, записанные в виде чисел с размерностями. Пример формулировки: сила сопротивления на выходном звене — не более 100 Н.

Третья группа: требования, выраженные словесно, не включающие в себя ни понятий, определенных количественно, ни геометрических ограничений в конструкции. Пример формулировки: устройство должно быть быстросъемным.

Четвертая группа: требования, сформулированные при помощи сложных понятий или математических зависимостей. Пример формулировки: для данного конструируемого устройства распределение атмосферного давления в рабочем

диапазоне высот следует принимать согласно МСА (международной стандартной атмосферы).

Первая группа требований значительно пополняется в результате выявления ограничений, связанных с местом установки конструируемого ММ.

Вторая группа требований является в значительной степени результатом количественного отображения взаимосвязей ММ с внешним окружением и особенностей принципиальной схемы. Конструктивная реализация требований, выраженных при помощи четких технических понятий, определенных количественно (таких, например, как передаточное отношение), может быть осуществлена различным образом. Преимущества такой формы написания требований очень велики, так как она не несет в себе неопределенности и служит средством объективной проверки правильности конструкции. Все сказанное относительно второй группы требований можно отнести к четвертой группе.

Следует особо остановиться на третьей группе требований. Словесная форма написания технических требований в большинстве случаев свидетельствует о незаконченности процесса формализации реальной физической картины. Иногда она порождена отсутствием информации о количественной стороне тех или иных взаимосвязей или незнанием сущности каких-либо процессов в системе «модуль — окружение». Нередко словесная формулировка посредством весьма общих понятий объединяет множество нераскрытых связей. Пример такой формулировки: *«Мехатронный модуль должен быть удобным в эксплуатации, при монтаже и демонтаже»*

Конструктор, уточняющий и дополняющий ТЗ для себя, должен расшифровать такой пункт, рассмотрев наиболее существенные взаимосвязи между ММ и обслуживающим персоналом. Но это не значит, что следует стремиться к наиболее полной формализации всех без исключения технических требований. Степень необходимой формализации определяется, с одной стороны, трудностями ее осуществления, с другой — требованиями последующих этапов конструирования.

Процесс реализации требований в конструкции сопровождается обратными взаимодействиями на технические требования. Для осуществления рационального процесса выполнения требований конструктор должен иметь возможность в допустимых пределах варьировать заданными параметрами. Важно поэтому в требованиях отражать не только номинальные, но и предельные значения закладываемых величин.

Требования к ММ не могут быть сформулированы, если общее направление конструирования не выбрано. Вопрос «*Что делать?*» неотделим при конструировании от вопроса «*Как делать?*» Законченный перечень технических требований всегда отражает степень ясности представлений конструктора о выбранном направлении работы.

3.4. Предварительное конструирование основных частей мехатронного модуля

Стремление конструктора к улучшению компоновки ММ посредством объединения отдельных частей, несущих разные функции, сдерживается рядом факторов и является почти всегда нелегкой задачей. В результате анализа принципиальной схемы и изучения технических требований выделяют несколько крупных частей, выполняющих различные функции, и приступают к собственно конструированию каждой части будущего изделия. Каждая составная часть должна удовлетворять определенной группе требований перечня. При этом конструктору наряду с имеющимися техническими требованиями необходимо учесть и дополнительные, не входящие в первоначальный перечень, но отражающие связи рассматриваемой части с другими частями ММ.

Найденные подварианты каждой из частей, на самых первых порах поиска не сопоставляют друг с другом и не слишком тщательно проверяют на соответствие техническим требованиям. Конструктор сознательно оттягивает стадию сравнения подвариантов и отбора наилучших, так как отдать предпочтение какому-либо из подвариантов означает: в какой-то степени уже лишить себя свободы дальнейшего поиска, а вместе с тем и возможности отыскать иные, лучшие решения.

В процессе поиска первоначальных подвариантов создание самостоятельных комбинаций из общеизвестных и присущих только данной конструкции деталей сочетается с заимствованием не только готовых узлов, но и с нахождением области их поиска.

Область ближайшего поиска вариантов — это те или иные источники информации, хранящие и систематизирующие накопленный опыт конструирования сходных устройств. Здесь и чертежно-техническая документация, и проектные материалы, и результаты испытаний, и научнотехнические отчеты, и специализированная техническая литература.

Область дальнего поиска вариантов безгранична и неопределенна. Оригинальные конструктивные решения могут быть найдены и вокруг нас, в мире привычных вещей, и в заводских цехах, и в мире живой природы.

Процесс предварительного конструирования характеризуется, как правило, своей незавершенностью, причем степень этой незавершенности может быть самой различной для отдельных частей разных ММ.

Рассматриваемый этап предварительного конструирования знаменует начало непрерывной, непрекращающейся до окончания конструирования работы по обеспечению надежности ММ. Выбрав надежность в качестве важнейшего критерия рациональности создаваемой конструкции, нужно оценить по этому критерию каждый из этапов. Переход от принципиальной схемы к первым конструктивным эскизам основных частей означает переход от идеализированных элементов к реальным деталям. Наибольшие трудности такого перехода связаны с недостаточно глубоким анализом изменений в кинематике и динамике, возникающих при конструктивной реализации схемы, построенной из идеализированных элементов. Нераспознанные, неправильно рассчитанные или не принятые во внимание силы инерции, трения, упругости в отдельных звеньях кинематической цепи, а также кинематическая неопределенность составляют характерный класс причин, обуславливающих недостаточную надежность будущего ММ.

При изучении семейств подвариантов раскрываются их качества, так или иначе оцениваемые с точки зрения надежности и, наоборот, подход к анализу семейств с позиций надежности помогает находить новые и лучшие подварианты конструкции частей модуля.

3.5. Разработка вариантов

эскизной компоновки мехатронного модуля

Поиск вариантов компоновки как основных частей, так и ММ в целом сопровождается **эскизированием**. Эскиз состоит из небольшого числа линий, изображающих лишенную подробностей конструктивную схему и лишь иногда — те ее части, которые поясняют и развивают основную конструктивную идею. Несовершенство эскизирования искупается быстротой вычерчивания. Отобранные варианты нуждаются в проверке посредством масштабного вычерчивания, которое также не должно быть подробным.

При компоновке необходимо видеть на создаваемом чертеже не только то, что там изображено, но также и то, что будет нанесено на этот чертеж впоследствии.

Полнота информации о **месте установки ММ** является чрезвычайно важным условием успешного решения задачи компоновки. Если конструктору не ставят ни-

каких ограничений, касающихся места установки модуля, то он (конструктор) чувствует себя свободнее и может искать оптимальные решения. Дело обстоит значительно сложнее, если данные о месте установки безусловно важны, но конструктор не располагает ими. Подобная ситуация может возникнуть при создании ММ для еще не спроектированной мехатронной системы.

Недостаточность информации о месте установки ММ требует способности представлять его обобщенно, а конструкции придавать качества, обеспечивающие возможность установки модуля на любом объекте. Иногда удается придать подобную приспособляемость ММ к разным мехатронным системам за счет небольшого количества переходных деталей, выполняемых каждый раз по-новому.

Основа **предварительной эскизной компоновки ММ** может быть самой различной: удачно найденный физический принцип, рациональное технологическое решение или даже способ удешевления устройства. Процесс подгонки частей друг к другу начинается с поисков удачного сочетания каких-либо двух частей (в большинстве случаев это двигатель и преобразователь движения). Некоторые варианты отбрасываются сразу. Сочетание выбранных вариантов двух частей, взятое за основу, выдерживает первое испытание, если удастся на этой основе удачно подогнать друг к другу все остальные части модуля (тормозные устройства, датчики положения и т. д.). Перебирать сочетания подвариантов без какого-либо плана и метода нерационально. На первых порах перебор обычно носит беспорядочный характер и лишь постепенно приобретает направленность. Нередко по мере прорисовки ММ становится все труднее и труднее реализовать в конструкции последующие требования. В этих случаях следует своевременно остановиться, чтобы предпринять поиски другой основы его компоновки.

По мере просмотра вариантов, по мере того как безмасштабные прикидки уточняются масштабными прорисовками, конструктору обычно удается отыскать закономерности, которые в состоянии играть роль первоначальных критериев оценки вариантов компоновки. К таким критериям могут быть отнесены такие факторы, как *«простота сочленений основных частей»*, *«совмещение функций»* и т. п. То, что не удавалось конструктору при первом знакомстве со схемой, может увенчаться успехом на настоящем этапе в процессе перебора вариантов эскизированием и масштабными прикидками.

Смысл понятия *«цена конструктивной реализации параметров»* заключается в том, что различные варианты выполнения технического требования осу-

ществляются посредством неодинаковых «затрат» массы и располагаемого пространства, различной степенью усложнения отдельных деталей и всего ММ в целом, ценой появления больших или меньших технологических трудностей. Поэтому понятие «цены конструктивной реализации параметров» принимает вполне определенный смысл и может приобрести чрезвычайную практическую важность. Так, например, иногда удается выразить отдельные параметры технических требований в единицах массы создаваемого модуля, и конструктор получает выгодную для него возможность количественной оценки наиболее существенных параметров.

В плотно компонуемых ММ почти любые локальные изменения массогабаритных параметров отдельных деталей распространяются на все устройство в целом. В этих условиях от степени полноты реализации одного какого-либо требования могут зависеть, и существенно, габариты и масса всего ММ.

Знание цены конструктивной реализации основных технических параметров позволяет конструктору в ходе компоновки осуществлять рациональное их перераспределение. Данный критерий является одним из основных движущих факторов обратного воздействия на технические требования со стороны формирующейся конструкции.

3.6. Чертеж эскизной компоновки

Эскизная компоновка выражает лишь основную конструктивную идею ММ, **чертеж эскизной компоновки** раскрывает эту идею более полно. В эскизной компоновке реализована лишь предварительно отобранная часть технических требований без подробного рассмотрения возможностей будущей реализации остальных требований. Чертеж эскизной компоновки учитывает гораздо большее количество требований, и именно поэтому основная идея в нем если и неизменна по сравнению с идеей эскизной компоновки, то во всяком случае, увязана со всеми этими требованиями. Эскизная компоновка может сочетать в себе первую масштабную компоновку с безмасштабными набросками. Чертеж эскизной компоновки, как правило, **выполнен целиком в масштабе**. Но, несмотря на большую полноту и масштабность, это еще далеко не чертеж окончательной компоновки.

Важное обстоятельство, отличающее разработку чертежа эскизной компоновки от создания первоначального эскиза, — необходимость определенной последовательности в прочерчивании отдельных узлов. В первую очередь наносят на чертеж контуры узлов с наибольшими габаритами (двигатель, преобразователи

движения), расположенные в наиболее стесненных зонах и не дающие конструктору возможностей для варьирования их конфигурацией, ориентацией и местоположением. Удачное размещение этих узлов на чертеже дает конструктору уверенность в том, что остальные узлы (датчики положения, тормоза и т. п.), которые будут нанесены в дальнейшем на чертеже окончательной компоновки, существенно не ухудшат созданную компоновку. Каждый наносимый на чертеже узел накладывает на последующие узлы конкретные ограничения, поэтому от очередности вычерчивания зависит не только рациональность процесса создания компоновки, но и форма, в которую она выливается.

На данном этапе конструктор должен убедиться в том, что выбранный им вариант чертежа эскизной компоновки близок к оптимальному. Конструкция может включать в себе достаточно элементов для удовлетворения требованиям, но не все элементы могут быть для этой цели необходимыми. Для выполнения условия *«необходимого и достаточного»* следует проверить конструкцию на *«избыточность»*, т. е. попытаться найти и устранить все то, что является лишним. Все лишнее, не являющееся необходимым в конструкции, можно представить себе в виде запасов и подразделить на две группы: запасы по параметрам технических требований на ММ и запасы по параметрам самой конструкции, не связанные с техническими требованиями непосредственно, в первую очередь излишние запасы прочности и жесткости.

Запасы по любому параметру технических требований, реализованные в конструкции, свидетельствуют об отклонении создаваемого конструктивного варианта от иного, более рационального. По мере введения масштаба, по мере детализации чертежа эскизной компоновки и перехода к чертежу окончательной компоновки уничтожение запасов первой группы становится все более действенным средством улучшения компоновки и конструкции.

Пустоты в конструкции, свидетельствующие о нерациональности компоновки, можно рассматривать в качестве запасов по располагаемому пространству. Наличие таких запасов говорит о недоиспользовании критерия минимизации габаритов.

Пустоты внутри ММ можно исключить перекомпоновкой частей. Этим достигается уменьшение габаритов. Иногда выгодно, сохранив габариты модуля, использовать пустоты для конструктивных комбинаций, более полно удовлетворяющих каким-либо другим требованиям, например, точности, виброустойчивости, удобству работы оператора и т. п.

Запасы по параметрам геометрического характера (например, по угловым и линейным перемещениям движущихся частей) легко обнаружить по чертежу, чего нельзя сказать о запасах по таким параметрам, как, например, мощность на выходе или точность обработки угла поворота. При поиске скрытых запасов конструктор не должен забывать и о принципиальной схеме, так как при переходе от нее к конструкции особенно легко допустить избыточность.

Следствием снижения запасов по жесткости или прочности (запасы по параметрам самой конструкции) отдельных частей ММ является снижение их масс. В реальной конструкции, где все взаимосвязано, уменьшение габаритов и масс отдельных частей вызывает далеко идущие последствия. В частности, снижение массы, сопровождаемое снижением жесткостных характеристик каких-либо деталей, может в то же время сопровождаться улучшением других жесткостных характеристик, существенных для нормального функционирования модуля в целом. При этом может быть получено значительное повышение надежности.

С величиной различного рода запасов связан выбор типоразмеров готовых изделий, входящих в конструкцию ММ. Так, например, масса и размеры двигателя определяются развиваемой им мощностью. Уменьшение потребной мощности за счет снижения каких-либо запасов в модуле позволяет перейти к соседнему по шкале типоразмеров — меньшему — двигателю. Но такой скачкообразный с точки зрения массы и габаритов переход почти всегда открывает новые возможности для лучших вариантов компоновки. Нередко случается, что компоновка приобретает совершенно иной вид, становится более рациональной. Дальнейшее конструирование ведется на новом *«уровне рациональности»* компоновки, при котором уплотнение функциональной нагрузки частей, возможности их подгонки и частичной интеграции, а также выгоды от снижения запасов обеих групп реализованы в максимальной степени.

Уменьшение запасов второй группы является нелегкой задачей, требующей тщательных расчетов и знания технологических возможностей сегодняшнего дня.

3.7. Компактность конструкции

Наиболее очевидная возможность уплотнения конструкции ММ — сближение его частей, т. е. уменьшение расстояния между ними. Такой путь связан с рядом трудностей, возникающих по мере уменьшения зазоров. Даже определение величин зазоров между сближаемыми частями при сложной их конфигурации является трудоемкой работой. Неизмеримо большие трудности возникают в производстве при изготовлении деталей с жесткими допусками и их сборке. Не следует забывать,

что чрезмерное уменьшение зазоров может по ряду причин понизить надежность конструкции (например, из-за температурных деформаций).

Чем труднее протекает процесс сближения частей, тем чаще конструктор возвращается к рассмотрению ТЗ, пытаясь переосмыслить требования, послужившие причиной подобных затруднений. Это особенно относится к тем случаям, когда какое-либо «узкое» место препятствует значительному сжатию всей конструкции. Стремление «*расширить*» такое «узкое» место способствует усилению и углублению обратных воздействий на исходные требования.

Иногда становится возможным осуществлять такие изменения в технических требованиях, которые ведут к существенному улучшению компоновки, не сказываясь сколько-нибудь отрицательно на целевых функциях и эксплуатационных характеристиках модуля.

Методика отбора требований, наиболее важных для компоновки, предполагает необходимость той или иной корректировки первоначально скомпонованного ММ, т. е. возврат от текущего этапа, на котором реализуется очередное требование, к предыдущему. Такова суть так называемого **шагового процесса с возвратом**. Выбор каждого шага производится с таким расчетом, чтобы чертежная работа, вызванная корректировкой результатов, свелась к минимуму.

Представление о компоновке ММ как о шаговом процессе с возвратом основывается, с одной стороны, на нестрогой постановке задач, допускающей варьирование исходными данными в ходе решения, с другой стороны, на ограниченности возможностей человека в отношении оптимальной конструктивной реализации множества взаимосвязанных переменных.

3.8. Чертеж окончательной компоновки

Своеобразие этапа в его двойственности: с одной стороны, чистовым вычерчиванием чертежа окончательной компоновки (**чертежа общего вида** или **сборочного чертежа** ММ) подводится итог проделанной ранее длительной работы; с другой стороны, это не просто вычерчивание, это конструирование, притом начинающееся с самого начала, с самой первой линии и заканчивающееся созданием чертежа, **практически полностью обеспечивающего этап детализации**.

Приступая к чистовому выполнению чертежа окончательной компоновки, конструктор тем самым решается на отказ от дальнейших поисков, от сравнения и отбора вариантов. В то же время вся методика вычерчивания чертежа должна оставлять конструктору максимальную свободу варьирования на протяжении всего хода работы.

На первых порах элементы конструирования можно исключить из графической работы над чертежом окончательной компоновки.

Перенос на лист без больших изменений чертежа эскизной компоновки дает своеобразный костяк — основу чертежа будущей конструкции модуля. Костяк чертежа строится в нескольких проекциях. Если чертеж эскизной компоновки оказывается непригодным для такого построения, то это является свидетельством его недоработанности. Очередность нанесения на чертеже окончательной компоновки элементов костяка в основном совпадает с очередностью нанесения тех же элементов на чертеже эскизной компоновки. Неудачный выбор последовательности вычерчивания элементов костяка окончательной компоновки может создать значительные трудности при подробной конструктивной реализации того или иного узла.

Сложность, многодетальность, действие критериев минимизации массогабаритных параметров, критериев надежности требуют строгой последовательности чистового вычерчивания чертежа окончательной компоновки.

После вычерчивания костяка чертежа конструктор получает возможность сосредоточить усилия на конкретной разработке отдельных узлов и деталей. При их конструкторской проработке не только проверяется правильность допущений, принятых на предыдущих стадиях, но до некоторой степени исправляются и ошибки компоновки.

Детализацию узлов и деталей необходимо вести от средней части к периферии, чтобы избежать *«рыхлости»* или чрезмерной сжатости в радиальных направлениях. В первую очередь следует наносить на лист элементы, однозначно определившиеся по форме и расположению, чтобы воспользоваться вносимыми ими ограничениями, а также не откладывать проработку узлов и деталей с невыявленными габаритами, чтобы иметь возможность своевременно скомпенсировать увеличение их габаритов за счет уплотнения соседних.

Уменьшение числа деталей в ММ часто достигается за счет усложнения характера движения звеньев. Простейшим примером может служить планетарный редуктор. Ценой усложнения характера движения сателлита удается уменьшить число зубчатых пар (по сравнению с обычным зубчатым редуктором).

Из множества рекомендаций, касающихся сборки и разборки ММ, одна имеет общий характер: следует стремиться по возможности располагать детали таким образом, чтобы при разборке модуля каждая последующая деталь могла быть демонтирована через пространство, освобождающееся при удалении предыдущей детали.

По мере уточнения конфигурации деталей возрастают возможности оценки надежности их функционирования расчетным путем. Наличие прорисованного набора деталей и узлов позволяет по-новому проанализировать взаимосвязи с окружением не всего ММ в целом, а каждого узла, каждой детали в отдельности.

При отработке набора деталей на чертеже окончательной компоновки следует тщательно проверить, всюду ли, где возможно, применены нормализованные или типовые элементы.

Оптимальной с точки зрения обеспечения надежности является такая конструкция, в которой применены типовые, хорошо освоенные в производстве блоки, модули, узлы, детали. Сложность процесса детализации вызывает постоянное опасение преждевременности проработки того или иного узла или детали. Поэтому симметричные узлы и детали бывает выгодно вычерчивать лишь с одной стороны от оси симметрии, так как в процессе детализации может возникнуть несколько различных вариантов их конструкции. Той же постепенностью, осторожностью в нанесении новых линий характеризуется методика вычерчивания на чертеже окончательной компоновки крепежных деталей (болтов, винтов, гаек, шайб, штифтов и т. п.). Пока форма свинчиваемых деталей окончательно не определилась, крепежные детали представляют на чертеже лишь их осевыми линиями. Затем производится работа по объединению крепежных деталей с целью сокращения их типоразмеров, и после этого каждую крепежную деталь вычерчивают по стандартам.

Процесс обводки деталей, а также их штриховки должен быть направленным. Последовательность обводки чертежа окончательной компоновки в основном совпадает с последовательностью его вычерчивания. Исходя из стремления оставить возможность к максимальной свободе варьирования и своевременной корректировке чертежа не следует прибегать к штриховке до окончания обводки.

Процесс создания чертежа окончательной компоновки — это не только дальнейшее развитие, но и проверка компоновочного решения. Уверенность в рациональности принятой компоновки возникает по завершении реализации большинства заданных требований в конструкции. Именно в этот момент заканчивается формирование конструкции, в которой отражена и принципиальная схема, и требования технического задания, и взаимосвязи модуля с окружением, и критерии рациональности.

3. 9. Типы и стадии разработки конструкторской документации

Конструкторский документ (КД) в зависимости от его назначения отдельно или в совокупности с другими документами определяет состав и устройство изделия и содержит необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, приемки, поставки, эксплуатации и ремонта.

В зависимости от содержания КД подразделяют на два типа:

- 1) графические КД — документы, содержащие графическое изображение изделия и (или) его составных частей, устройства и принципа работы, внутренних и внешних связей его функциональных частей;
- 2) текстовые КД — документы, содержащие в основном текст сплошной или разбитый на графы; в виде иллюстраций могут содержать также и графический материал.

В зависимости от стадии разработки КД подразделяют на проектные (техническое предложение, эскизный проект, технический проект) и рабочие (графические: чертежи деталей, сборочные чертежи; текстовые: спецификации на сборочные единицы, ведомости покупных изделий).

Номенклатура КД, выпускаемых на конкретный объект, полностью указана в [1]. Выборка КД, наиболее часто разрабатываемых при проектировании ММ, приведена в табл. 8.3. Стадии разработки КД даны в табл. 8.4.

Техническое предложение — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации на изделие на основании ТЗ и различных вариантов возможных решений изделия, сравнительной оценки решений с учетом конструкторских и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий и патентные исследования.

Техническое предложение разрабатывают с целью выявления дополнительных или уточненных требований к изделию (технических характеристик, показателей качества и др.), которые не могли быть указаны в ТЗ, и это целесообразно делать на основе предварительной конструкторской проработки и анализа различных вариантов изделия.

Таблица 8.3

Номенклатура документов для стадий проектирования мехатронных модулей

Шифр доку-мента	Вид документа	Техническое предложение	Проект		Рабочая документация на			
			эскизный	технический	детали	сборные единицы	комплексы	комплекты
—	Чертеж детали	—	—	0	+	—	—	—
СБ	Сборочный чертеж	—	—	—	—	+	—	—
ВО	Чертеж общего вида	0	0	+	—	—	—	—
ТЧ	Теоретический чертеж	—	0	0	0	0	0	—
—	Схемы	0	0	0	—	0	0	0
—	Спецификация	—	—	—	—	+	+	+
ВС	Ведомость спецификаций	—	—	—	—	0	0	0
ВП	Ведомость покупных изделий	—	0	0	—	0	0	0
ЭП	Ведомость эскизного проекта	—	+	—	—	—	—	—
ТП	Ведомость технического проекта	—	—	+	—	—	—	—
ПЗ	Пояснительная записка	+	+	+	—	—	—	—
ТБ	Таблицы	0	0	0	0	0	0	0
РР	Расчеты	0	0	0	0	0	0	0
ПФ	Патентный формуляр	0	0	0	0	0	0	—
И	Инструкция	—	—	—	0	0	0	0

Примечание: «+» — документ обязательный; «0» — документ составляют в зависимости от характера, назначения или условий производства изделия; «—» — документ не составляют.

Таблица 8.4

Стадии разработки конструкторской документации

Стадии разработки	Литера документа	Дополнительные указания
Для серийного и массового производства		
Разработка технического предложения	П	Литера проставляется при разработке документов
Разработка эскизного проекта	Э	
Разработка технического проекта	Т	
Разработка документации для изготовления опытного образца (опытной партии)	—	—
Корректировка результатов по результатам изготовления и предварительных испытаний опытного образца (опытной партии)	О	Литера присваивается после окончания корректировки
Корректировка документации по результатам повторного (при необходимости) изготовления и приемочных испытаний опытного образца (опытной партии)	О ₁	
Корректировка документации опытного образца по результатам изготовления и испытаний установочной серии изделий	А	Литера присваивается после окончания корректировки и отработки (оснащения) технологического процесса
Для единичного производства		
Разработка эскизного проекта	Э	Литера присваивается при разработке документов
Разработка технического проекта	Т	
Разработка документации для изготовления изделия	Е	
Корректировка документации по результатам изготовления и испытания изделия	Е ₁	Литера присваивается после окончания корректировки

Примечание: допускается не присваивать литеру конструкторским документам, выполненным в виде эскизов. Литерой полного комплекта КД изделия следует считать низшую из литер, указанных в документах, входящих в комплект. Литера полного комплекта документов изделия должна быть указана в основной надписи его спецификации.

Техническое предложение является первым этапом компоновки изделия, в результате которого выявляют относительное расположение деталей и габариты

изделия; после рассмотрения и утверждения служит основанием для разработки эскизного (технического) проекта.

Эскизный проект — это совокупность конструкторских документов, содержащих принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габаритные размеры разрабатываемого изделия.

Эскизный проект разрабатывают с целью установления принципиальных (конструктивных, схемных и др.) решений.

Чертеж изделия на стадии эскизного проекта представляет собой дальнейшую разработку первого этапа компоновки и должен включать 2—3 проекции, а также дополнительные виды, разрезы и сечения.

После рассмотрения и утверждения эскизный проект служит основанием для разработки технического проекта или рабочей конструкторской документации.

Технический проект — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для дальнейшей разработки КД.

При необходимости технический проект может предусматривать разработку вариантов отдельных составных частей изделия. Выбор оптимального варианта в этих случаях осуществляется на основании испытаний опытных образцов изделия.

Технический проект, содержащий чертеж общего вида, ведомость технического проекта, пояснительную записку, дает полное и окончательное представление о конструкции, взаимодействии составных частей, эксплуатационно-технических характеристиках изделия и поясняет принцип его работы.

На чертеже общего вида должны быть:

а) изображены виды, разрезы и сечения изделия, нанесены надписи и текстовая часть, необходимые для понимания конструктивного устройства изделия, взаимодействия его составных частей и принцип работы;

б) указаны наименование (если возможно, то и обозначение) составных частей изделия, для которых объясняется принцип работы, приводятся технические характеристики, указывается материал, количество тех составных частей изделия, с помощью которых описывается принцип его работы, поясняются изображения общего вида и состав изделия;

в) приведены необходимые размеры и, если требуется, схема (например, кинематическая) изделия, техническая характеристика и технические требования.

Схема — графический конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними.

В зависимости от видов элементов и связей, входящих в состав изделия, схемы подразделяют на следующие виды, обозначаемые буквами: электрические — Э; гидравлические — Г; пневматические — П; газовые (кроме пневматических) — Х; кинематические — К; вакуумные — В; оптические — Л; энергетические — Р; деления — Е; комбинированные — С.

В зависимости от основного назначения схемы подразделяют на следующие типы, обозначаемые цифрами: структурные — 1; функциональные — 2; принципиальные — 3; соединений — 4; подключения — 5; общие — 6; расположения — 7; объединенные — 0.

Наименование и код схемы определяется ее видом и типом, например, схема кинематическая принципиальная — КЗ, схема гидропневматическая функциональная — С2, схема электрическая принципиальная и соединений — Э0.

Пояснительную записку составляют при разработке технического предложения, эскизного и технического проектов. В ней следует приводить характеристики выбранных технических средств и нестандартного оборудования. Результаты расчетов предпочтительно представлять в табличной форме.

В общем случае пояснительная записка к техническому проекту должна состоять из следующих разделов: содержание, введение, характеристика изделия, основные решения, технико-экономическое обоснование и сметная стоимость капитальных затрат, материально-технические средства, обеспечение энергоресурсами и выполнение требований, связанных с автоматизацией и механизацией, научно-исследовательские, опытно-конструкторские и экспериментальные работы, указания по подготовке и реализации проекта, приложения.

К рабочей документации проекта относят графические документы (чертежи деталей и сборочные чертежи) и текстовые (спецификации на сборочные единицы), могут быть выполнены габаритный, монтажный и другие чертежи, ведомости спецификаций, ссылочных документов.

Заключение

Переход от традиционных механизмов и агрегатов к мехатронным модулям и системам является качественным скачком. Его реализация невозможна без изучения разработчиком последних достижений механики, электроники, компьютерной

техники и умения оперировать современными методами расчета и конструирования.

В то же время динамичное расширение «сферы влияния» мехатроники сопровождается появлением оригинальных технических решений и уточненных, а зачастую и принципиально новых расчетных формул. Для их понимания и использования в его работе конструктору нужна достаточно прочная база знаний, формированию которой и служит этот курс.

Лекция

Тема 1.1.2. Конструкции мехатронных модулей

ВОПРОСЫ

4. Термины, определения и классификация мехатронных модулей.
5. Электроприводные мехатронные модули.
6. Гидроприводные мехатронные модули.

ЛИТЕРАТУРА

3. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: Учебник. – 2е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во «СТАНКИН», 2005. – 368 с.: ил. (Л3 с. 55-97).
4. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей: учеб.пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 336 с. (Л4 с.9-43).

1. Термины, определения и классификация мехатронных **модулей**

1. 1. Основные термины и определения

Мехатроника — это область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точного перемещения с электронными, электротехническими (гидротехническими, пневмотехническими) и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей и систем с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

Мехатронный модуль (ММ) — функционально и конструктивно самостоятельное изделие для реализации движений с взаимопроникновением и синергетической аппаратно-программной интеграцией составляющих его элементов, имеющих различную физическую природу.

К **элементам различной физической природы** относятся:

- механические (преобразователи движения, трансмиссии, звенья);
- гидравлические (гидрораспределители, клапаны, дроссели);
- пневматические (пневмораспределители, клапаны, дроссели);
- электротехнические (двигатели, тормоза, электроуправляемые муфты);
- гидротехнические (насосы, гидродвигатели, гидромуфты, гидротрансформаторы, гидроаккумуляторы);
- пневмотехнические (насосы, компрессоры, пневмодвигатели, пневмоаккумуляторы);
- электронные (электронные блоки и микропроцессоры);
- информационные (датчики перемещения, линейной и угловой скорости, усилия, момента, температуры, давления и пр.).

Суть **синергетической интеграции** состоит в объединении в единый модуль элементов различной физической природы при сохранении функционального преобразования, выполняемого данным модулем.

Преобразователь движения — механическое устройство, которое реализует заданное управляемое движение и взаимодействует с внешними объектами. В приводных ММ с этой целью применяются одно- и многоступенчатые передачи вращательного (редукторы, мультипликаторы) и поступательного движения, а также вариаторы различных конструкций.

Интерфейс — устройство, обеспечивающее связь между различными блоками ММ. В зависимости от физической природы входных и выходных переменных интерфейсные блоки могут быть как чисто механическими (гидравлическими, пневматическими), так и содержать электронные аппаратно-программные компоненты. Примером механического интерфейса является муфта, связывающая преобразователь движения с двигателем (необходимо попутно отметить, что в ММ следует всемерно избавляться от таких интерфейсов). Электронные интерфейсы расположены на входах и выходах устройства компьютерного управления и предназначены для его сопряжения с последующими структурными элементами, например, с цифроаналоговым преобразователем и датчиками обратной связи.

Модуль движения (МД) — конструктивно и функционально самостоятельный узел, включающий в себя механическую (гидравлическую, пневматическую) и электротехническую (гидротехническую, пневмотехническую) составляющие, который можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

Мехатронный модуль движения (ММД) — конструктивно и функционально самостоятельный узел, включающий в себя механическую (гидравлическую, пневматическую), электротехническую (гидротехническую, пневмотехническую) и информационную части, который можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

Интеллектуальный мехатронный модуль (ИММ) — конструктивно и функционально самостоятельный узел с синергетической интеграцией механической (гидравлической, пневматической), электротехнической (гидротехнической, пневмотехнической), информационной и компьютерной (электронной) частей, который можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

1. 2. Классификация мехатронных модулей

По физической природе составляющих элементов ММ подразделяются на электроприводные, гидроприводные, пневмоприводные и прочие.

В состав электроприводных ММ входят электродвигатель и (как правило) преобразователь движения. Они распространены наиболее широко и обычно являются базой для сравнения вариантов на стадии проектирования.

Гидроприводные ММ содержат гидродвигатели линейного или вращательного движения. По сравнению с электроприводными они обладают значительно меньшими размерами и массой, в частности, потому, что не требуют преобразователя движения; малой инерционностью; простотой регулирования и его широким диапазоном. К недостаткам их следует отнести сравнительно высокую стоимость; необходимость в насосной установке; чувствительность к качеству рабочей жидкости. Подробно достоинства и недостатки гидроприводных ММ рассмотрены в [2].

Пневмоприводные ММ по принципу действия подобны гидроприводным, а различия между ними определяются особенностями рабочей среды — сжатого воздуха. ММ с пневмоприводом конструктивно проще гидроприводных, дешевле, менее требовательны в эксплуатации, способны реализовать более высокие скорости движения. В то же время их нагрузочная способность при равных размерах на два порядка меньше, существенно ниже КПД, они не в состоянии обеспечивать точные перемещения.

В число прочих ММ входят модули как с комбинированным приводом, например, электрогидравлическим, так и с устройствами для преобразования энергии, не относящимися к электро-, гидро- и пневмоприводу.

Ниже речь пойдет об электроприводных и гидроприводных ММ как наиболее широко применяемых в настоящее время.

Классификация ММ по конструктивным признакам представлена на рис. 1.1 [1].

В полной мере фундаментальному определению мехатроники соответствуют только ИММ, которые содержат приводную часть (двигатель), информационную часть (датчики) и аппаратно-встроенную компьютерную часть.

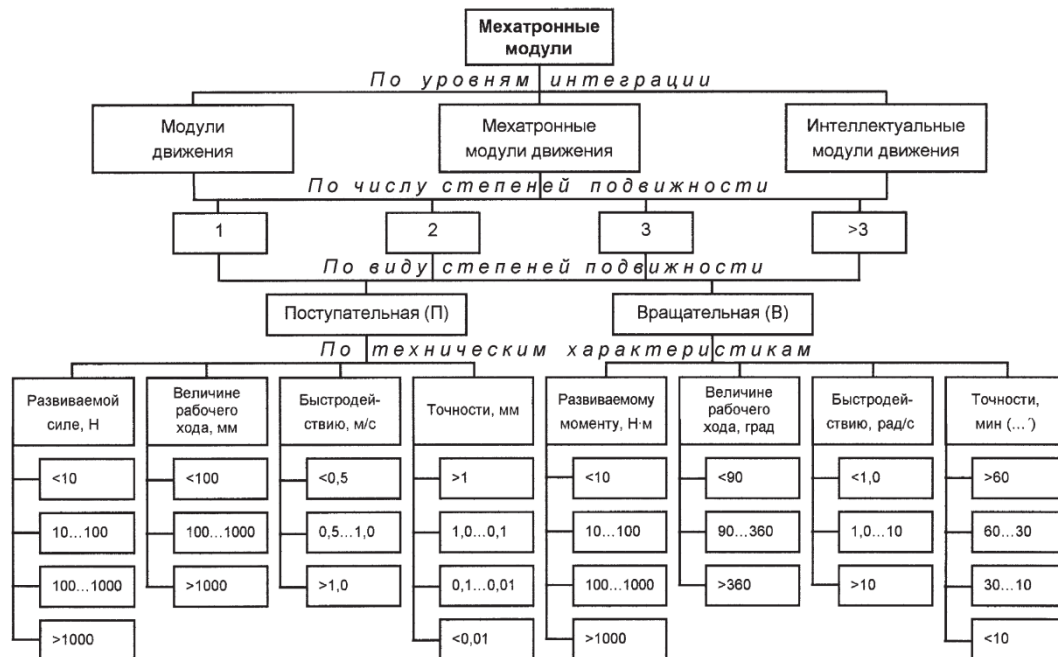


Рис. 1.1. Классификация мехатронных модулей

12

1. Конструкции мехатронных модулей

Включение в классификацию МД и ММД представляется методически и логически обоснованным, так как эти классы объектов, построенные на мехатронных принципах проектирования, являются базой для создания ИММ.

Далее ММ будут рассмотрены согласно приведенной классификации.

2. Электроприводные мехатронные модули

2.1. Модули движения

Главным отличительным признаком МД от общепромышленного привода является использование вала двигателя в качестве одного из элементов механического преобразователя движения. Примеры МД: мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-барабан, электрошпиндель.

Мотор-редуктор объединяет в один компактный конструктивный модуль электродвигатель и преобразователь движения. Эта конструкция получила в настоящее

время широкое распространение. Выпускается целая гамма различных типов мотор-редукторов для различных условий применения, позволяющая найти оптимальное решение каждой конкретной задачи.

Хорошо известный в России Санкт-Петербургский научно-технологический центр «Редуктор» (НТЦ «Редуктор») выпускает одно-, двух- и трехступенчатые цилиндрические, цилиндро-червячные, червячные, планетарные и волновые мотор-редукторы на лапах, фланцевые и с полым выходным валом. Широта охвата параметров такова, что конструктор имеет возможность подобрать мотор-редуктор на передаточное число и крутящий момент на выходном валу в диапазонах $u = 1,6...4000$ и $T_2 = 4...69300$ Нм соответственно [3].

Московский научно-технологический центр «Приводная техника» (НТЦ «Приводная техника») выпускает одно- и двухступенчатые червячные, цилиндро-червячные и цилиндрические соосные мотор-редукторы. Общие диапазоны параметров: $u = 7.10000$; $T_2 = 3,9.3984$ Нм [4].

Многие зарубежные фирмы, например, *MOTOVARIO*, *VARVEL*, *MAXON* выпускают различные мотор-редукторы. Фирма *MAXON* производит электродвигатели, цилиндрические и планетарные редукторы и на их основе мотор-редукторы, которые при необходимости снабжают фотоимпульсными датчиками, резольверами и тормозами (переводя таким образом в класс ММД).

Блочная-модульная система присоединения к двигателю различных типов планетарных и цилиндрических редукторов, а также магнитных и цифровых фотоимпульсных датчиков показана на рис. 1.2.

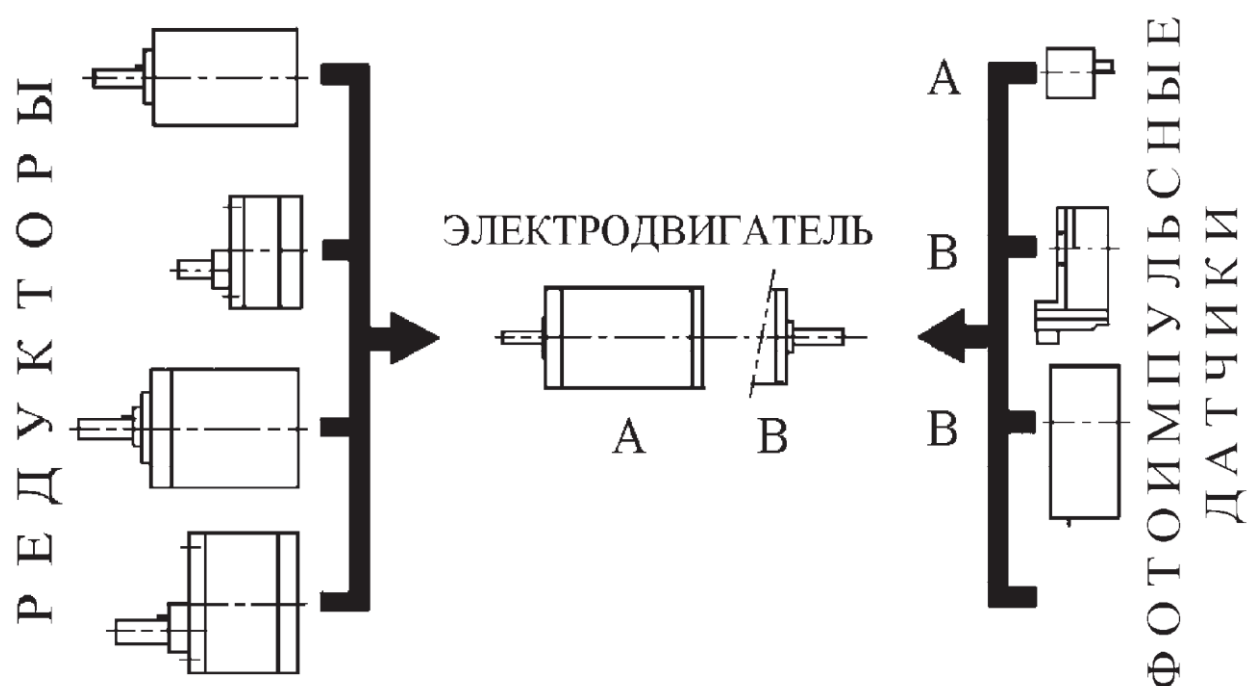


Рис. 1.2. Блочно-модульная система формирования мотор-редукторов: А, В — исполнения двигателя

Конструктивное объединение двигателя и преобразователя движения в мотор-редуктор имеет ряд преимуществ по сравнению с устаревшей системой соединения двигателя и преобразователя движения через муфту. Это и значительное сокращение габаритных размеров, и существенное уменьшение количества соединительных узлов и деталей, и снижение затрат на установку, отладку и запуск.

Благодаря своим достоинствам мотор-редуктор является в настоящее время одним из наиболее распространенных видов электропривода. Во всем мире выпускают ежегодно миллионы штук мотор-редукторов различных типов и исполнений, что позволяет удовлетворить все мыслимые потребности.

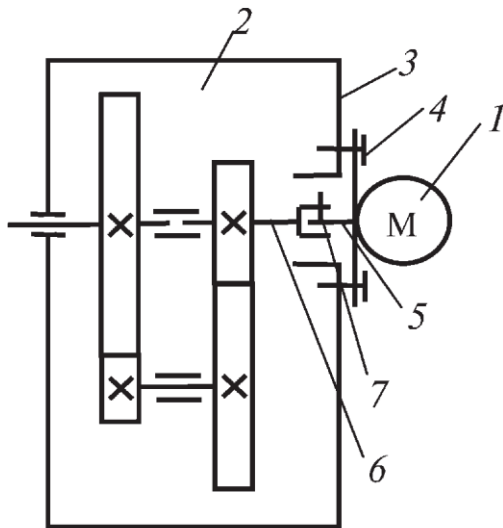


Рис. 1.3. Соосный двухступенчатый мотор-редуктор

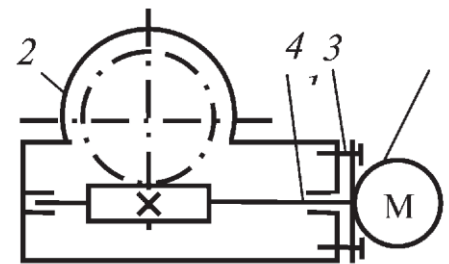


Рис. 1.4. Червячный мотор-редуктор

В качестве преобразователей движения, как уже было указано, используют зубчатые цилиндрические и конические, червячные, планетарные, волновые, винт-гайка и т. п. передачи.

Мотор-редуктор с преобразователем движения в виде соосного цилиндрического редуктора (рис. 1.3) состоит из двух основных элементов: двигателя 1 и редуктора 2, имеющего стыковочную поверхность 3 с отверстиями для крепления к ней двигателя винтами или болтами 4. При объединении двигателя и редуктора в единый конструктивный модуль вал 5 двигателя вводят во входной полый вал 6 редуктора и закрепляют шпонкой 7. Возможен вариант, когда двигатель и редуктор имеют общий вал.

Схема одноступенчатого червячного мотор-редуктора представлена на рис. 1.4. Он состоит из двигателя 1 и червячного преобразователя движения 2, соединенных в общий корпус винтами 3. Вал 4 двигателя и преобразователя движения единый.

Внешний вид двухступенчатого червячного мотор-редуктора фирмы *MOTOVARIO* показан на рис. 1.5.

В мотор-редукторах наиболее часто используют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, регулируемые преобразователем частоты вращения вала, однофазные двигатели и двигатели постоянного тока.

В качестве преобразователей движения, как уже было указано, используют зубчатые цилиндрические и конические, червячные, планетарные, волновые, винт-гайка и т. п. передачи.

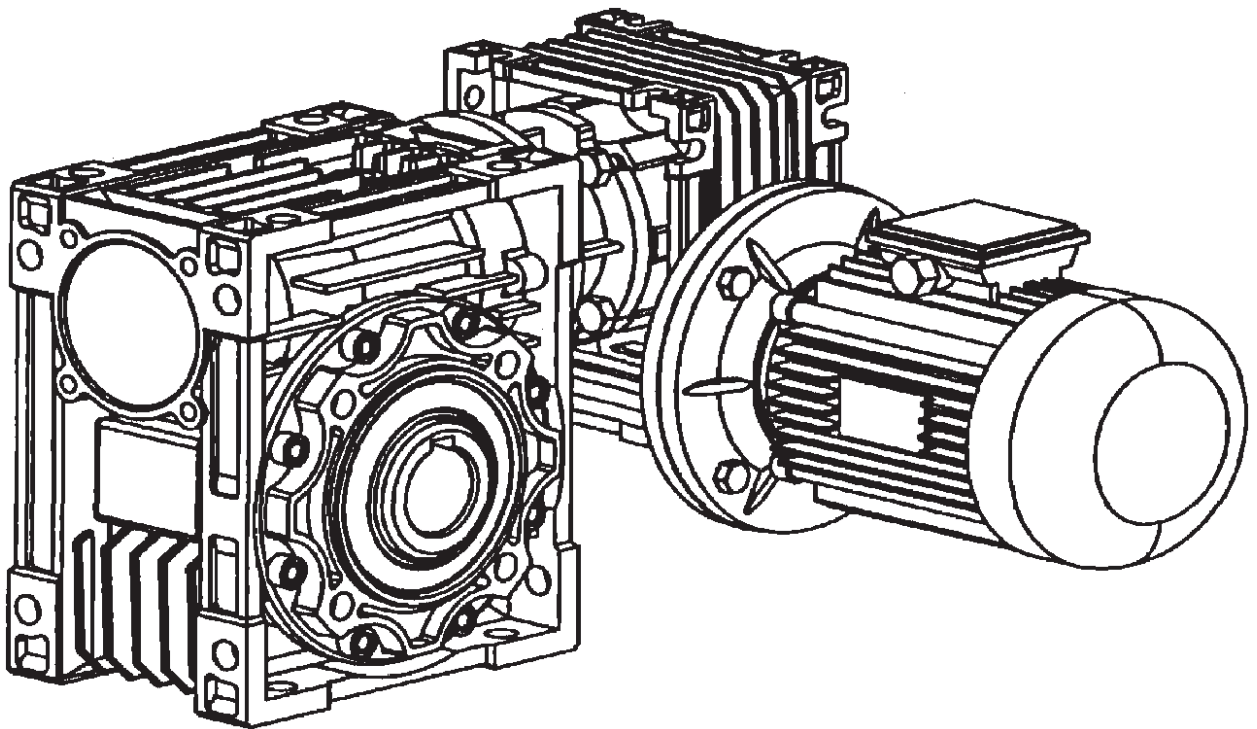


Рис. 1.5. Двухступенчатый червячный мотор-редуктор фирмы *MOTOVARIO*

Для защиты мотор-редуктора от действия внезапных перегрузок в его конструкции предусматривают ограничитель крутящего момента. Вариант такого устройства в червячном мотор-редукторе приведен на рис. 1.6 [4].

Червячное колесо 1 устанавливают на неподвижный конус 2, выполненный заодно с выходным валом, и подвижный конус 3, который поджимают тарельчатой пружиной 4 через подвижную втулку 5 при помощи регулировочной гайки 6 с фиксатором. В зависимости от того, на сколько оборотов завернута регулировочная гайка, возникает соответствующая осевая сила, вызывающая появление момента

трения между конусами и червячным колесом (предельного передаваемого момента).

При превышении внешним крутящим моментом на выходном валу 2 его предельного значения червячное колесо 1 начинает проворачиваться и не передает движение на червяк 7, тем самым предохраняя преобразователь движения и двигатель от повреждения.

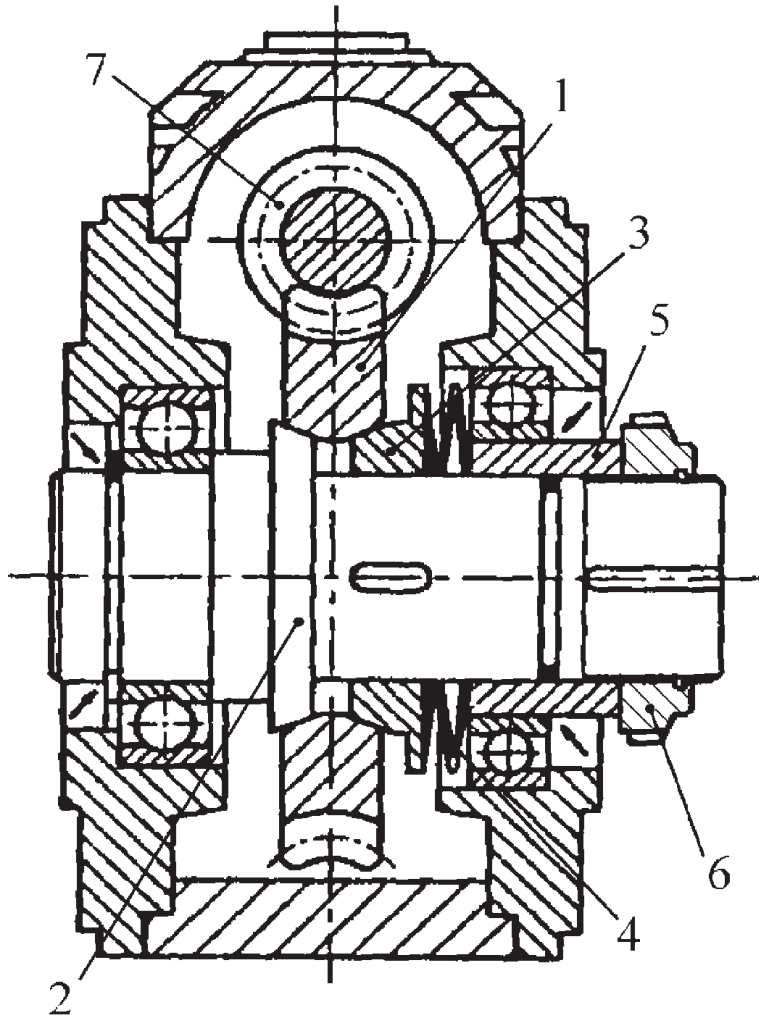


Рис. 1.6. Червячный мотор-редуктор с ограничителем передаваемого момента

Планетарный зубчатый мотор-редуктор изображен на рис. 1.7. Он состоит из асинхронного двигателя 1 и двухступенчатого планетарного зубчатого преобразователя движения 2, соединенных при помощи винтов 3 в единый корпус.

В преобразователе движения плавающими элементами являются водило первой ступени и солнечная шестерня второй ступени, которые связаны между собой зубчатыми муфтами. Водило второй ступени выполнено заодно с выходным валом преобразователя движения. Сателлиты первой ступени установлены в водилах консольно.

Планетарно-цевочный одноступенчатый мотор-редуктор, состоящий из двигателя 1 и преобразователя движения 2, соединенных в единый корпус винтами 3, представлен на рис. 1.8.

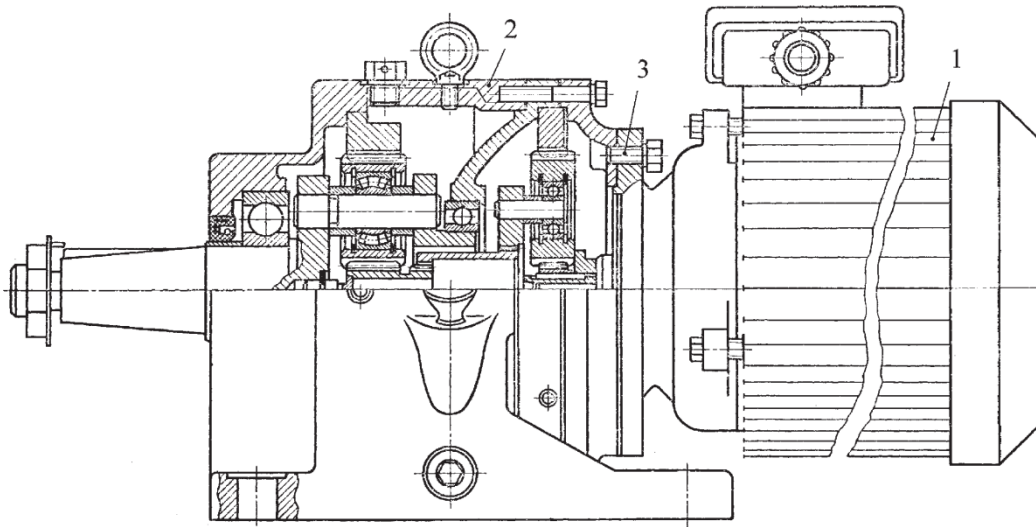


Рис. 1.7. Планетарный двухступенчатый мотор-редуктор

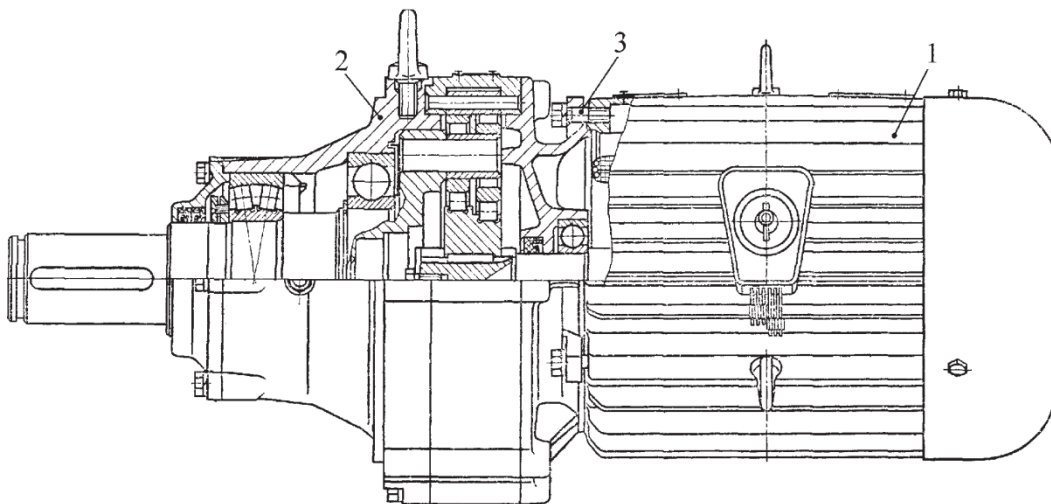


Рис. 1.8. Планетарно-цевочный мотор-редуктор

Мотор-редуктор на основе волнового механизма с электромагнитным генератором волн изображен на рис. 1.9. Он состоит из гибкого колеса 1, электромагнитного генератора волн 2, жестких колес 3, гибких подшипников 4, кулачков 5, зубчатого колеса 6 и выходного вала 7.

При работе мотор-редуктора гибкое колесо под воздействием электромагнитного генератора волн входит в зацепление с жесткими колесами. При этом гибкое колесо деформируется синхронно с вращающимся электромагнитным полем и, взаимодействуя с жесткими колесами, вращается относительно корпуса, передавая через зубчатое колесо 6 вращение выходному валу. Кулачки с надетыми на них гибкими подшипниками приходят в движение вместе с гибким колесом. Кулачки

можно устанавливать на выходной вал непосредственно или при помощи подшипников качения. Во втором случае обеспечивается радиальная координация гибкого колеса относительно жесткого, увеличивается надежность, долговечность и повышается коэффициент полезного действия модуля движения.

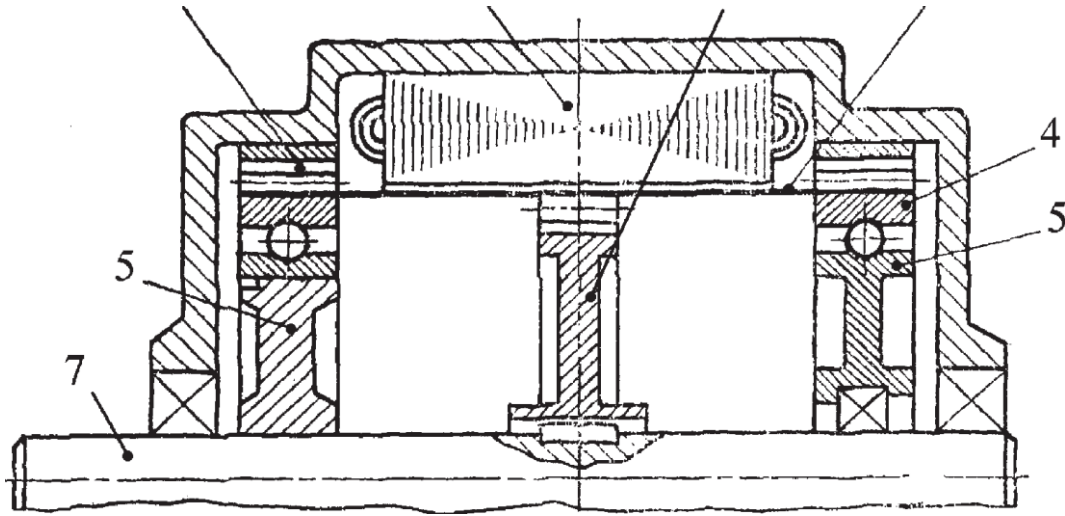


Рис. 1.9. Волновой мотор-редуктор

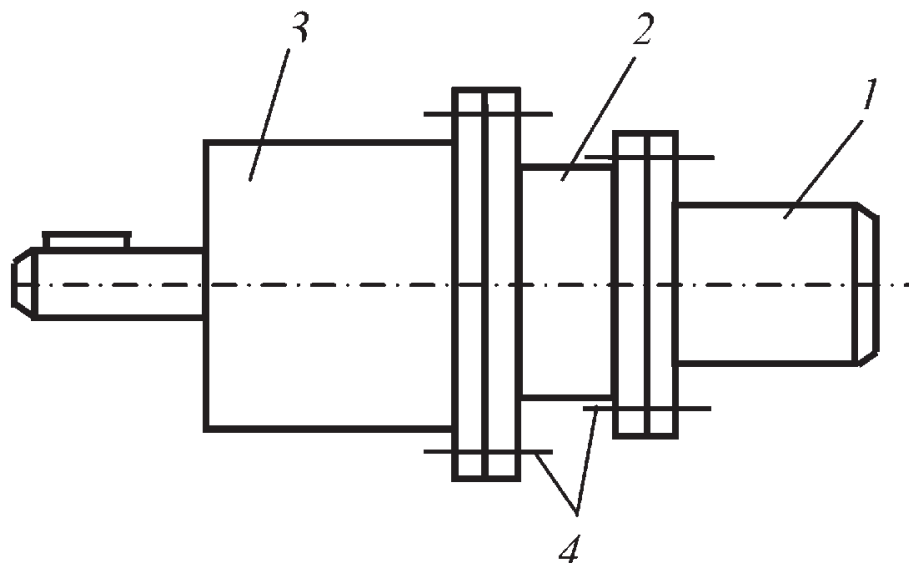
Подробно планетарные, планетарно-цевочные и волновые редукторы будут рассмотрены в дальнейшем.

Во многих случаях скорость вращения выходного вала мотор-редуктора должна быть изменяемой. Реализовать это требование возможно применением механических вариаторов, позволяющих регулировать скорость вращения, либо применением электронных устройств, изменяющих скорость вращения двигателя. Каждый из указанных способов, имеющих свои преимущества и недостатки, применяют в зависимости от тех конструктивных и технологических задач, которые необходимо решить. Например, если требуется повысить передаваемый момент на выходном валу, то целесообразно применять конструкцию мотор-редуктора с механическим вариатором. Если же необходимо расширить диапазон регулирования скорости либо сохранить минимальные габариты и массу мотор-редуктора, то предпочтительны частотные преобразователи скорости.

В мотор-редукторах могут быть использованы различные типы вариаторов. При этом изделие получает название «мотор-вариатор-редуктор».

На рис. 1.10 представлена общая компоновочная схема мотор-вариатор-редуктор. Двигатель 1, вариатор 2 и редуктор 3 соединяют фланцами с помощью винтов (болтов) 4.

НТЦ «Редуктор» применяет планетарно-фрикционные вариаторы и производит мотор-вариатор-редукторы: червячные, цилиндро-червячные, червячные двухступенчатые, планетарные, цилиндрические соосные, волновые.



4

Рис. 1.10. Компоновка мотор- вариатор-редуктора

Характеристики червячных мотор-вариатор-редукторов приведены в табл. 1.1, планетарных — в табл. 1.2, волновых — в табл. 1.3.

Применение мотор-редукторов в комплекте с частотными преобразователями скорости позволяет посредством изменения скорости вращения вала двигателя осуществлять плавное (бесступенчатое) регулирование скорости выходного вала с сохранением момента.

Таблица 1.1

Технические характеристики червячных мотор-вариатор-редукторов

Типоразмер мотор-вариатор- редуктор	Диапазон регулиру- вания	Частота вращения выходного вала n_2 , об/мин		Мощность двигателя P_1 , кВт	
		max	min	max	min
МВЧ-40	6,6	45.....12	7...14	0,18	—
МВЧ-63	6,5	11...125	1,8...19	0,75	0,25
МВЧ-80		12,5...12	1,9...19	1,8	0,37
МВЧ-100			1,9...20,6	4,0	0,75
МВЧ-125	1,9...23,8		7,5		
МВЧ-160	6,6		1,9...25	11,0	1,1
МВЧ-200	6,3	12,5...50	2...10		3,0
МВЧ-250	5,4	12,5...32	2...6		5,5

Таблица 1.2

Технические характеристики планетарных мотор-вариатор-редукторов

Типоразмер мотор-вариатор- редуктора	Диапазон регулиру- вания	Частота вращения выходного вала n_2 , об/мин		Мощность двигателя P_1 , кВт	
		max	min	max	min
МВП-25	5,2	4...186	1...30	1,5	0,18
МВП-31,5				3,0	
МВП-35,5				4,0	
МВП-40				5,5	
МВП-45					
МВП-50					
МВП-56				7,5	
МВП-63				9,2	
МВП-71					
МВП-80					
МВП-91					
МВП-100					
МВП-112					
МВП-125					0,37

Таблица 1.3

Технические характеристики волновых мотор-вариатор-редукторов

Типоразмер мотор-вариатор- редуктора	Диапазон регулирува- ния	Частота вращения выход- ного вала n_2 , об/мин		Мощность двигателя P_1 , кВт
		max	min	
МВВэ-50	3,5; 5,3; 5,8	8...12,5	1,36...2,1	0,18...5,5
МВВэ-63				
МВВэ-80				
МВВэ-100				
МВВэ-125				
МВВэ-160				
МВВэ-200				
МВВэ-250				
МВВэ-315				

Подбор типоразмера частотного преобразователя проводят по мощности двигателя. НТЦ «Редуктор» при комплектации мотор-редукторов применяет частотные преобразователи шести фирм: *Verter*, *DELTA ELECTRONICS Inc*, *LG INDUSTRIAL SYSTEMS*, *ADLEE*, *VACON*, «НТЦ Приводная техника».

Конструкция мотор-колеса на основе планетарно-цевочного преобразователя движения типа *K-H-V* представлена на рис. 1.11.

Эксцентрик 9 связан с валом электродвигателя 7 через двойную зубчатую муфту 10. Для роликов 8 эксцентрик имеет три беговые дорожки. Через сателлит 6 вращение передается цевочному колесу 5 и дальше на ступицу колеса 4, которая опирается на два конических радиально-упорных подшипника 3. Механизм параллельных кривошипов 7 установлен в неподвижной ступице 2. Передача является двухсателлитной, причем один из сателлитов раздвоен и расположен симметрично относительно другого, что исключает неравномерность распределения нагрузки по длине цевок колеса 5. Эксцентрик 9 выполнен плавающим и не имеет радиальных опор. Конструкция компактна и достаточно проста в сборке и разборке.

Конструкция мотор-барабана для электротали показана на рис. 1.12. Двигатель 1 встроен в барабан 2. Преобразователь движения планетарный двухступенчатый типа 3К с прямозубыми колесами вынесен за пределы барабана.

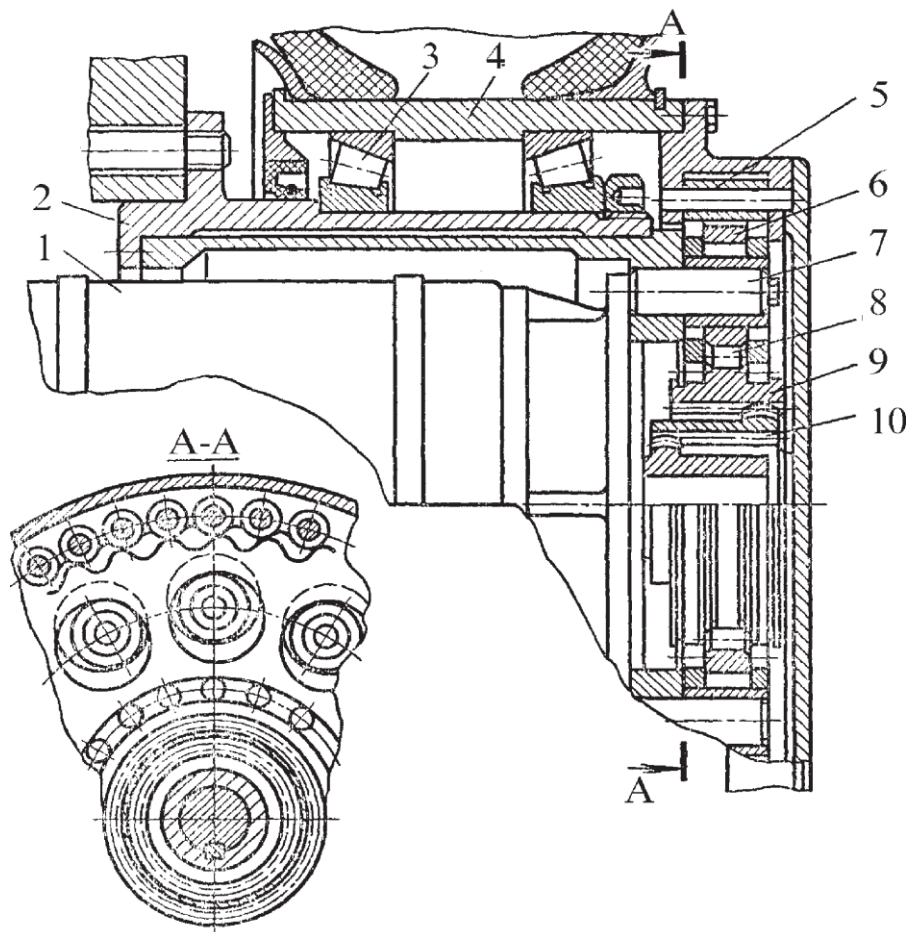


Рис. 1.11. Конструкция мотор-колеса на основе планетарно-цевочного редуктора

Движение ротора двигателя через зубчатую муфту 3 и входной вал-шестерню 4 преобразователя движения передается блоку 5 сателлитов, который приводит в движение водило 6, корончатое двухвенцовое колесо 7, зубчатое колесо 8 и через зубчатую муфту 9 сообщает вращение барабану. Блок 5 сателлитов вращается вместе с осью 10 в игольчатых подшипниках 11, установленных в щеках водила 6. Количество сателлитов — три. Передаточное отношение изображенного редуктора равно 40, грузоподъемность тали — 20 кН.

В настоящее время выпускают широкую номенклатуру высокоскоростных прецизионных электро- и пневмошпинделей с частотой вращения 9000... 250000 об/мин, предназначенных для обработки различных металлов и неметаллических материалов шлифованием, фрезерованием, сверлением, а также специального назначения, в том числе для промышленных лазеров.

В качестве примера может быть приведен электрошпиндель типа ШКФ производства завода АМО ЗИЛ (Москва) (рис. 1.13). Этот модуль с автоматической сменой инструмента, частотой вращения 30000 об/мин и мощностью 25 кВт предназначен к использованию в станках для скоростного фрезерования деталей из легких сплавов. Конструктивно электрошпиндель представляет собой мехатронный модуль со встроенным трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором.

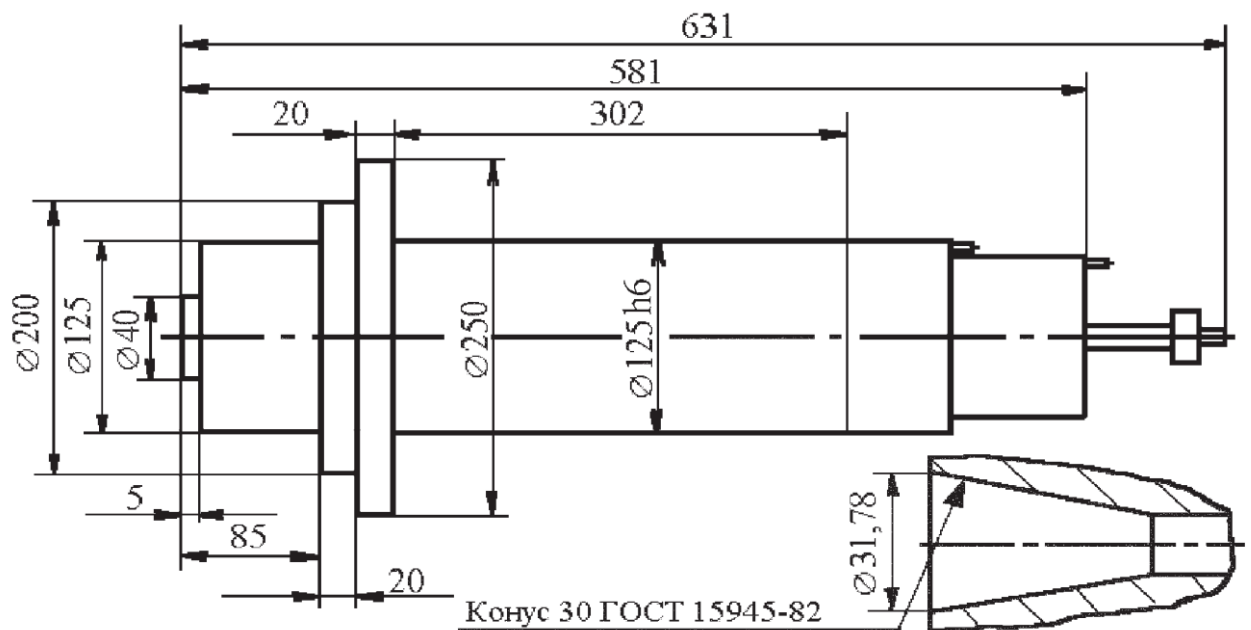


Рис. 1.13. Электрошпиндель типа ШКФ

В России электрошпиндели выпускают также «Самараточмаш» (г. Самара), Ивановский завод тяжелого станкостроения. За рубежом — фирмы *GMN* и *Precise* (Германия), *GAMFIOR* (Италия).

2.2. Мехатронные модули движения

Развитие новых электронных технологий привело к созданию миниатюрных датчиков и электронных блоков для обработки их сигналов. Это позволило ввести в ММД электронные и информационные устройства, наличие которых является главным отличительным признаком ММД от МД.

Современное производство предъявляет к ММД целый ряд требований: высокая точность реализации исполнительных движений; надежность, долговечность; возможность работы при наличии различных видов возмущений и в широком диапазоне температур окружающей среды; значительно меньшие массогабаритные показатели по сравнению с обычным электроприводом. Требования к развиваемым усилиям, точности и скорости исполнительных движений диктуются особенностями автоматизируемых операций, а требование минимизации размеров — необходимостью встраивания модуля в ограниченное пространство. Попытка синтеза ММД из имеющихся в наличии серийно выпускаемых компонентов может привести к технически и экономически неэффективным решениям. Рациональным является проектирование специализированного ММД, наиболее полно отвечающего его служебному назначению.

Сложность и противоречивость требований, предъявляемых к ММД, обуславливает целесообразность мехатронного подхода к их проектированию. В частности, следование принципу синергетической интеграции элементов системы приводит к обеспечению желаемого уровня качества модуля за счет конструктивного и функционального взаимопроникновения его компонентов, многие из которых являются специализированными и создаются в ходе параллельного системного проектирования с учетом их последующего объединения [1].

Если преобладающим является требование обеспечения компактности, то оно может быть реализовано путем использования бесконтактных электрических машин и их интеграции с преобразователями движения и информационно-измерительными элементами. При этом преобразователи движения и датчики не являются отдельными устройствами, а становятся неотъемлемыми элементами двигателя. Синергетический эффект достигается также за счет выполнения некоторыми компонентами ММД нескольких функций одновременно. Такие решения позволяют

исключить многие механические интерфейсы, упростить и удешевить конструкцию, устранить необходимость механической подгонки и согласования датчика и двигателя.

ММД являются функциональными «кубиками», из которых можно компоновать сложные мехатронные системы.

Примеры ММД: модули на основе электродвигателей углового и линейного движения и различных преобразователей движения (винтовых, червячных, планетарных, волновых и т. п.), безредукторные ММД, безредукторные поворотные столы.

ММ линейного движения выходного звена изображен на рис. 1.14. Он состоит из асинхронного двигателя 1 с полым валом 2, шариковинтовой передачи, включающей в себя винт 3, шарики 4, составную гайку 5, соединенную с валом 2, направляющей 6, нормально замкнутого электромагнитного тормоза 7, фотоимпульсного датчика 8 и корпуса 9.

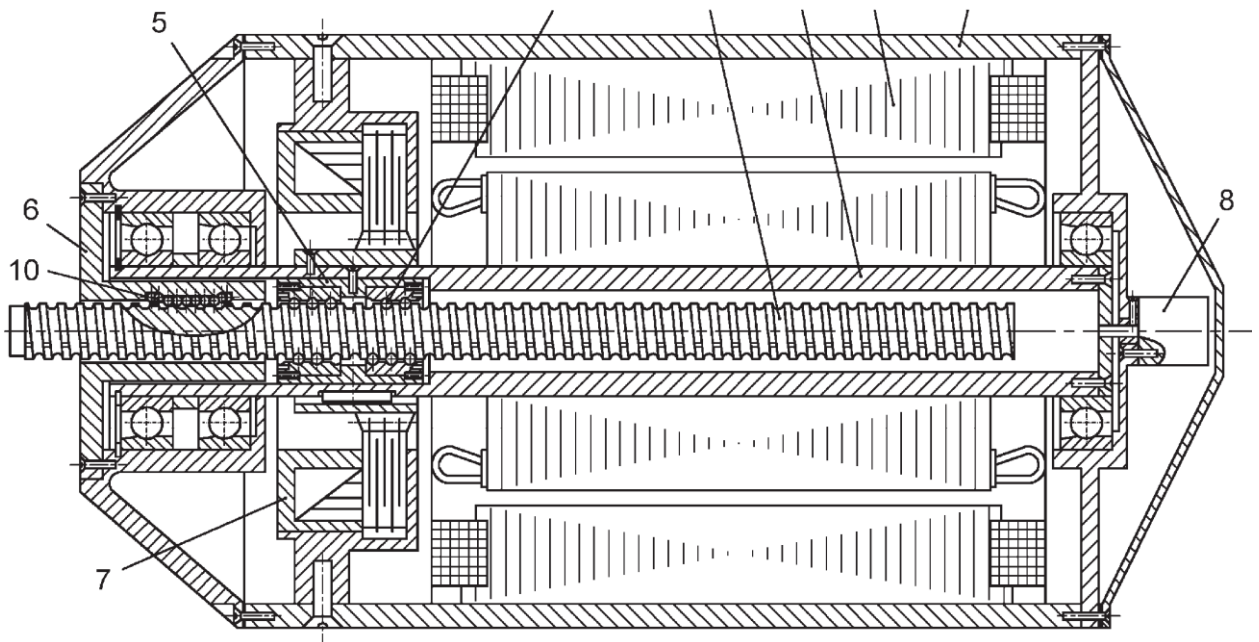


Рис. 1.14. Мехатронный модуль линейного движения

При вращении ротора двигателя 1 вал 2 вращает гайку 5, которая через шарики 4 вызывает поступательное перемещение винта 3. Для предотвращения проворачивания и уменьшения трения при перемещении винта 3 в нем сделаны три продольных паза, в которые входят шарики 10 направляющей 6. Величину перемещения винта 3 фиксирует фотоимпульсный датчик 8. Электромагнитный тормоз 7,

закрепленный в корпусе 9, в случае отключения электроэнергии срабатывает и останавливает винт.

Двухступенной (двухкоординатный) ММД показан на рис. 1.15. Модуль состоит из двух двигателей 1 и 2, волнового преобразователя движения с неподвижным гибким колесом 3, подвижным жестким колесом 4 и кулачковым генератором волн 5, двухступенчатого преобразователя движения, состоящего из конической зубчатой передачи 6—7, волнового преобразователя движения с неподвижным жестким колесом 8, подвижным гибким колесом 9 и кулачковым генератором волн 10, двух фотоимпульсных датчиков 11 и 12.

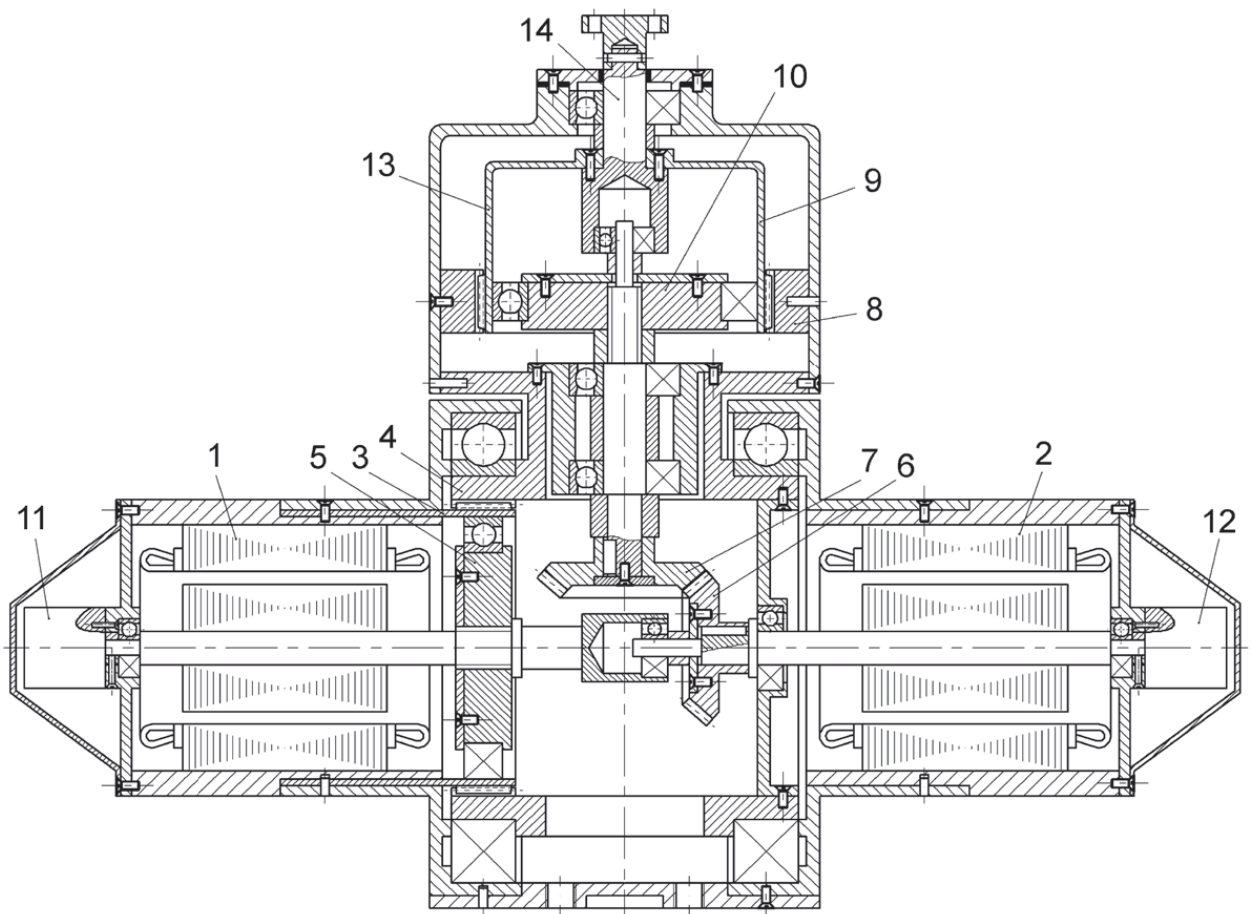


Рис. 1.15. Двухкоординатный мехатронный модуль движения

При включении двигателя 1 генератор волн 5 начинает вращаться и жесткое колесо 4 вместе со связанным с ним корпусом 13 приходит в движение.

При включении двигателя 2 вращение его вала через пару зубчатых колес 6—7 приводит во вращение генератор волн 10, и гибкое колесо 9 вместе со связанным с ним выходным валом 14 приходит в движение.

Фотоимпульсные датчики 11 и 12 предназначены для определения положения и перемещения корпуса 13 и выходного вала 14 соответственно.

ММД фирмы MAXON изображен на рис. 1.16.

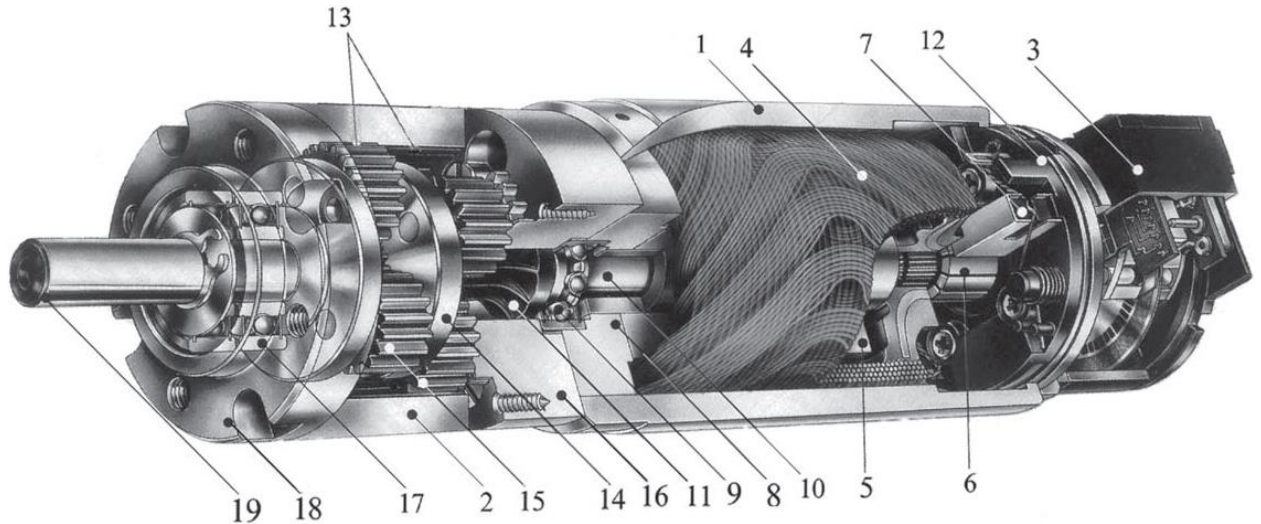


Рис. 1.16. Мехатронный модуль движения фирмы MAXON

Он состоит из коллекторного двигателя 1, двухступенчатого планетарного редуктора 2 и фотоимпульсного датчика положения 3. Двигатель включает в себя обмотку 4, магнит 5, коллектор 6, щетки 7, фланец 8, подшипник 9, вал 10, заканчивающийся вал-шестерней 11, и крышку 12.

Каждая ступень редуктора типа 2К-Н с одним внешним и одним внутренним зацеплениями имеет два центральных колеса 11 и 13 (первая ступень), водило 14 и сателлиты 15. Для установки подшипника 9 имеется специальная монтажная плита 16. Подшипник 17 закреплен во фланце 18 преобразователя движения, через который проходит выходной вал 19.

Фотоимпульсный датчик предназначен для определения положения и перемещения выходного вала.

Важнейшим этапом развития ММД стали разработки модулей типа «*двигатель — рабочий орган*». Такие конструктивные модули имеют особое значение для технологических мехатронных систем, целью движения которых является реализация целенаправленного воздействия рабочего органа на объект работ. ММД типа «*двигатель — рабочий орган*» широко применяют в шлифовальных и фрезерных станках под названием мотор-шпиндели.

Мотор-шпиндель фирмы *Fortuna* (Германия) изображен на рис. 1.17. Он состоит из электродвигателя 1, передаточного вала 2 с поддерживающим роликом 3 и шпиндельного вала 4, установленного в подшипниковых опорах 5.

Фирма *Fortuna* выпускает ряд типоразмеров мотор-шпинделей с диапазоном частот вращения 3000...21000 об/мин, мощностями 1,5 18,5 кВт и массами 26.230 кг.

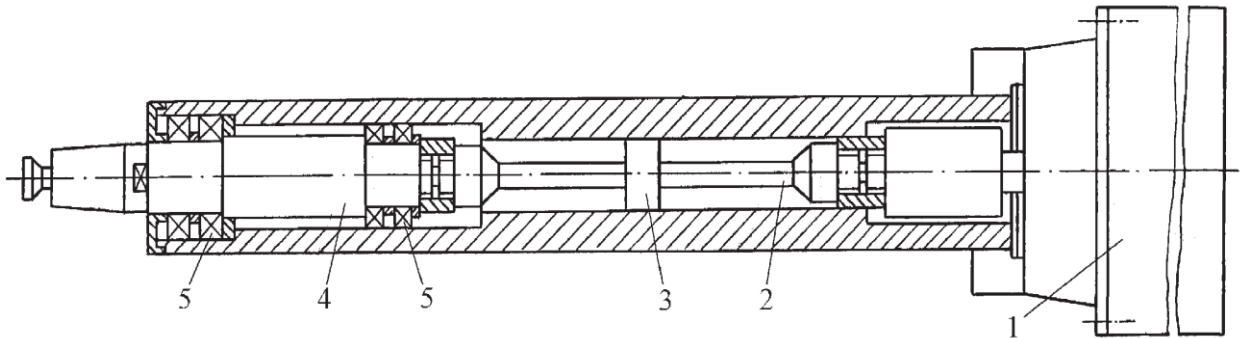


Рис. 1.17. Мотор-шпиндель фирмы *Fortuna*

ММД в виде безредукторного поворотного стола (рис. 1.18) предназначен для обеспечения режимов позиционирования и контурной обработки на фрезерных, сверлильных и расточных станках. Он состоит из основания 1 и собственно поворотного стола 2, опирающегося на упорные подшипники 3, встроенного двигателя 4, ротор 5 которого соединен с планшайбой 6, датчика 7 положения, датчика 8 скорости и гидротормоза 9, обеспечивающего фиксацию планшайбы в нужном положении. Безредукторное соединение ротора двигателя с планшайбой позволяет увеличить точность позиционирования стола и расширить его технологические возможности. Одновременно упрощается конструкция стола, уменьшается число деталей, повышается жесткость [5].

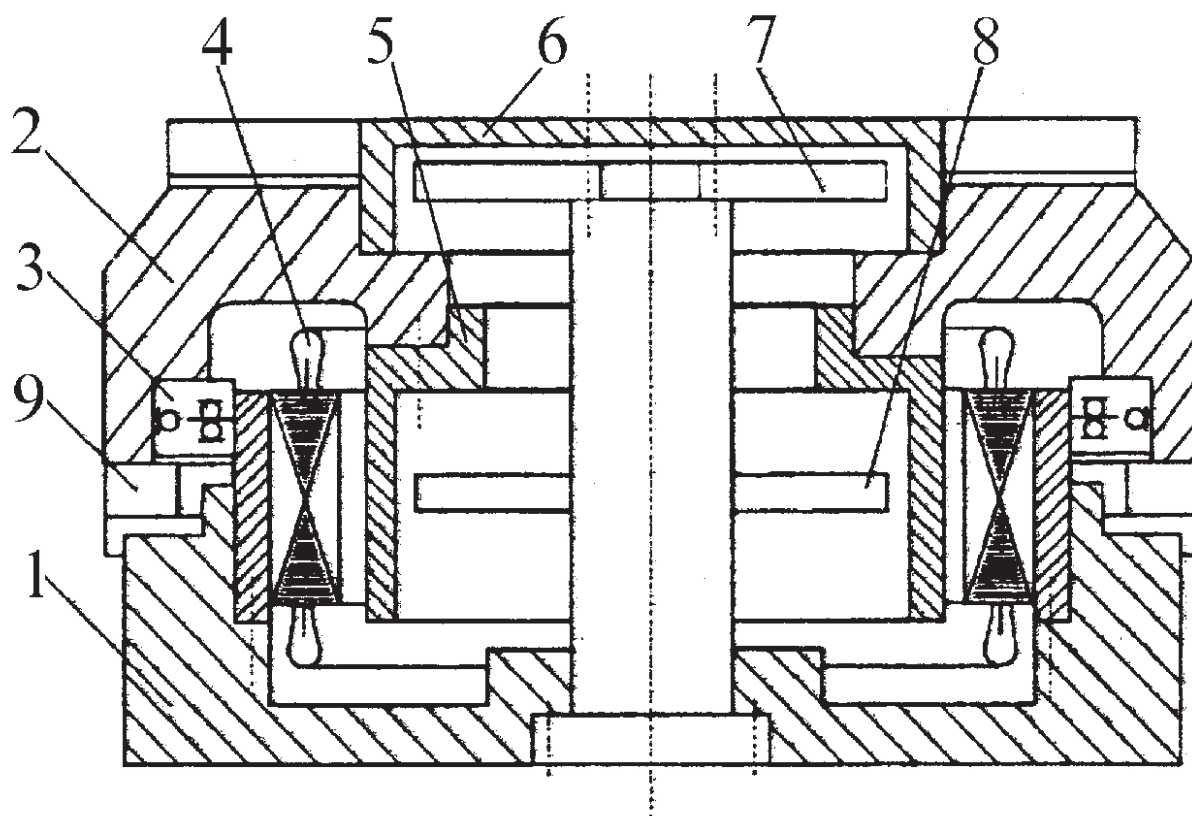


Рис. 1.18. Безредукторный поворотный стол

В табл. 1.4 приведены основные технические характеристики безредукторных поворотных столов.

ММ дают возможность создавать разнообразное технологическое оборудование нетрадиционных компоновок. Одним из представителей такого технологического оборудования является многокоординатный обрабатывающий центр ДФ-320 с перемещающимся по дуге шпинделем, схема которого представлена на рис. 1.19. В этом центре, изготовленном Дмитровским заводом фрезерных станков, нашли применение такие ММД, как модуль поступательного перемещения, безредукторный поворотный стол и безредукторный мотор-шпиндель [5].

Таблица 1.4

Основные технические характеристики безредукторных поворотных столов

Наименование характеристики	Модель				
	СП 200	СП 320	СП 630	СП 630В	СП 1000
Вращающий момент (30мин) Н·м	20	300	600	1500	2500
Вращающий момент (5 мин) Н·м	40	600	1200	3000	5000
Внешний диаметр, мм	191	398	644	584	930
Высота, мм	170	240	250	200	280
Погрешность пози- ционирования, угл. с (...")	3				

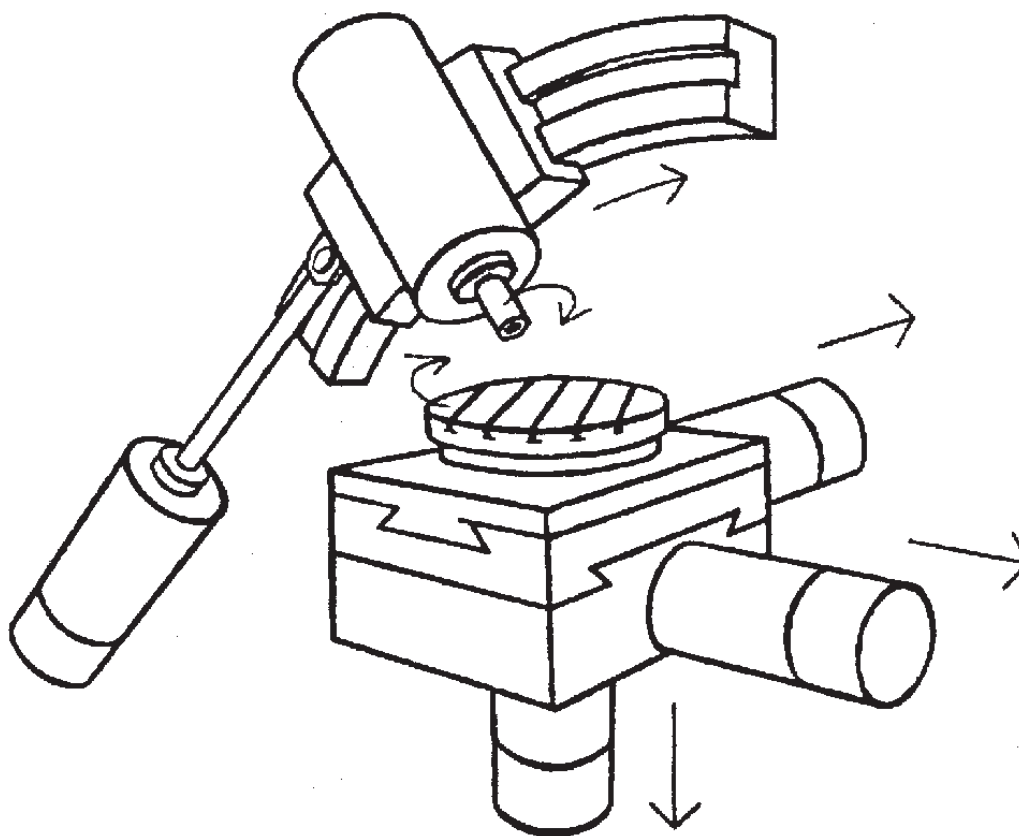


Рис. 1.19. Многокоординатный обрабатывающий центр ДФ-320

В общем случае электроприводной ММД состоит из следующих основных частей (блоков):

- двигатель, т. е. электромеханический преобразователь электрической энергии в механическую;
- преобразователь движения (в безредукторных ММД отсутствует);

- тормозное устройство, предназначенное для уменьшения скорости подвижного звена, останова и удержания его в неподвижном состоянии (может отсутствовать);
- люфтовывбирающий механизм, предназначенный для выборки зазора (мертвого хода) в некоторых видах преобразователей движения (может отсутствовать);
- направляющие, обеспечивающие заданное относительное движение выходного звена ММ (могут отсутствовать);
- информационное устройство, преобразующее контролируемую величину в сигнал, удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации, а также для воздействия им на управляемые процессы.

Состав ММД иллюстрирует рис. 1.20.

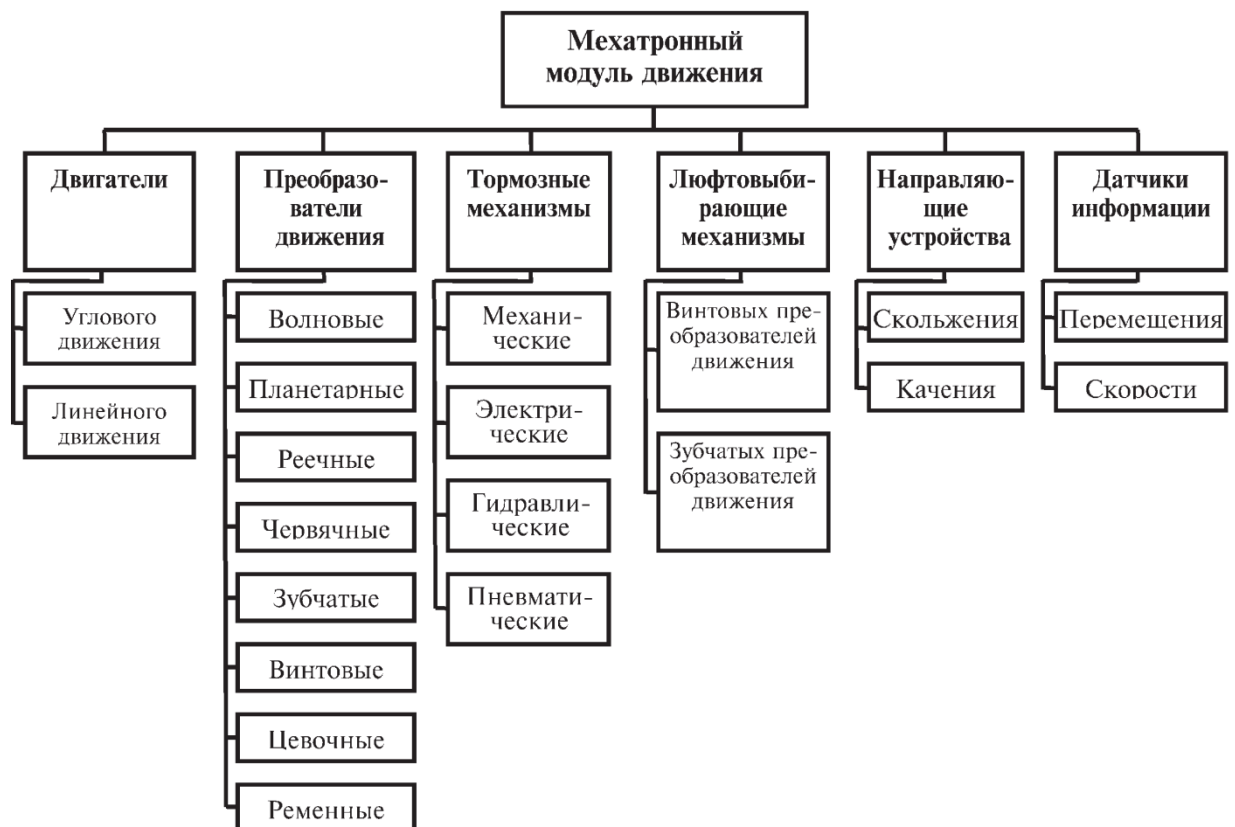


Рис. 1.20. Состав мехатронного модуля движения

Необходимо учитывать, что конкретные виды блоков не исчерпываются показанными на схеме. В частности, кроме датчиков перемещения и скорости в ММД используют датчики усилия, крутящего момента и пр.

2.3. Интеллектуальные мехатронные модули

Создание ИММ является главной особенностью современного этапа развития мехатроники.

По сравнению с ММД в конструкцию ИММ дополнительно встраивают микропроцессорные вычислительные устройства и силовые электронные преобразователи, что придает этим модулям интеллектуальные свойства и является их главным отличительным от ММД признаком.

На рис. 1.21 изображены ИММ фирмы *SIEMENS SIMODRIVE POSMO A* (рис. 1.21, а) и *SIMODRIVE POSMO SI* (рис. 1.21, б).

а б

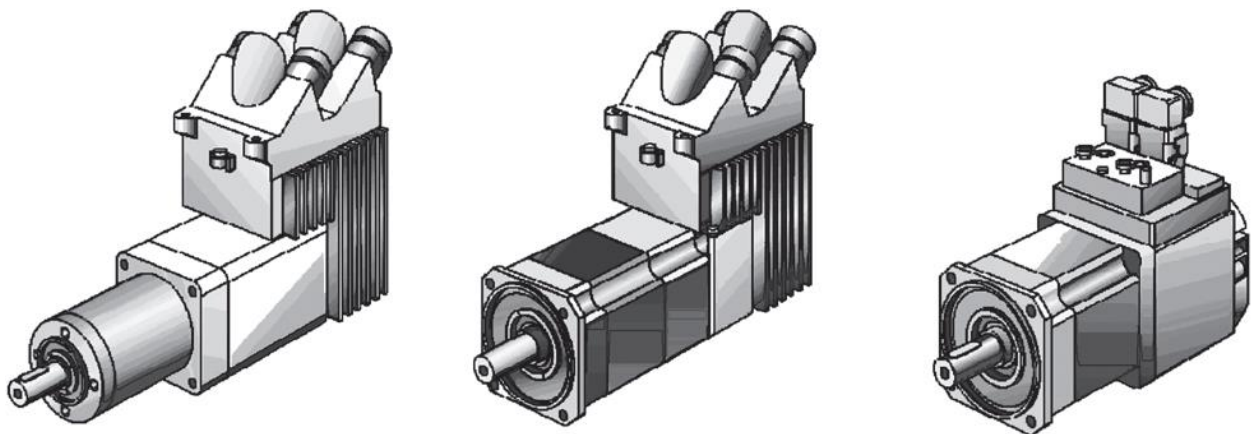


Рис. 1.21. Интеллектуальные мехатронные модули фирмы *SIEMENS*: а — *SIMODRIVE POSMO A*; б — *SIMODRIVE POSMO SI*

Синергетическая интеграция названных элементов составляет структурный базис мехатроники. Мехатронная идея синергетической интеграции элементов различной физической природы становится все более популярной среди разработчиков и потребителей наукоемкой продукции. Первые образцы ИММ появились в середине 90-х годов XX века, и в последние годы их доля на рынке быстро увеличивается. Так, по данным журнала *Packaging Digest* (август 2002), в настоящее время встроенные контроллеры управления движением применяют в 35,1 % мехатронных упаковочных машин. В течение ближайших 1,5-2 лет ожидается увеличение доли машин этого класса

на 8-10 %. Аналогичная тенденция наблюдается и в других областях применения мехатронных систем, в частности, в автоматизированном машиностроении.

Целесообразность применения ИММ обосновывается следующими факторами:

Управление цифровых образовательных технологий

- способностью ИММ выполнять сложные движения самостоятельно, без обращения к верхнему уровню управления, что повышает автономность модулей, гибкость и живучесть мехатронных систем, работающих в изменяющихся и неопределенных условиях внешней среды;
- упрощением коммуникаций между модулями и центральным устройством управления (вплоть до перехода к беспроводным коммуникациям), что позволяет добиваться повышенной помехозащищенности мехатронной системы и ее способности к быстрой реконфигурации;
- повышением надежности и безопасности мехатронных систем благодаря компьютерной диагностике неисправностей и автоматической защите в аварийных и нештатных режимах работы;
- возможностью создания на основе ИММ распределенных систем управления с применением сетевых методов, аппаратно-программных платформ на базе персональных компьютеров и соответствующего программного обеспечения;
- использованием современных методов теории управления (программных, адаптивных, интеллектуальных, оптимальных) непосредственно на исполнительном уровне и повышением тем самым качества процессов управления в конкретных реализациях;
- интеллектуализацией силовых преобразователей, входящих в состав ИММ, для реализации непосредственно в ММ интеллектуальных функций по управлению движением, защите модуля в аварийных режимах и диагностики неисправностей;
- интеллектуализацией сенсоров для ММ, позволяющей добиться более высокой точности измерения путем обеспечения в самом сенсорном блоке фильтрации шумов, калибровки, линеаризации характеристик вход/выход, компенсации перекрестных связей, гистерезиса и дрейфа нуля.

Основным фактором, сдерживающим использование ИММ в серийных изделиях, является их высокая цена, хотя в последние годы она постоянно снижалась. Это снижение обусловлено:

- 1) бурным развитием аппаратных устройств и информационных технологий, ориентированных на задачи управления движением;
- 2) появлением полупроводниковых приборов нового поколения (силовых полевых транзисторов, биполярных транзисторов с изолированным затвором, тиристорных с полевым управлением);

- 3) переходом на новую элементную базу в системах управления движением, которая создается цифровыми сигнальными процессорами (*DSP* — процессорами) и блоками *FPGA* (*Field Programmable Gate Arrays*);
- 4) разработкой гибридных технологий мехатроники, позволяющих встраивать электронные и вычислительные устройства в механические узлы.

Электроприводной ИММ состоит из следующих основных элементов:

- 1) двигателя;
- 2) преобразователя движения;
- 3) датчиков обратной связи и сенсорных устройств;
- 4) управляющего контроллера;
- 5) силового преобразователя;
- 6) устройств сопряжения и связи.

В современных ИММ используют различные типы двигателей: углового и линейного движения, переменного и постоянного тока, коллекторные и вентильные, непрерывного движения и шаговые.

В качестве преобразователей движения применяют зубчатые, винтовые и другие передачи. В конструкциях некоторых ИММ, построенных на базе высокомоментных двигателей, преобразователи движения отсутствуют.

В ИММ используют различные датчики положения и скорости (фотоимпульсные, вращающиеся трансформаторы, тахогенераторы) и сенсоры (датчики тока и момента, температуры и вибрации), которые передают информацию в устройство компьютерного управления о фактическом состоянии подсистем модуля.

Встроенные управляющие контроллеры, реализованные на современной элементной базе, позволяют получать компактные и надежные мехатронные узлы, обладающие интеллектуальными функциями, и строить на их основе многокоординатные мехатронные системы с децентрализованным управлением. В сочетании с открытой архитектурой систем управления типа *PC-NC* это позволяет создать качественно новые системы управления, обладающие радикально лучшими характеристиками по быстродействию, точности и функциональной гибкости.

Принципиально важно, чтобы все перечисленные элементы были конструктивно объединены в едином корпусе, чтобы сделать устройства связи внутренними блоками, недоступными для пользователя.

Следует подчеркнуть, что сущность ИММ определяется не типом структурных элементов, использованных в данной конструкции, а в первую очередь их функциональным назначением.

Одним из исторически первых ИММ является модуль *SmartMotor* американской фирмы *Animatics Corp.*, который появился на рынке в 1994 г.

Он создан на базе стандартного двигателя диаметром 60 мм, в задней части корпуса которого дополнительно были установлены ФИД, усилитель, 32-битовый программируемый контроллер и устройство связи с сетью. Модуль универсальный, может быть использован в мехатронных системах различного назначения. Производитель подчеркивает, что на 70 % модуль состоит из стандартных элементов, что позволило снизить его стоимость и обеспечить высокую надежность. Пользователь может самостоятельно выбрать режим управления (по положению, скорости или ускорению), а также использовать алгоритмы компьютерного управления, компенсирующие влияние люфта в преобразователях движения на динамические характеристики модуля.

Фирма *SIEMENS*, как уже было сказано, выпускает ИММ *SIMO- DRIVE POSMO A* (рис. 1.22), состоящие из следующих элементов:

- вентильного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов;
- планетарного (рис. 1.22, а) или червячного (рис. 1.22, б) редуктора (может отсутствовать; на рис. 1.22, в показан безредукторный ИММ);
- тормозного устройства (может отсутствовать);
- встроенного ФИД;
- силового преобразователя, закрепленного на крышке двигателя;
- комплектного управляющего устройства, включающего регулятор двигателя, блоки позиционирования и программирования, а также коммуникационный интерфейс для подключения в среде *PROFIBUS*.

Отличительной особенностью конструкции является съемная крышка для подключения силового преобразователя, которая содержит интегрированный переключатель адреса шины *PROFIBUS* и тормозной резистор, что позволяет при необходимости отключить двигатель без разрыва коммуникационных и силовых (по питанию) связей в других устройствах. Благодаря объединению коммуникационной и силовой шин достигается упрощение внутренней структуры модуля и обеспечивается его компактность.

Управление модулем осуществляют по стандартной шине *PROFIBUS*, при этом возможны следующие режимы движения:

- 1) перемещение в конечную позицию с программно заданной скоростью и регулируемым ускорением;

- 2) движение с регулируемой частотой вращения вала и регулируемым ускорением.

Оператор с помощью специального программного обеспечения может задавать в программе движения временные или логические условия, использовать методы компенсации зазора (люфта), получать сообщения о текущем положении и диагностике состояния модуля.

Технические данные модулей *SIMODRIVE POSMO A* указаны в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Технические характеристики ИММ *SIMODRIVE POSMO A*

Мощность двигателя, Вт	75	300
Напряжение питания, В	24	48
Тип двигателя	С возбуждением от постоянных магнитов бесщеточный серводвигатель	
Номинальная частота вращения вала двигателя, об/мин	3300; 2000	3500; 3000
Номинальный момент двигателя, Н·м	0,18; 0,36	0,48; 0,95
Номинальный ток двигателя, А	4,5; 9	5; 10
КП КПД двигателя, %	65	75
М Момент инерции двигателя, кг·м ²	$6 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-2}$
Масса модуля, кг:		
без редуктора	3,1	3,9 (4,0)
с 1-ступенчатым зубчатым редуктором	3,5	5,1 (5,2)
с 2-ступенчатым зубчатым редуктором	3,7	5,4 (5,5)
с 3-ступенчатым зубчатым редуктором	3,9	—
с червячным редуктором	3,5	—

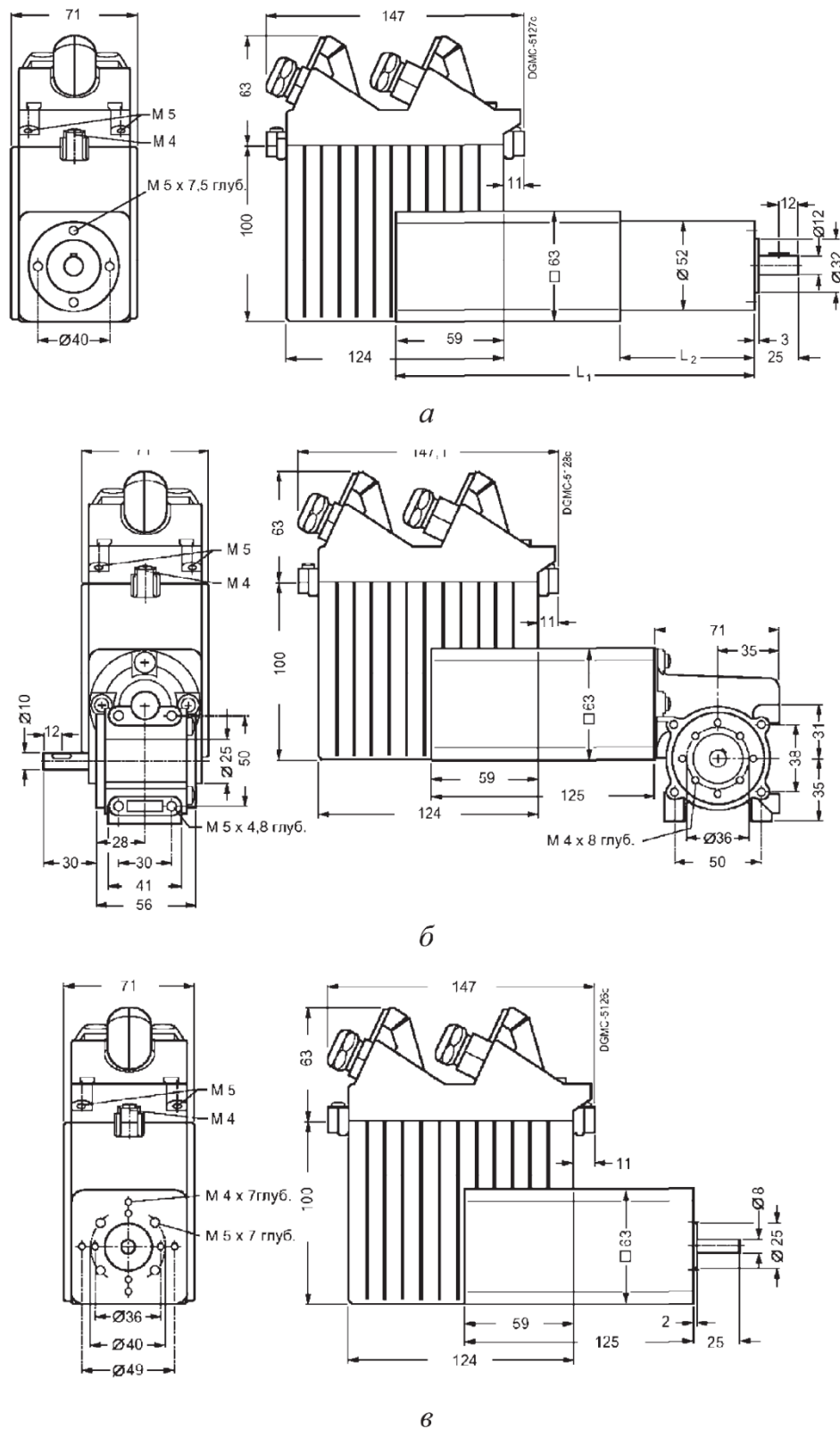


Рис. 1.22. Интеллектуальные мехатронные модули *SIMODRIVE POSMO A*:
 а — с планетарным редуктором; б — с червячным редуктором;
 в — безредукторный

ИММ *SIMODRIVE POSMO SI* фирмы *SIEMENS* (рис. 1.23) предназначен для реализации движений по одной управляемой координате при децентрализованном управлении мехатронной системой.

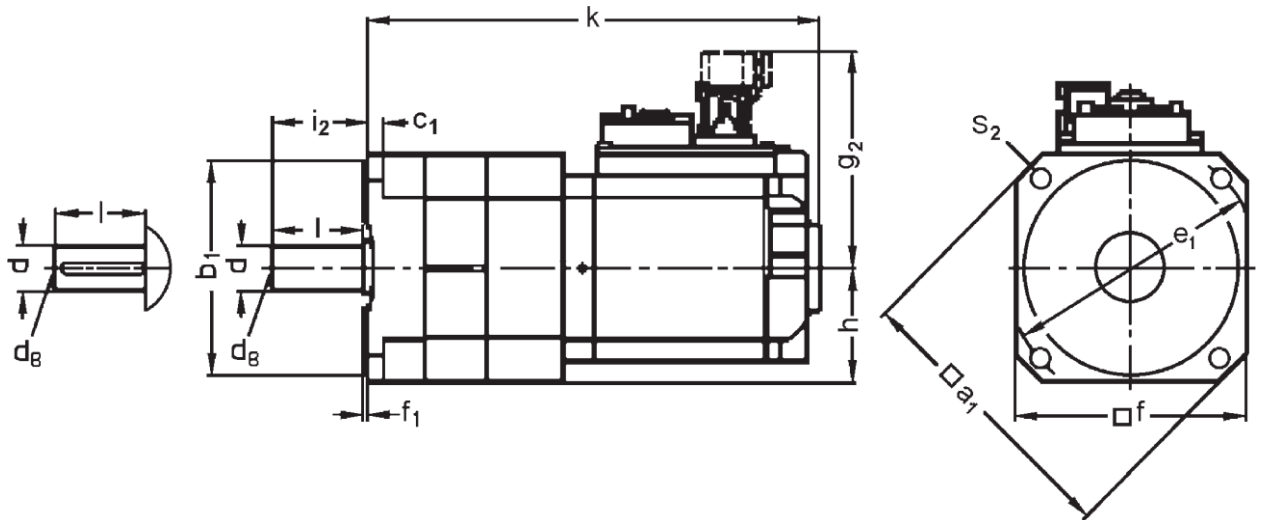


Рис. 1.23. Интеллектуальный мехатронный модуль *SIMODRIVE POSMO SI*

В состав модуля входят следующие элементы:

- вентильный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов (напряжение питания 600 В);
- преобразователь движения и тормозное устройство;
- блок силовой электроники;
- встроенный ФИД;
- вентилятор для принудительного охлаждения;
- управляющее устройство, включающее в себя управляющий контроллер, блоки позиционирования и программирования, а также коммуникационный интерфейс для шины *PROFIBUS*.

Типоряд ИММ *SIMODRIVE POSMO SI* включает в себя модули с двигателями мощностью 2,1...6 кВт и частотой вращения 3000 об/мин, способные создавать на выходном валу максимальные крутящие моменты 4...12 Нм. Массы модулей находятся в диапазоне 12...26,3 кг.

Функциональные возможности модуля:

- позиционирование по одной оси с возможностью свободного программирования последовательности движений;
- использование в качестве ведомого устройства (*Slave*) в сети *PROFIBUS-DP* с быстрым циклическим обменом данными с ведущим устройством (*Master*);

- интерполяционный вид движения совместно с другими приводами, обеспечиваемый иерархической системой управления с контроллером движения и шиной *PROFIBUS-DP*;
- встроенная система измерения абсолютных значений перемещений;
- быстрый ввод в эксплуатацию всех приводов на шине *PROFIBUS-DP* с помощью специальной программы *SimoCom U*, работающей под *Windows 95/98/NT*.

Фирма *SIEMENS*, производитель данных модулей, отмечает их следующие достоинства:

- 1) размещение модуля непосредственно в машине позволяет минимизировать затраты потребителя на стойку управления;
- 2) быстрая инсталляция машины благодаря установке модуля и объединению коммуникационных и силовых шин;
- 3) непосредственное подключение сигналов с помощью 4 клемм, которые настраиваются как входы или выходы, установка удобной для использования модульной штекерной техники и стандартных кабелей;
- 4) вставляемая крышка подключений с интегрированным переключателем адреса *PROFIBUS-DP* позволяет отключать модуль или приводной контур без прерывания других связей;
- 5) быстрая диагностика с помощью светодиодов, показывающих неисправность и готовность к работе, передачи информации по шине *PROFIBUS-DP* и использования специальной программы *SimoCom U*;
- 6) быстрая замена модулей с помощью карты памяти (*Memory Card*).

3. Гидроприводные мехатронные модули

Типичными ММ с гидроприводом являются следящие и шаговые модули.

Электрогидравлический следящий ММ представляет собой моноблок, который состоит из гидродвигателя вращательного или поступательного движения, дросселирующего распределителя с электроуправлением, регулирующих и управляющих аппаратов, а также электрических датчиков обратной связи [6].

Примеры следящих мехатронных модулей — поворотный следящий привод СП и привод поступательного движения ПЭГС [7].

Поворотный следящий привод СП (рис. 1.24) предназначен для осуществления возвратно-вращательных движений в пределах угла 270° в соответствии с

программой, поступающей на вход управляющего устройства в виде электрических сигналов.

Приводы комплектуются моментными гидроцилиндрами ДПГ (см. п. 2.2.2), электрогидравлическим усилителем мощности на базе дросселирующего распределителя, дросселем, предохранительными клапанами, датчиком обратной связи, соединенным с выходным валом через мультипликатор.

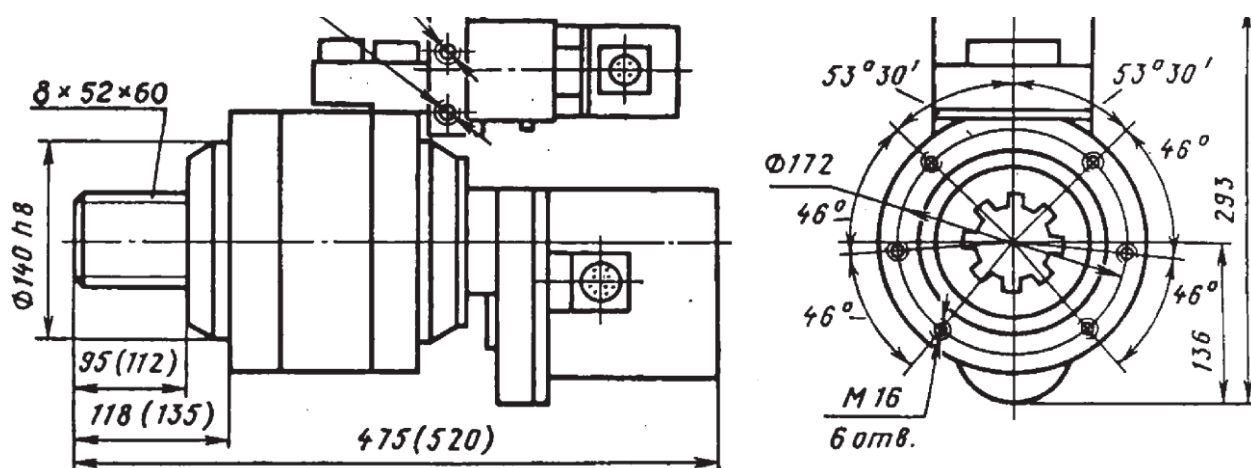


Рис. 1.24. Электрогидравлический следящий привод СП (размеры без скобок — для СП1 и СП2, в скобках — для СП3)

Основные технические параметры приводов — см. табл. 1.6.

Таблица 1.6

Основные параметры электрогидравлических следящих приводов СП

Параметр	СП1	СП2	СП3
Номинальный крутящий момент, Нм	500	1250	2000
Номинальное давление, МПа	6,3	12,5	
Максимальный расход, дм ³ /мин	15		17
Максимальная угловая скорость, с ⁻¹	2,094		1,745
Максимальная угловая погрешность позиционирования	± 5'	± 8'	± 10'
Масса, кг	56		63

Привод электрогидравлический ПЭГС предназначен для возвратно-поступательного перемещения рабочих органов машин в соответствии с программой, поступающей на вход управляющего устройства в виде электрических сигналов.

Привод ПЭГС содержит гидроцилиндр, электроуправляемый дросселирующий распределитель, запирающий гидроагрегат (гидрозамок), блок датчиков и люфтовывирающее устройство.

Основные параметры приводов ПЭГС приведены в табл.1.7.

Таблица 1.7

Основные параметры электрогидравлических приводов ПЭГС

Параметр	ПЭГС-6	ПЭГС-8	ПЭГС-8М	ПЭГС-9/1
Номинальное рабочее усилие, кН	16	20		
Номинальный расход, дм ³ /мин	40	20	40	
Номинальное давление, МПа	16	12,5	16	
Максимальная скорость, м/с	0,6	0,45	0,18	0,45
Ход штока, мм	500	630	270	1000
Погрешность позиционирования, мм	± 0,75		± 0,6	± 0,75
Масса, кг	31	38	35	42

Электрогидравлические шаговые приводы (модули) были разработаны в конце 50-х годов прошлого века в СССР и сразу получили широкое распространение в отечественном и зарубежном машиностроении как устройства для точного перемещения рабочих органов агрегатов с числовым программным управлением. В нашей стране созданы три типоряда приводов: ЭМГ18—1, ЭЗ2Г18—2 и 1,5—2Г18—3.

Шаговый привод ЭМГ18—1 (рис. 1.25) состоит из аксиальнопоршневого гидромотора типа Г15—2, следящего устройства в виде кранового золотника и шагового электродвигателя типа ШД-4. Вал гидромотора 1 муфтой 2 связан с втулкой 3, внутри которой расположен крановый золотник 4, соединенный с валом шагового двигателя. Каналами в корпусе втулка и крановый золотник сообщаются с напорной и сливной линиями гидросистемы, а также с рабочими камерами гидромотора (каналы I и II). В нейтральном положении (разрез А-А на рис. 1.25) золотник 4 перекрывает каналы во втулке 3, и жидкость в гидромотор не поступает.

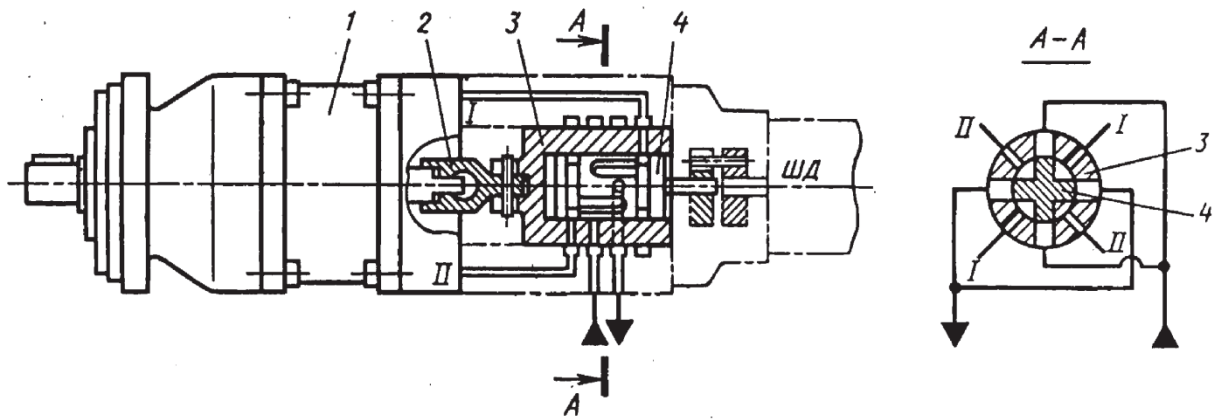


Рис. 1.25. Схема электрогидравлического шагового привода ЭМГ18—1

В шаговый двигатель подается импульсный ток. Каждый импульс обеспечивает поворот его вала вместе с крановым золотником на определенный угол (**шаг**, или **угловую дискрету**), чаще всего равный $1,5^\circ$. Золотник при этом открывает напорную и сливную линии, соединяя напорную линию с каналом I, а сливную — с каналом II (или наоборот, в зависимости от направления вращения вала шагового двигателя). Вал гидромотора поворачивается вместе с втулкой 3 до тех пор, пока напорная и сливная линии снова не окажутся перекрытыми золотником 4, т. е. на угол, равный угловой дискрете шагового двигателя. Другими словами, частота вращения гидромотора равна частоте вращения шагового двигателя, и направление вращения вала гидромотора соответствует направлению вращения вала шагового двигателя. По отношению к шаговому двигателю гидромотор является гидравлическим усилителем мощности и крутящего момента.

Конструкция **шагового привода Э32Г18—2** отличается от ЭМГ18—1 тем, что в ней использован дросселирующий золотник с осевым перемещением, связанный с валом шагового двигателя кинематической парой винт-гайка.

Отличие **шагового привода 1,5—2Г18—3** от Э32Г18—2 состоит в том, что он **снабжен регулируемым гидромотором** и системой автоматического изменения его рабочего объема, которая обеспечивает ускоренное вращение вала при уменьшении нагрузки.

В табл. 1.8 приведены основные технические данные электрогидравлических шаговых приводов ЭМГ18—1, Э32Г18—2 и 1,5—2Г18—3 (взяты по два привода из каждого типоряда).

Таблица 1.8

Основные параметры электрогидравлических шаговых приводов

Параметр	ЭМГ18-12Н	ЭМГ18-15Н	Э32Г18-22	Э32Г18-25	1,5-2Г18-32	1,5-2Г18-35
Рабочий объем, дм ³	0,02	0,16	0,02	0,16	0,01...0,02	0,08...0,16
Максимальная частота вращения, об/мин	200		2000	1000	4000	2000
Номинальный крутящий момент, Нм	11	92	11	92	5...11	40...92
Максимальный расход, дм ³ /мин	4	32	40	160	40	160
Максимальная угловая погрешность позиционирования	± 1,4°	± 0,8°	± 1,2°			
Масса, кг	16	64	15,5	57	26,5	64
Примечание: номинальное давление 6,3 МПа.						

Лекция

Тема 1.1.3. Двигатели мехатронных модулей

ВОПРОСЫ

7. Электродвигатели.
8. Гидравлические двигатели.
9. Гидроцилиндры.

ЛИТЕРАТУРА

5. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: Учебник. – 2е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во «СТАНКИН», 2005. – 368 с.: ил. (Л3 с. 97-121).
6. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей: учеб.пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 336 с. (Л4 с.43-73).

1. Электродвигатели

1.1. Электродвигатели углового движения

В ММ применяют различные типы двигателей углового движения: постоянного тока, синхронные и асинхронные переменного тока [1, 8].

Наиболее простым в управлении является двигатель постоянного тока, так как при постоянном значении магнитного потока регулирование момента производят только изменением величины тока.

Синхронный двигатель (иногда его называют вентильным) состоит из синхронной электрической машины, датчика положения ротора и электронного устройства управления.

Управление синхронным двигателем сложнее, поскольку при фиксированном значении магнитного потока, кроме регулирования величины тока, необходимо также регулировать величину пространственного угла, добиваясь получения требуемого значения момента.

Наиболее сложным в управлении является асинхронный двигатель. Управление им требует регулирования тока статора при поддержании постоянства магнитного потока и пространственного угла для получения максимального значения развиваемого момента.

По большинству других характеристик, и прежде всего **по массогабаритным показателям**, двигатели переменного тока превосходят двигатели постоянного тока.

При выборе двигателя постоянного тока необходимо учитывать его форму, так как она в значительной мере определяет геометрические параметры ММ. По конструктивному исполнению различают два вида двигателей: классическую форму ($L/D > 2$) и дисковую ($L/D < 1$), где L — длина двигателя, D — диаметр его корпуса. Форма двигателя зависит от конструкции якоря и вида встроенных датчиков. Известны три вида конструктивного исполнения якорей двигателей постоянного тока: классический, гладкий и малоинерционный. Вид якоря определяют по наличию на нем паза (классический) или отсутствию паза (гладкий) и выполнению якоря полым или дисковым (малоинерционный).

По способу подведения напряжения в обмотку якоря двигатели постоянного тока делят на коллекторные и бесконтактные (вентильные).

Двигатели с классическим якорем имеют относительно небольшой диаметр якоря при значительной его длине. Следовательно, классическая (удлиненная) форма двигателя обусловлена конструкцией якоря. Эти двигатели надежны,

обладают большой прочностью и теплоемкостью. К ним относят, например, коллекторные двигатели с обмоткой возбуждения серий Д и СД, с возбуждением от постоянных магнитов серий ДП и ДПМ и т. п.

У двигателей серий Д и СД, например, Д-25Г, СД-150 цифры 25 и 150 в их обозначении указывают значение номинальной мощности, Вт. В обозначении двигателей серии ДПМ мощностью свыше 100 Вт, например, ДПМ-1,6, цифры обозначают величину номинального момента, Нм, а мощностью менее 100 Вт, например, ДПМ-25, — наружный диаметр корпуса, мм.

Двигатели с малоинерционным полым якорем имеют классическую (удлиненную) форму. В них постоянные магниты могут находиться как внутри ротора, так и снаружи. В последнем случае момент инерции вращающихся частей меньше, чем при расположении магнитов внутри ротора. Эти двигатели обладают более высоким КПД и большим быстродействием по сравнению с двигателями с классическим якорем.

Двигатели с малоинерционным дисковым якорем имеют форму короткого цилиндра, длина которого меньше диаметра. Якорь у таких двигателей представляет собой закрепленный на валу тонкий немагнитный диск.

Возбуждение такого двигателя обычно создается постоянными магнитами (реже обмотками возбуждения), расположенными в торцевой плоскости, так что двигатель имеет не цилиндрический (радиальный) воздушный зазор, а плоский (аксиальный), вследствие чего уменьшается осевой габарит двигателя.

Дисковые двигатели обладают большим быстродействием, чем классические, так как их вращающаяся часть имеет малый момент инерции. При этом кратность пускового момента у них выше (до 10), чем у классических.

У двигателей с дисковым якорем существует проблема отвода тепла, так как тепловая постоянная якоря относительно мала. Поэтому ММ с двигателями с дисковым якорем рекомендуют устанавливать на металлическом основании или осуществлять принудительную их вентиляцию.

Условное обозначение коллекторного двигателя серии ДП с дисковым якорем с проволочной обмоткой, выведенной на коллектор, и возбуждением от постоянных магнитов, например ДП125—60—3—24, расшифровывают следующим образом: 125 — диаметр корпуса, мм; 60 — номинальная мощность, Вт; 3 — частота вращения вала, тыс. об/мин; 24 — напряжение питания, В. В двигателях с дисковым якорем с печатной обмоткой и возбуждением от постоянных магнитов серии

ПЯ, например ПЯ-50, цифра 50 указывает номинальную мощность, Вт. Двигатели серии ПЯ снабжены встроенным тахогенератором.

Коллекторные двигатели постоянного тока обладают малым сроком службы, повышенной чувствительностью к воздействиям окружающей среды, искрением под щетками, образованием щеточной пыли. Эти недостатки связаны с наличием скользящего контакта в щеточно-коллекторном узле.

У **бесконтактных двигателей** механический коллектор заменен бесконтактным переключателем (коммутатором) на полупроводниковых приборах. Коммутатор управляется датчиком положения ротора. Габаритные размеры и масса двигателя несколько увеличиваются, но значительно повышаются его надежность и долговечность по сравнению с коллекторными двигателями.

Бесконтактный двигатель содержит синхронную машину и датчик углового положения ротора. Бесконтактный двигатель постоянного тока имеет инверсное (обращенное) исполнение, т. е. обмотка якоря расположена в пазах статора, а на роторе размещены постоянные магниты с одной или двумя парами полюсов.

В качестве датчиков положения ротора применяют сельсины, синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (резольверы), датчики Холла.

При дискретном способе управления используют цифровые датчики положения.

Срок службы современных бесконтактных двигателей превышает 10000 ч.

Примером высокооборотных бесконтактных двигателей являются двигатели серии БК.

Технические характеристики и геометрические параметры некоторых типов двигателей постоянного тока приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Технические характеристики и размеры двигателей постоянного тока

Управление цифровых образовательных технологий

Тип электродвигателя		Мощность P , Вт	Момент M , Нм	Частота вращения n , об/мин	Момент инерции ротора $J_{дв} \times 10^{-3}$, кгм ²	Длина L , мм	Диаметр корпуса D , мм	Диаметр вала d , мм	Масса m , кг
Конструктивные особенности	Обозначение								
Пазовый якорь, электромагнитное возбуждение	СЛ-221	12,5	0,034	3500	0,014	92,5	70	6	1,2
	СЛ-369	55	0,147	3600	0,069	120	85	8	2,5
	СЛ-569	160	0,466	3600	0,245	157	108	10	5,3
	СЛ-661	230	0,916	2400	0,91	205	130	10	9,7
Пазовый якорь, возбуждение от постоянных магнитов. С тахогенератором	ДП-35	25	0,06	3000	0,085	136	35	4	0,9
	ДП-40	40	0,095		0,127	145	40	5	1,1
	ДП-50	60	0,143		0,266	167	50	6	2,0
	ДП-60	90	0,216		0,608	187	60	7	2,9
Дисковый гладкий якорь, возбуждение от постоянных магнитов. С тахогенератором	ПЯ-50	50	0,16	3000	0,017	67	110	7	1,5
	ПЯ-125	125	0,4		0,07	72	135	7	2,5
	ПЯ-250	250	0,8		0,23	105	180	10	7,0
	ПЯ-500	500	1,64		0,77	113	210	10	10,5
	ДПУ-160	180	0,57	3000	0,275	172	130	10	5,4
	ДПУ-200	550	1,7		0,78	184	180	14	8,2
Цилиндрический пазовый якорь, возбуждаемый от постоянных магнитов. С тахогенератором	ДПУ-240	1100	3,5		1,94	170	230	18	14,5
	ДПМ-0,5	75	0,5	1500	-	160	85	12	3
	ДПМ-0,8	120	0,8		0,001	275	110	14	9
	ДПМ-1,6	250	1,6		0,002	325	110	14	11
	ДПМ-2,5	370	2,5		0,0025	330	130	18	15
	ДПМ-5,2	750	5,2		0,0049	380	130	18	18
	4ДПУ-75	75	0,7	1000	0,21	294	67	—	12
	4ДПУ-220	220	2,1		2,8	294	127		16
	4ДПУ-450	450	4,3		4,9	359	127		27
	ВЭМ-11093	550	5,2	1000	8,5	377	130	—	21
	ВЭМ-12093	750	7,1		13	478	130		29
	ВЭМ-13093	1100	10,5		19	547	130		32

Окончание табл. 2.1

Тип электродвигателя		Мощность P , Вт	Момент M , Нм	Частота вращения n , об/мин	Момент инерции ротора $J_{\text{дв}} \times 10^{-3}$, кгм ²	Длина L , мм	Диаметр корпуса D , мм	Диаметр вала d , мм	Масса m , кг
Конструктивные особенности	Обозначение								
Бесконтактный, возбуждение от постоянных магнитов. С датчиком углового положения и коммутатором	БК-1425	6	0,012	4000	—	88	40	3,8	0,54
	БК-1533	10	0,032	5000		112	50	4,8	1,00
	БК-1534	16	0,039	3000		112	50	4,8	1,00
	БК-1617	25	0,052	4000		118	60	5,8	1,2
	БК-1626	40	0,065	7500		130	60	5,8	1,5
	БК-1817	60	0,078	6000		141	80	7	2,7
	БК-1826	90	0,146	7500		153	80	7	3,0
Полый бескаркасный якорь, возбуждение от постоянных магнитов	ДПР-32	1,9	1,96	9000	0,002	46	20	М3	0,065
		1,6	1,96	6000					
		1,2	1,96	4500					
	ДПР-42	3,2	4,9	6000	0,00057	54	25	М3	0,13
		2,4	4,9	4500					
		1,3	4,9	2500					
	ДПР-52	6,3	9,8	6000	0,0017	64	30	М4	0,22
		4,7	9,8	4500					
		2,6	9,8	2500					
	ДПР-62	12,6	19,6	6000	0,0036	76	35	М4	0,36
		9,4	19,6	4500					
		5,2	19,6	2500					
	ДПР-72	25,1	39,2	6000	0,0078	83	40	М4	0,52
		18,9	39,2	4500					
		10,5	39,2	2500					

В ММ широко применяют бесколлекторные двигатели переменного тока, обладающие следующими преимуществами: длительность службы (гарантийный срок службы более 40000 ч); большие допустимые кратковременные перегрузки по току; возможность использования в агрессивных средах (отсутствует механический

контактный коллектор, источник искрового и дугового разрядов); небольшие массогабаритные параметры; удобное с точки зрения охлаждения расположение обмотки (на неподвижном статоре).

Различают асинхронные и синхронные двигатели переменного тока.

Асинхронные двигатели применяют разных модификаций: однофазные, двухфазные и трехфазные, с короткозамкнутым и фазным роторами. В настоящее время в ММ находят наибольшее применение трехфазные короткозамкнутые электродвигатели.

Регулирование скорости асинхронного короткозамкнутого двигателя производят путем изменения задаваемой частоты и тока электродвигателя. Такое регулирование называют частотно-токовым.

Технические характеристики и геометрические параметры асинхронных электродвигателей серий ДАТ, 4А и АИР представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Технические характеристики и размеры асинхронных двигателей

Тип двигателя	Номинальная мощность P_n , кВт	Номинальный момент T_n , Нм	Номинальная частота вращения n_n , об/мин	Длина L , мм	Ширина B , мм	Высота H , мм	Диаметр вала d , мм	Масса m , кг
ДАТ-10—12	0,01	0,0147	12000	55	37	32	3	0,13
ДАТ-16—12	0,016	0,02	12000	75	40	40	3	0,30
ДАТ-18—8	0,01	0,02	8000	75	40	40	3	0,30
ДАТ-25—12	0,025	0,036	12000	84	50	40	3	0,35
ДАТ-40—12	0,04	0,049	12000	80	50	50	4	0,45
ДАТ-60—12	0,06	0,073	12000	92	60	60	4	0,65
ДАТ-100—8	0,10	0,18	8000	122	60	60	4	1,0
ДАТ-100—6	0,10	0,25	6000	135	80	80	4	1,75
ДАТ-250—8	0,25	0,45	8000	152	100	100	6	2,2
ДАТ-400—8	0,40	0,70	8000	178	100	100	6	3,8
ДАТ-600—6	0,60	1,45	6000	204	185	120	6	7,5
ДАТ-600—8	0,60	1,078	8000	204	185	120	6	5,0
ДАТ-1000—8	1,0	1,78	8000	204	185	120	6	7,5
ДАТ-1000—6	1,0	2,45	6000	212	162	160	8	13
ДАТ-1600—8	1,6	2,74	8000	212	162	160	8	13
ДАТ-2500—8	2,5	4,99	8000	252	162	160	9	16,8
4AA50A2Y3	0,09	0,294	3000	174	104	142	9	3,3
4AA50B2Y3	0,12	0,392	3000	172	104	142	9	3,3
4AA56A2Y3	0,18	0,588	3000	221	120	152	11	4,5
4AA63A2Y3	0,25	0,816	3000	221	120	152	14	4,5
4AA56B2Y3	0,37	1,210	3000	250	130	164	9	6,3
4AA63B2Y3	0,55	1,796	3000	250	130	164	14	6,3
4A71A2Y3	0,75	2,450	3000	330	170	201	19	15,1

Окончание табл. 2.2

Тип двигателя	Номинальная мощность P_H , кВт	Номинальный момент T_H , Нм	Номинальная частота вращения n_H , об/мин	Длина L , мм	Ширина B , мм	Высота H , мм	Диаметр вала d , мм	Масса m , кг
4A71B2Y3	1,1	3,590	3000	330	170	201	19	15,1
4A80A2Y3	1,5	4,900	3000	355	186	218	22	17,4
4A80B2Y3	2,2	7,180	3000	375	186	218	22	20,4
AIP90L2Y3	3,0	9,800	3000	402	208	243	24	28,7
AIP100S2Y3	4,0	13,000	3000	407	235	263	28	36
AIP100L2Y3	5,5	17,900	3000	457	235	263	28	42
4AA50A4Y3	0,06	0,39	1500	174	104	142	9	3,3
4AA50B4Y3	0,09	0,58	1500	174	104	142	9	3,3
4AA56A4Y3	0,12	0,78	1500	221	120	152	11	4,5
4AA56B4Y3	0,18	1,17	1500	221	120	152	11	4,5
4AA63A4Y3	0,25	1,63	1500	250	130	164	14	6,3
4AA63B4Y3	0,37	2,41	1500	250	130	164	14	6,3
4A71A4Y3	0,55	3,59	1500	330	170	201	19	15,1
4A71B4Y3	0,75	4,9	1500	330	170	201	19	15,1
4A80A4Y3	1,1	7,18	1500	355	180	207	22	17,4
4A80B4Y3	1,5	9,4	1500	375	186	218	22	20,4
AIP90L4Y3	2,2	14,3	1500	402	208	243	24	28,7
AIP100S4Y3	3,0	19,6	1500	407	235	263	28	36
AIP100L4Y3	4,0	26,1	1500	457	235	263	28	42
AIP112M4Y3	5,5	35,9	1500	534	260	310	32	56

Синхронные двигатели применяют в различных областях техники. Они характеризуются хорошей управляемостью, высоким КПД, бесконтактностью, широкими функциональными возможностями. Применение синхронных двигателей в ММ обеспечивает высокую частоту вращения выходного звена, малое время (менее 0,1 с) разгона от нуля до максимальной частоты вращения, отсутствие пульсаций момента, малые массу и габариты, небольшой собственный момент инерции, высокую перегрузочную способность в циклическом режиме, широкий диапазон регулирования частоты вращения.

Электромагнитный момент синхронного двигателя зависит от магнитного потока возбуждения, тока и пространственного угла между векторами магнитного потока и тока.

У синхронных двигателей угол ϕ положения ротора относительно статора контролируется дискретным датчиком. Равномерность регулирования в пределах шага достигается путем регулирования тока. Система управления — замкнутая.

Такой режим работы называют режимом бесконтактного двигателя постоянного тока. При работе в нем синхронный двигатель имеет механические и регулировочные характеристики двигателя постоянного тока.

Однако наиболее хорошие регулировочные свойства синхронный двигатель приобретает не при дискретном, а при непрерывном контроле положения ротора и отслеживании равенства угла $\phi = 90^\circ$, тем самым формируя синусоидальное значение тока в каждой фазе. В этом случае двигатель имеет самые высокие энергетические характеристики.

Примером синхронных вентильных двигателей являются двигатели серий: ДВУ (на магнитах из феррита-стронция); 2ДВУ (на редкоземельных магнитах); 3ДВУ (дисковые на редкоземельных магнитах).

Максимальный допустимый момент этих двигателей равен пятикратному номинальному моменту.

Все двигатели серии ДВУ имеют пристраиваемый комплексный датчик типа ПДФ-8 или ПДФ-9, включающий в себя бесколлекторный тахогенератор, бесконтактный датчик положения ротора и датчик положения или встроенный датчик аналогичного назначения. Имеется модификация двигателей со встроенным электромагнитным тормозом.

Технические характеристики и геометрические параметры двигателей серии ДВУ приведены в табл. 2.3.

Следует отметить новое направление в конструктивном исполнении двигателей: проектирование и создание двигателей для непосредственного встраивания в механизм, а не принятого универсального присоединения к механизму. В состав таких двигателей не входят вал, опорные щиты и подшипники, что существенно упрощает конструкцию преобразователя движения.

В качестве примера могут быть приведены вентильные бесконтактные двигатели серии ДБМ (рис. 2.1). Они имеют плоскую встраиваемую конструкцию из статора 1 и ротора 2 и предназначены для работы в шаговом и регулируемом режимах.

Таблица 2.3

Технические характеристики и размеры синхронных двигателей серии ДВУ

Тип двигателя	Номинальная мощность P_n , Вт	Номинальный момент T_n , Нм	Номинальная частота вращения n_n , об/мин	Момент инерции ротора $J_{дв} \times 10^{-3}$, кгм ²	Длина L , мм	Максимальный диаметр корпуса D , мм	Масса m , кг
2 ДВУ55М	0,07	0,12	6000	0,0089	140	55	0,6
2 ДВУ55	0,13	0,21	6000	0,0157	165	55	0,9
2 ДВУ85М	0,2	0,36	6000	0,069	200	85	1,5
2 ДВУ85	0,3	0,72	4000	0,123	230	85	2,5
2 ДВУ115А	0,75	1,8	4000	0,31	270	115	5
2 ДВУ115S	0,9	2,9	3000	0,42	290	115	6
2 ДВУ115М	1,1	3,8	3000	0,52	310	115	7
2 ДВУ115L	1,75	5,6	3000	0,73	350	115	9
ДВУ165S	2,3	11	2000	3,9	439	165	16
ДВУ165М	3,0	14	2000	5,1	464	165	19

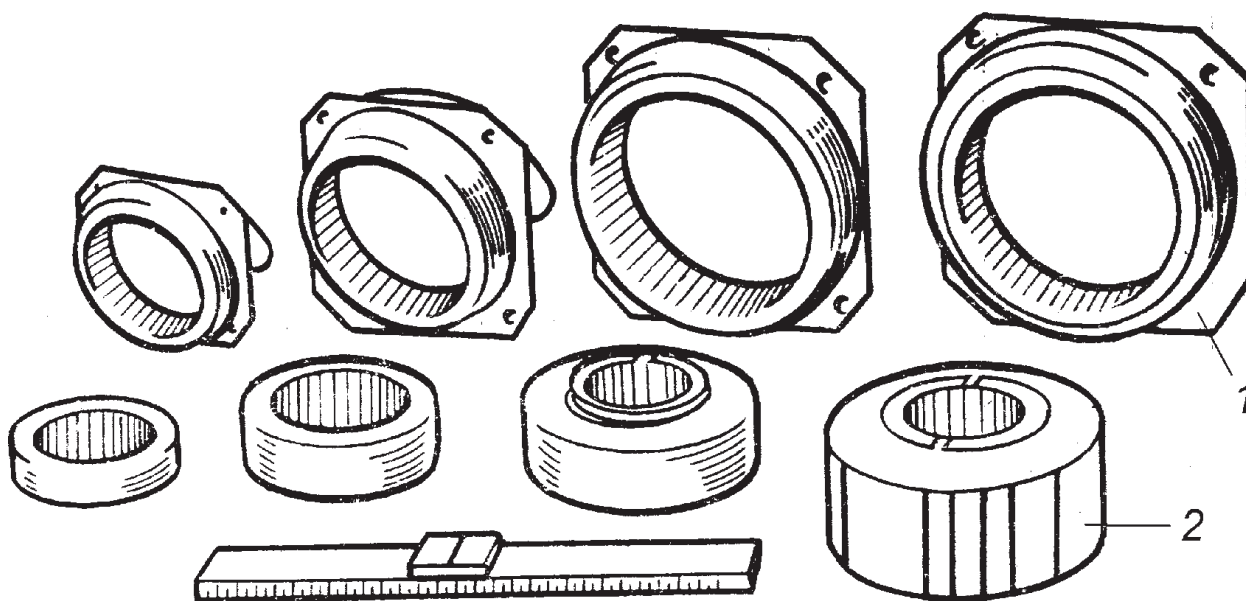


Рис. 2.1. Типоряд электродвигателей ДБМ

Подобное исполнение обеспечивает пакетирование для увеличения требуемого момента, т. е. конструкция двигателя в этом случае представляет собой пакет синхронных машин с общим датчиком положения ротора.

Условное обозначение двигателя серии ДБМ, например, ДБМ- 63—0,06—3—2, расшифровывают следующим образом: ДБМ — двигатель бесконтактный моментный;

63 — внешний диаметр корпуса, мм; 0,06 — номинальный момент, Нм; 3 — номинальная частота вращения, тыс. об/мин; 2 — число фаз.

Двигатели серии ДБМ спроектированы для работы с малыми скоростями и большими моментами и обладают рядом преимуществ по сравнению с обычными бесконтактными двигателями: повышенным ресурсом работы; большим отношением вращающего момента к моменту инерции ротора, что обеспечивает высокое быстродействие; высокой точность отработки угла поворота из-за отсутствия упругих связей и люфтов. Применение таких двигателей в ММ позволяет во многих случаях отказаться от преобразователя движения.

В большинстве случаев двигатели серии ДБМ используют в режиме бесконтактной машины постоянного тока.

В качестве датчика положения ротора в ММ с двигателем серии ДБМ используют бесконтактный синусно-косинусный вращающийся трансформатор типа редуктосин.

Технические характеристики и геометрические параметры двигателей серии ДБМ приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Технические характеристики и размеры двигателей серии ДБМ

Тип двигателя	Номинальный момент T_n , Нм	Статический синхронизирующий момент T_c , Нм	Частота вращения холостого хода $n_{хх}$, об/мин	Пусковой ток фазы I , А	Предельный ток обмотки статора I_n , А	Момент инерции ротора $J_{дв} \times 10^{-3}$, кгм ²	Длина L , мм	Диаметр корпуса D , мм	Диаметр вала d , мм	Масса m , кг
Статор пазовый										
ДБМ50—0,04—2—2	0,04	0,080	2440	0,84	5	0,0055	30	50	12	0,2
ДБМ50—0,04—4—2	0,04	0,157	4880	3,25	10	0,0055	30	50	12	0,2
ДБМ70—0,16—1—2	0,16	0,39	987	1,62	10	0,07	34	70	23	0,35
ДБМ70—0,16—2—2	0,16	0,77	1975	6,38	20	0,07	34	70	23	0,35
ДБМ100—0,4—0,6—2	0,4	0,84	690	2,45	15	0,27	33	100	48	0,6
ДБМ100—0,4—1,2—2	0,4	1,67	1390	9,80	30	0,27	33	100	48	0,6
ДБМ120—1—0,2—2	1	1,19	240	1,25	12,5	1,0	42	120	60	1,3
ДБМ120—1—0,4—2	1	2,38	485	5,00	25	1,0	42	120	60	1,3

Окончание табл. 2.4

Тип двигателя	Номинальный момент T_n , Нм	Статический синхронизирующий момент T_c , Нм	Частота вращения холостого хода $n_{хх}$, об/мин	Пусковой ток фазы I_p , А	Предельный ток обмотки статора I_{π} , А	Момент инерции ротора $J_{дв} \times 10^{-3}$, кгм ²	Длина L , мм	Диаметр корпуса D , мм	Диаметр вала d , мм	Масса m , кг
ДБМ120—1—0,8—2	1	4,47	970	18,00	50	1,0	42	120	60	1,3
ДБМ120—1,6—0,4—3	1,6	4,2	473	8,1	45	1,5	52	120	60	1,8
ДБМ150—4—0,3—2	4	6,7	323	9,6	60	3,0	55	150	72	3,0
ДБМ150—4—0,6—2	4	13,1	646	37,5	120	3,0	55	150	72	3,0
ДБМ150—4—1,5—3	4	47,3	1750	32,0	320	3,0	55	150	72	3,0
ДБМ185—6—0,2—2	6	11,5	195	10,2	60	9,0	60	185	66	5,4
ДБМ185—6—0,4—2	6	23,1	390	41,0	120	9,0	60	185	66	5,4
ДБМ185—16—0,15—2	16	28,0	143	18,4	110	15	85	185	66	9,2
ДБМ185—16—0,3—2	16	56,0	286	73,8	220	15	85	185	66	9,2
Статор гладкий										
ДБМ40—0,01—4,5—3	0,01	0,026	4570	0,48	1,25	0,0055	26	40	12	0,12
ДБМ40—0,01—9—3	0,01	0,051	9150	1,93	2,5	0,0055	26	40	12	0,12
ДБМ63—0,06—3—2	0,06	0,13	2950	1,63	10	0,07	28	63	23	0,32
ДБМ85—0,16—2—2	0,16	0,305	2040	2,70	20	0,27	36	85	48	0,54
ДБМ85—0,16—2—3	0,16	0,36	1900	2,70	7,5	0,27	36	85	48	0,54
ДБМ105—0,4—0,75—3	0,4	0,92	965	3,46	9,0	1,0	38	105	60	0,98
ДБМ105—0,6—1—2	0,6	1,62	917	6,30	30	1,5	46	105	60	1,3
ДБМ105—0,6—0,5—3	0,6	1,17	600	2,70	8,75	1,5	46	105	60	1,3
ДБМ130—1,6—0,5—2	1,6	1,74	457	3,37	40	3,0	54	130	72	2,5

1.2. Электродвигатели линейного перемещения

Принцип действия и конструктивная схема двигателя линейного перемещения, или линейного двигателя, известны давно.

Прототипом линейного двигателя является электромагнитная система, состоящая из металлического сердечника-магнита и статорной обмотки (рис. 2.2). При подаче тока определенной полярности в статорную обмотку сердечник-магнит смещается в ту или иную сторону. Между источником энергии и подвижным звеном нет промежуточных элементов. Передача энергии осуществляется через воздушный зазор между статорной обмоткой и подвижным звеном. На этом принципе действия уже много лет работают различные системы электроавтоматики, электротормозов, защиты и т. п.

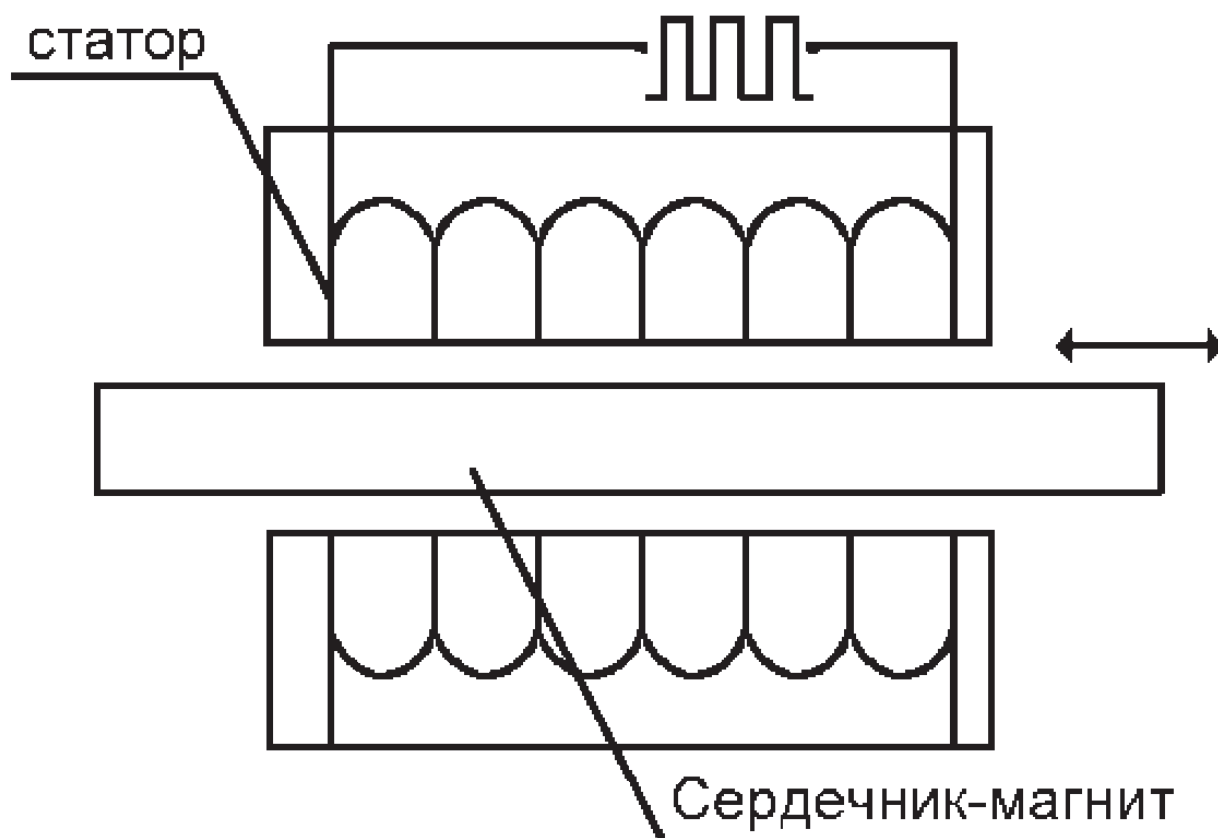


Рис. 2.2. Схема простейшего линейного электродвигателя

Достоинствами таких систем являются простота конструкции, быстрота срабатывания, почти мгновенный останов и реверс, большие осевые усилия, простота настройки и применения.

Для идеальной работы им не хватало только возможности регулировать скорость подвижного звена, но без этого сконструировать линейный двигатель было невозможно.

Потребовались многие годы работы ученых и конструкторов в разных странах, прежде чем был достигнут успех. В Японии впервые был успешно использован линейный привод как движитель сверхскоростных поездов. Попытки создания линейных двигателей для металлообрабатывающих станков приводили к возникновению сильных магнитных полей, нагреву двигателя, неравномерности движения подвижного звена. И только на пороге третьего тысячелетия японская компания *SODICK Co., Ltd.* первой сумела решить сложнейшие конструкторско-технологические задачи, позволившие приступить к серийному выпуску станков (пока в основном электроэрозионных) с принципиально новыми линейными двигателями, в которых решены все проблемы по обеспечению равномерности движения подвижного звена

станка со сверхвысокой точностью, с широким диапазоном регулирования скорости, громадными ускорениями, мгновенным остановом и реверсом, простотой обслуживания и наладки и др.

Можно представить себе «получение» линейного двигателя из двигателя углового движения (рис. 2.3) в результате продольного разреза статора и развертки его в плоскость. Ротор также следует выпрямить. В результате движение «ротора» становится линейным. Обратная свертка линейного двигателя (рис. 2.4) относительно его поперечной оси приводит к появлению линейного двигателя иного типа.

Следует отметить, что двигаться может либо «ротор», либо «статор». Все зависит от того, что закреплено. Если закреплен «статор», то движется «ротор», при закреплении «ротора» движется «статор».

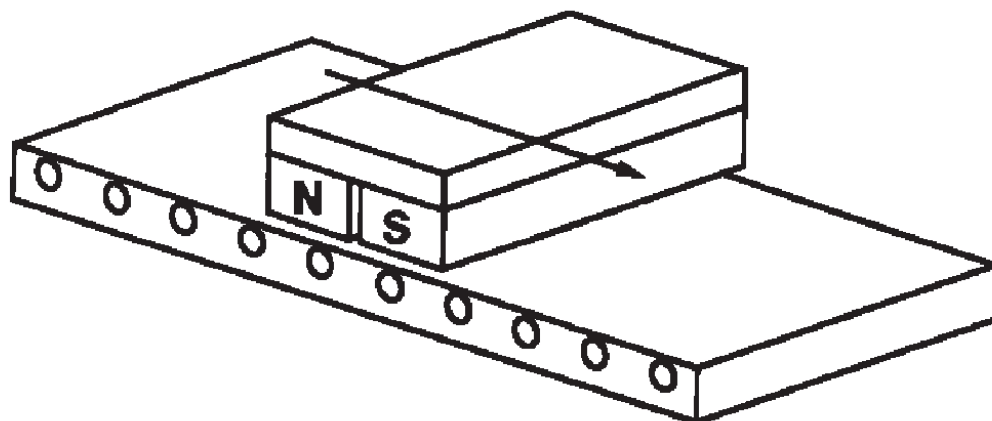
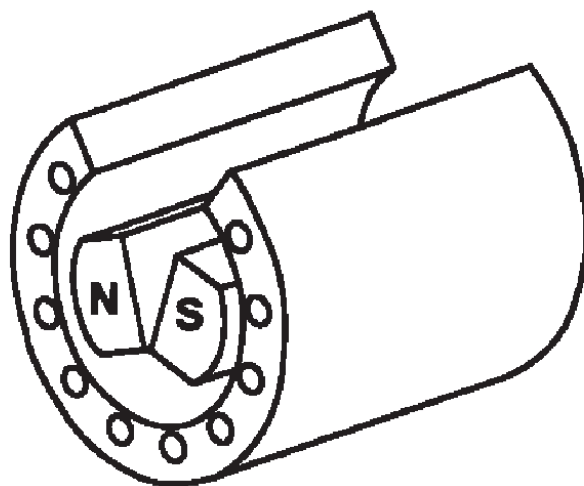
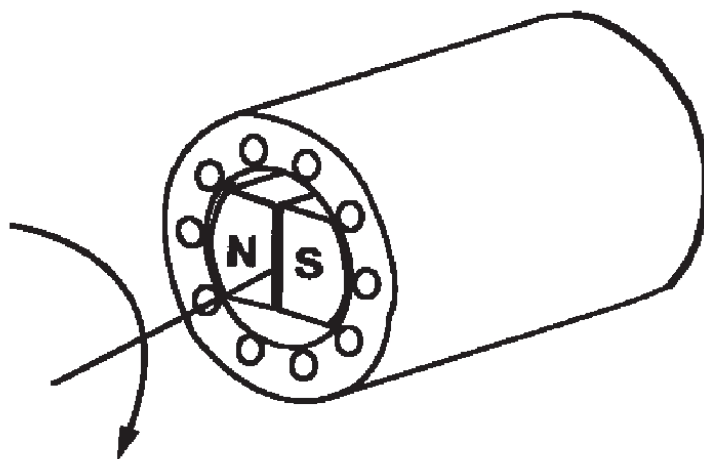


Рис. 2.3. Получение линейного двигателя разверткой двигателя вращательного движения

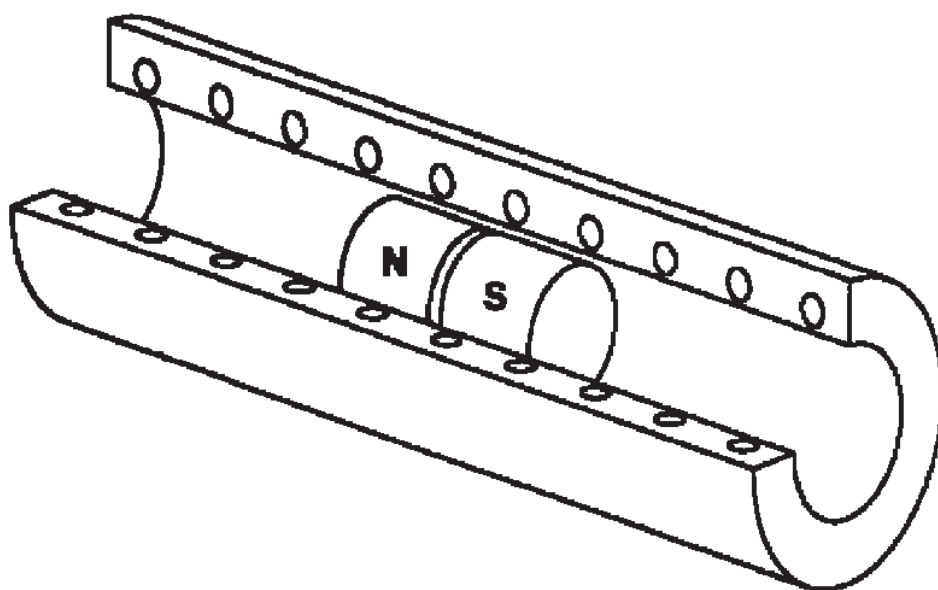
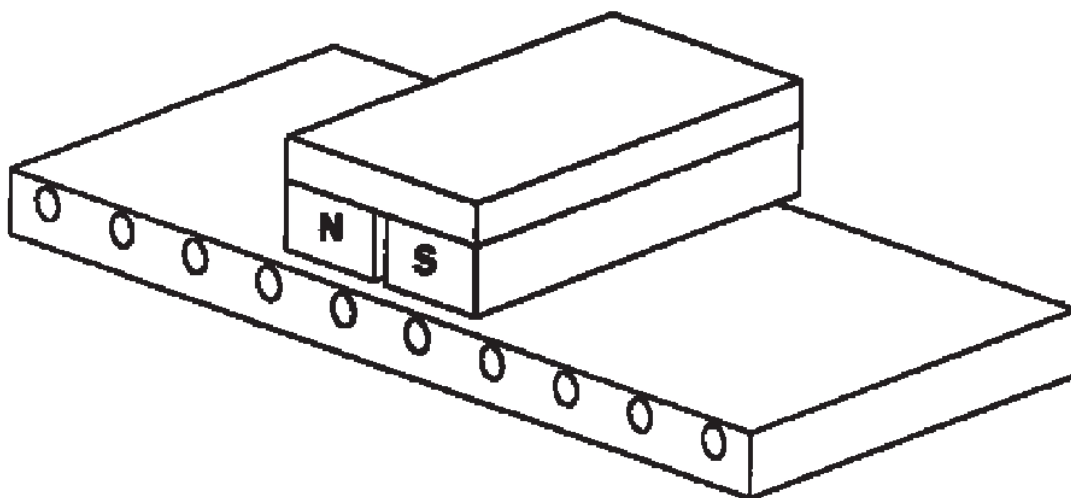


Рис. 2.4. Получение линейного двигателя сверткой относительно поперечной оси

Таким образом, линейный двигатель состоит из двух основных элементов: электромагнитного «статора» 1 и плоского «ротора» 2 (рис. 2.5, а, б) с воздушным зазором между ними. Для определения текущих координат подвижного звена на неподвижном звене устанавливают измерительную линейку с высокой дискретностью (0,1мм).

«Ротор» 2 (рис. 2.5, б) состоит из ряда прямоугольных сильных (редкоземельных) постоянных магнитов 3, закрепленных под определенным фиксированным углом на тонкой плите 4 из специальной высокопрочной керамики с малым (в два раза меньше, чем у гранита) коэффициентом температурного расширения. Применение керамики с системой охлаждения и использование высокоэффективной шестифазной импульсной системы управления (система *SMC*) позволило предотвратить перегрев, избежать сильных магнитных полей и добиться точного и равномерного движения подвижного звена во всем диапазоне скоростей и нагрузок.

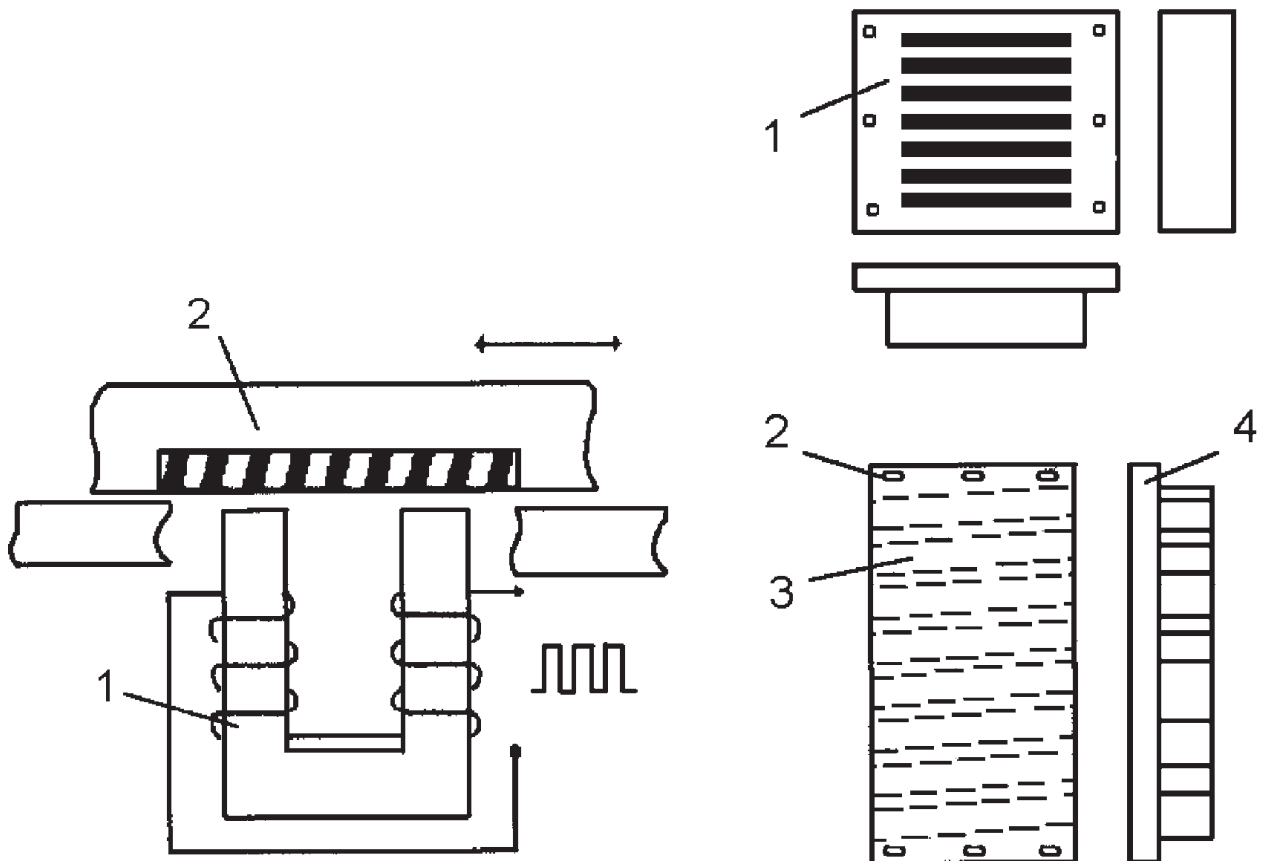


Рис. 2.5. Принципиальное устройство линейного двигателя

Компания *SODICK* серийно выпускает широкую гамму линейных двигателей со следующими характеристиками: ходом подвижного звена 100...2220 мм, максимальной скоростью перемещения 3 м/с, ускорением до 20g при точности исполнения заданных перемещений 0,1 мкм, практически мгновенной остановкой и реверсом, моментальной реакцией на команды системы управления. Повышение температуры двигателя при работе по сравнению с температурой помещения не превышает 2 °С.

Для увеличения мощности на один рабочий орган устанавливают несколько линейных двигателей. Так, на электроэрозионных прошивочных станках фирмы

SODICK для вертикального перемещения рабочего органа установлены два линейных двигателя, конструкция которых иллюстрируется рис. 2.6.

В настоящее время многоцелевые станки с линейными двигателями производят многие фирмы (табл. 2.5).

Рассмотрим линейный двигатель *Iron Core Brushless Linear Servo Motor* фирмы *Baldor Electric Company*. На рис. 2.7 изображен его внешний вид, конструктивная схема — на рис. 2.8, геометрические параметры приведены в табл. 2.6.

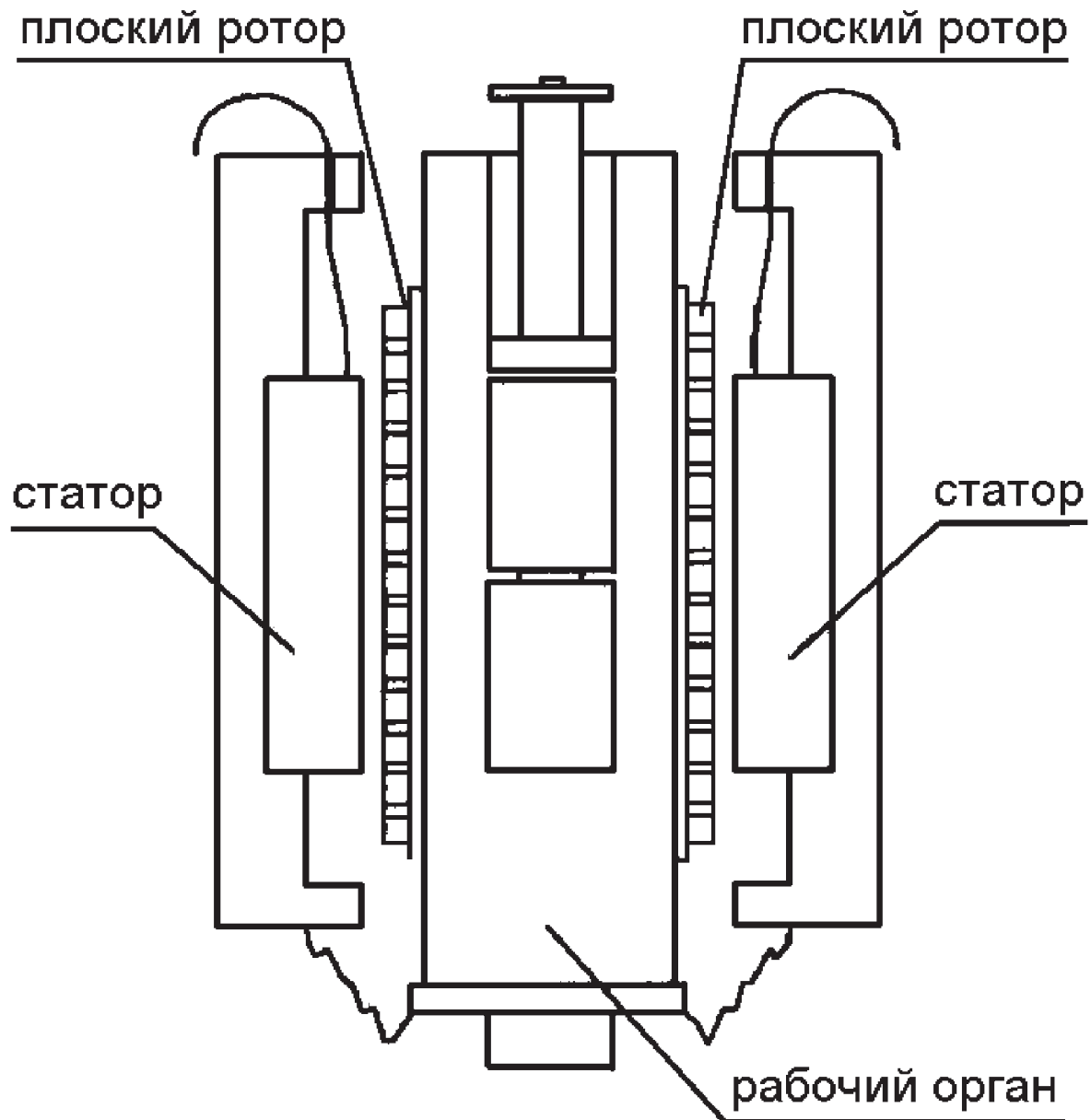


Рис. 2.6. Конструкция линейного двигателя *SODICK Co., Ltd.*

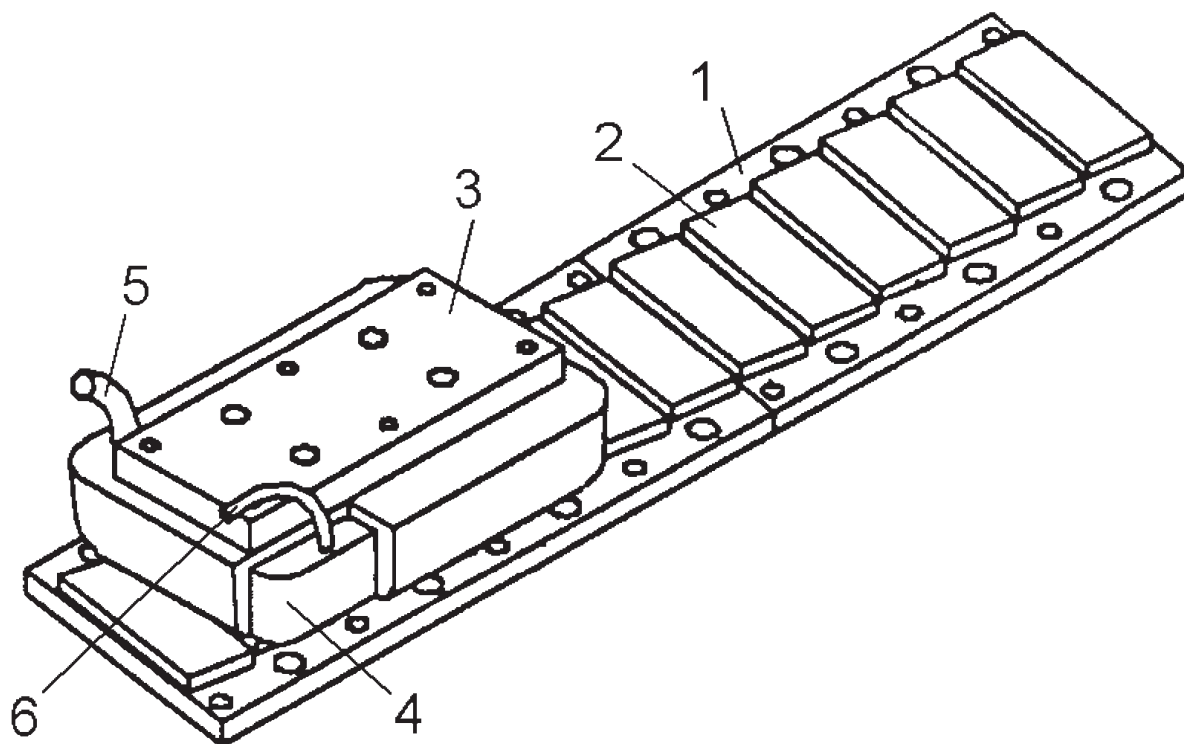


Рис. 2.7. Линейный двигатель *Iron Core Brushless Linear Servo Motor*

Таблица 2.5

Производители многоцелевых станков и линейных двигателей

Характеристики	Фирма				
	<i>ExCell-O</i>	<i>Grob-Werks</i>	<i>Thyssen Production Systems</i>	<i>Renault Automation</i>	<i>Ingersoll Europe</i>
Модель станка	<i>XHC 240, XHC 241</i>	<i>BZ 600 L</i>	<i>Specht 500L</i>	<i>Renault Automation</i>	<i>Ingersoll Europe</i>
Перемещения по осям координат, мм:					
X	630	800	630	800	630
Y	630	630	630	700	630
Z	710	550	500	400	600
Скорость перемещения по осям координат, м/с:					
X	2	1,5	1,7	1,3	1,3
Y	2	1,75	1,7	1,3	1,3
Z	2	1,75	2,0	1,3	1,3
Ускорения по осям координат, м/с ² :					
X	14	8	14	10	10
Y	14	12	14	10	10
Z	14	20	20	15	14,2
Фирма-изготовитель линейных двигателей	<i>Indramat</i>	<i>Krauss Maffel</i>	<i>Krauss Maffel</i>	<i>Krauss Maffel</i>	<i>GE Fanuc</i>
Устройство ЧПУ	<i>Indramat</i>	<i>Slemans</i>	<i>Slemans</i>	<i>Slemans</i>	<i>Indramat</i>

Двигатель состоит из направляющего устройства (ротора), представляющего собой тонкую стальную пластину 1 с наклеенными на ней под определенным углом прямоугольными редкоземельными постоянными магнитами 2, и подвижного звена (статора) 3, состоящего из группы катушек, залитых теплопроводящей эпоксидной смолой, датчика Холла 4, датчика 5, подводящего к катушкам, и кабеля 6 датчика Холла. Направляющее устройство собирают из секций длиной D, число которых определяется необходимой длиной двигателя.

Линейный двигатель *Cog-free Brushless Linear Servo Motor* фирмы *Baldor Electric Company* изображен на рис. 2.9, 2.10. Он состоит из направляющего устройства (ротора), представляющего собой тонкий U -образный стальной профиль 1 с наклеенными на его боковые поверхности прямоугольными редкоземельными постоянными магнитами 2 и подвижного звена (статора) 3, устроенного аналогично рассмотренному выше линейному двигателю *Iron Core Brushless*. Геометрические параметры линейного двигателя даны в табл. 2.7.

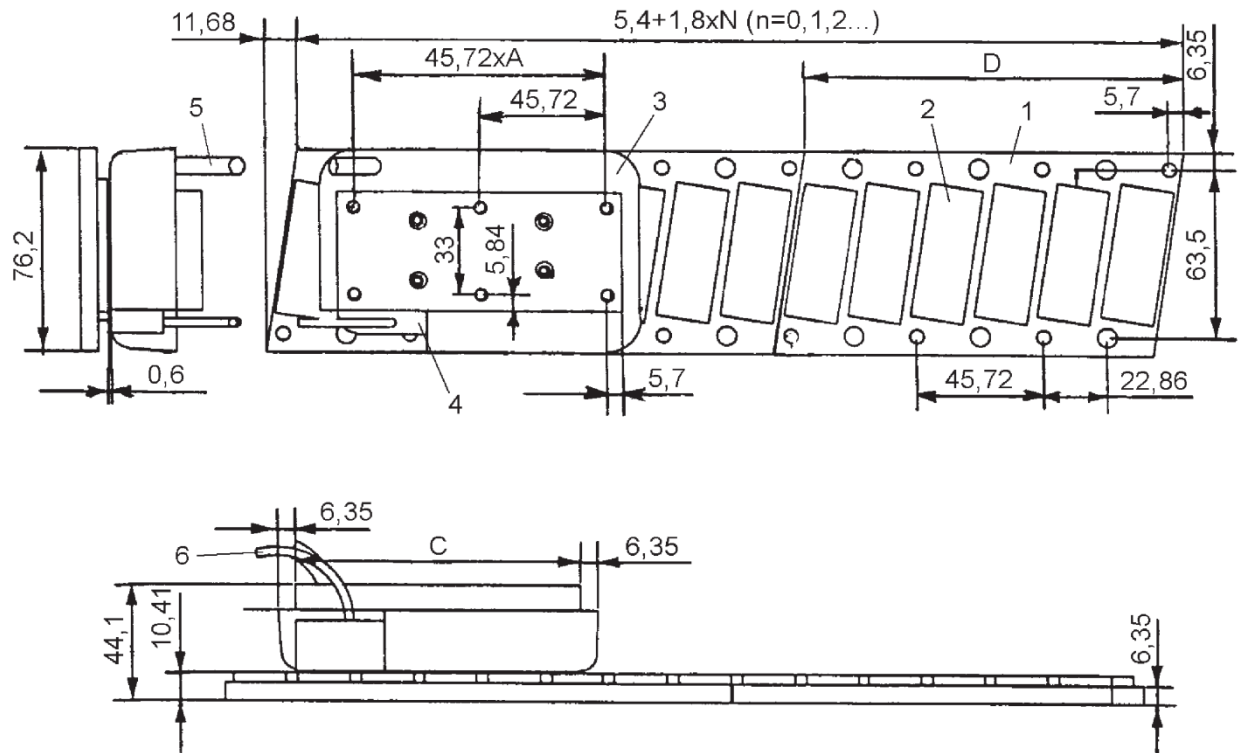


Рис. 2.8. Конструкция двигателя *Iron Core Brushless Linear Servo Motor*

Таблица 2.6

Геометрические параметры 3-х фазной электрической катушки (*LMBL*) и магнитного направляющего устройства (*LTBT*), мм

Обо- зна- чение пара- метра	Тип катушки и направляющего устройства											
	<i>LMBL</i> 02A	<i>LMBL</i> 04A	<i>LMBL</i> 06A	<i>LMBL</i> 08A	<i>LMBL</i> 10A	<i>LMBL</i> 12A	<i>LMBL</i> 14A	<i>LMBL</i> 16A	<i>LMBL</i> 18A	<i>LTBL</i> A5	<i>LTBL</i> A7	<i>LTBL</i> A18
	Параметры											
A	2	3	4	5	6	7	8	9	10	—	—	—
C	102,87	148,59	194,31	240,03	285,75	331,47	377,19	422,91	468,63	—	—	—
D	—	—	—	—	—	—	—	—	—	137,16	182,98	457,20

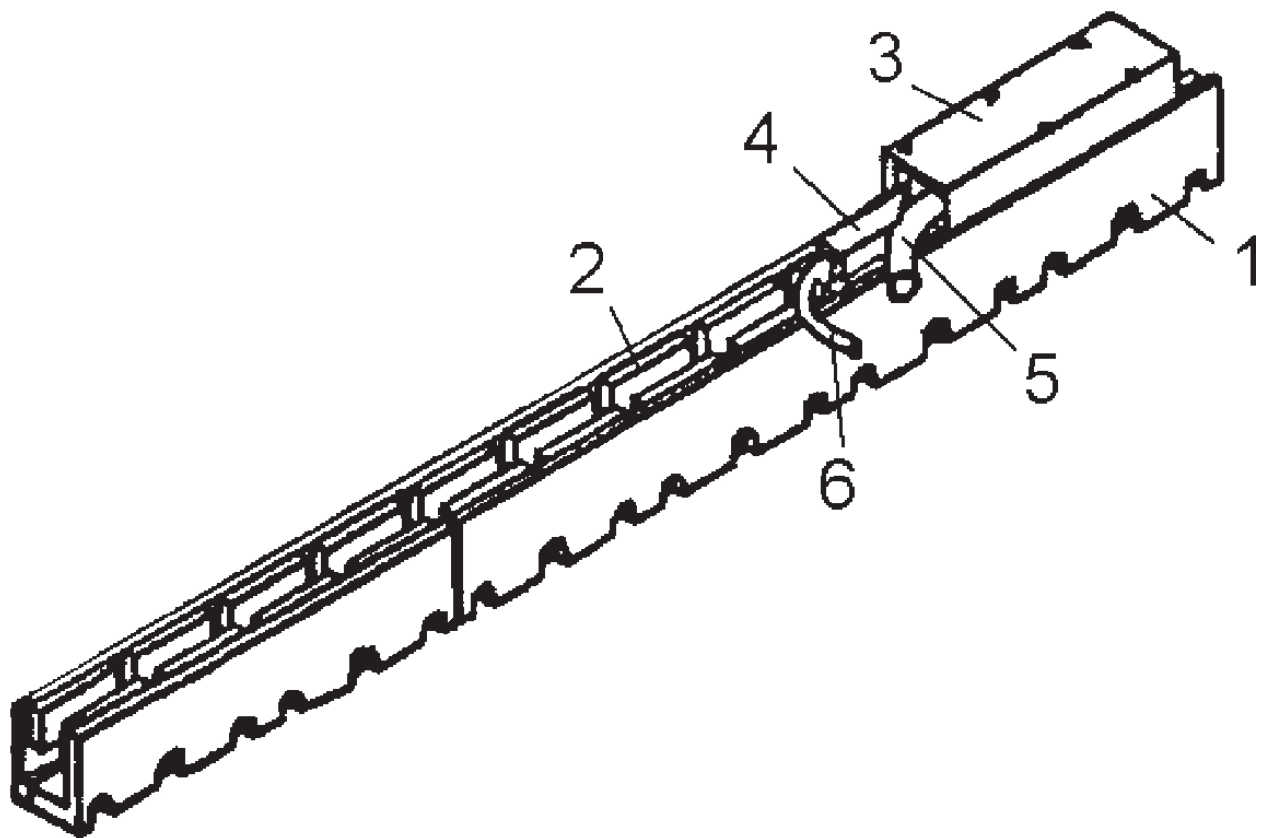


Рис. 2.9. Линейный двигатель *Cog-free Brushless Linear Servo Motor*

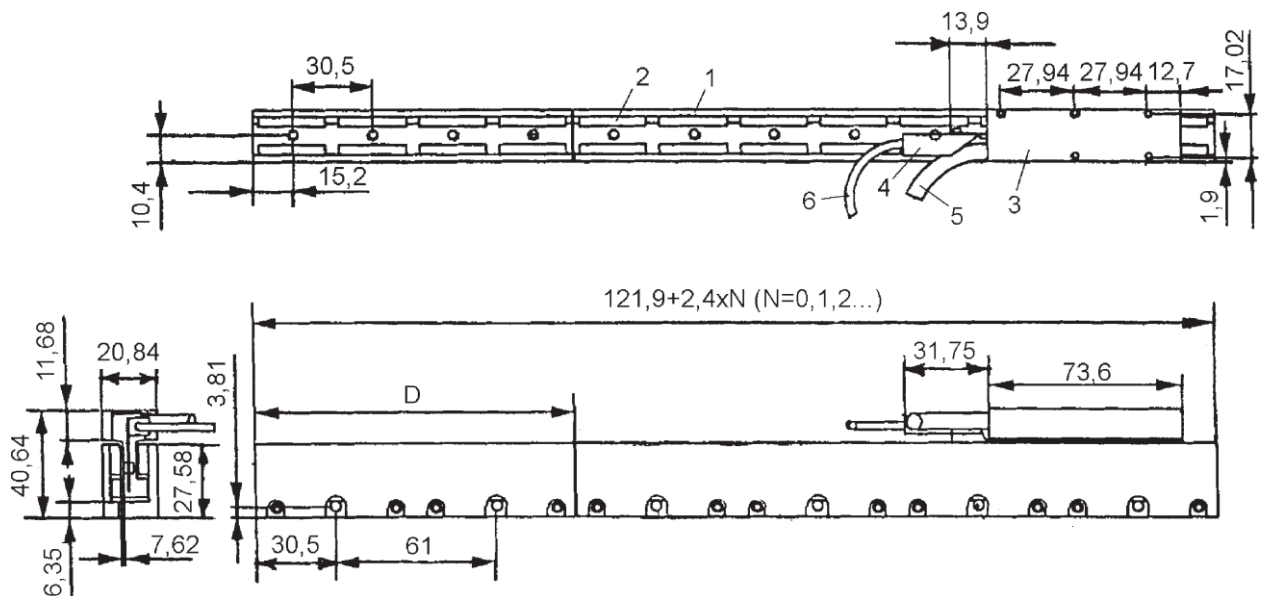


Рис. 2.10. Конструкция двигателя *Cog-free Brushless Linear Servo Motor*

Таблица 2.7

Геометрические параметры магнитного направляющего устройства (*LTCF*), мм

Обозначение параметра	Тип направляющего устройства				
	<i>LTCF-A4</i>	<i>LTCF-A8</i>	<i>LTCF-A9</i>	<i>LTCF-A12</i>	<i>LTCF-A24</i>
	Параметры				
<i>D</i>	121,9	182,9	243,8	304,8	609,6

2. Гидравлические двигатели

2.1. Классификация гидравлических двигателей объемного вытеснения

Гидродвигатели, использующие в рабочем процессе статическое давление жидкости, называются **двигателями объемного вытеснения**, а гидросистемы с ними — **объемным гидроприводом**.

Гидродвигатели, использующие в рабочем процессе динамическое давление жидкости, относятся к **турбомашинам**. Конструктивными элементами турбомашин, взаимодействующими с жидкостью, являются лопасти (лопатки), поэтому вместо термина «турбомашины» используют также термин «**лопастные гидромашины**».

Основные преимущества двигателей объемного вытеснения перед лопастными с точки зрения их применения в гидроприводе ММ следующие:

- «жесткая» характеристика (слабая зависимость потребляемого расхода жидкости от давления, т. е. от нагрузки);
- возможность обеспечения весьма малых, так называемых ползучих, скоростей рабочих органов;
- хорошая управляемость;
- слабая зависимость КПД от режима работы.

Преимущества лопастных гидродвигателей:

- ❖ высокая энергоемкость, обусловленная большей производительностью при равных размерах;
- ❖ относительная простота конструкции.

Очевидно, что преимущества двигателей объемного вытеснения гораздо более значимые. Применение именно этих гидромашин в ММ позволяет создавать малогабаритные высоконагруженные и высокоточные устройства.

Поэтому далее будут рассмотрены гидродвигатели объемного вытеснения, или, как их еще называют, **объемные гидромоторы**.

Классификация объемных гидромоторов иллюстрируется рис. 2.11.

По виду движения рабочего органа различают гидромоторы поступательного движения (**гидроцилиндры**) и вращательного движения.

Гидроцилиндры, способные развивать рабочие усилия как при прямом, так и при обратном движении, называются **гидроцилиндрами двустороннего действия** и могут быть выполнены с односторонним или двусторонним штоком.

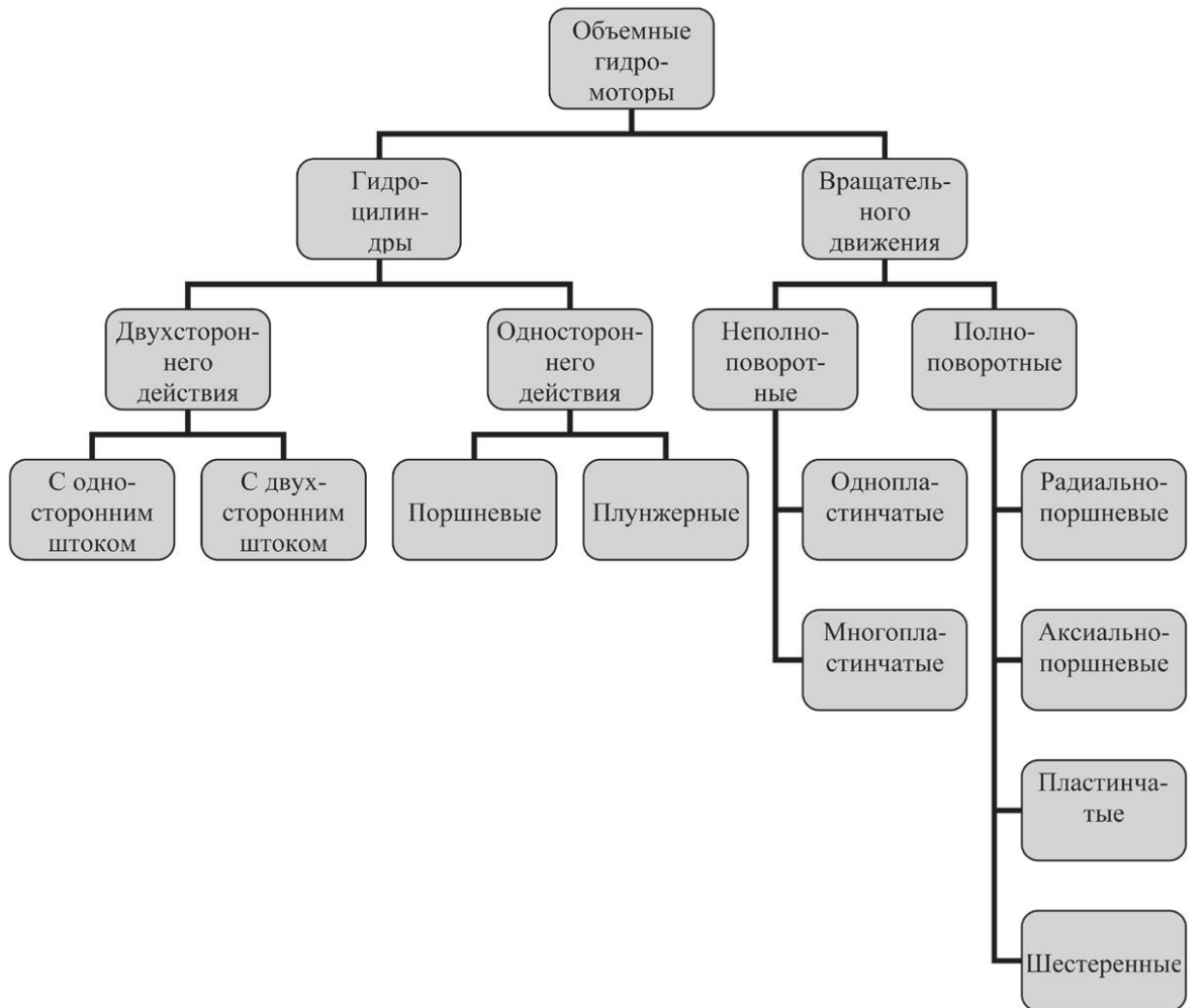


Рис. 2.11. Классификация гидродвигателей объемного вытеснения

Гидроцилиндры, предназначенные для создания усилия постоянного направления (в одном направлении ход **рабочий**, в обратном — **холостой**), называются **гидроцилиндрами одностороннего действия** и могут быть поршневыми или плунжерными.

Гидромоторы вращательного движения подразделяются на неполноповоротные (**моментные гидроцилиндры**) и полноповоротные, иначе называемые гидромоторами неограниченного вращения.

Моментные гидроцилиндры выполняют возвратно-вращательное движение на угол менее 360° . Они могут иметь ротор с одной или несколькими пластинами.

Полноповоротные гидромоторы, совершенно аналогично насосам объемного вытеснения, подразделяются на радиально- и аксиальнопоршневые, пластинчатые и шестеренные.

В дальнейшем под **гидромотором** будет подразумеваться именно гидродвигатель неограниченного вращения.

Следует указать на такое очень важное свойство гидромашин, как **обратимость**. Подача жидкости под высоким давлением в полость всасывания насоса приводит к вращению его ротора и созданию на его валу крутящего момента, величина которого определяется давлением жидкости, т. е. насос начинает работать как гидромотор. Поэтому конструкции насосов и гидромоторов одного и того же принципа действия имеют практически одинаковые основные элементы.

2.2. Гидравлические двигатели вращательного движения

Серийно выпускающиеся **радиально-поршневые гидромоторы** представляют собой достаточно сложные агрегаты; некоторые из них имеют собственную гидросистему, средства регулирования и реверсирования и т. п. Их массогабаритные показатели таковы, что применение этих гидромашин в ММ практически невозможно. Есть, однако, и среди радиально-поршневых гидромоторов очень интересные с этой точки зрения.

Следует, в частности, особо рассмотреть устройство радиальнопоршневого гидромотора многократного действия, иначе называемого высокомоментным гидромотором.

Схема высокомоментного гидромотора приведена на рис. 2.12.

Характерной особенностью его конструкции является статор, внутренняя поверхность которого спрофилирована таким образом, что поршень за один оборот ротора совершает несколько двойных ходов (в гидромоторе по рис. 2.12 таких двойных ходов четыре).

Пусть в общем случае число двойных ходов гидромотора равно m . Тогда расход жидкости, потребляемый такой гидромашинной, будет в m раз больше, чем гидромотором одинарного действия при тех же перемещениях и диаметрах поршней, во столько же раз выше — крутящий момент и меньше — угловая скорость ротора. А если принять во внимание, что при необходимости можно обеспечить $m = 20$, то

становится очевидной целесообразность применения высокомоментных гидромоторов в ММ с большими значениями крутящего момента и низкими частотами вращения выходного вала.

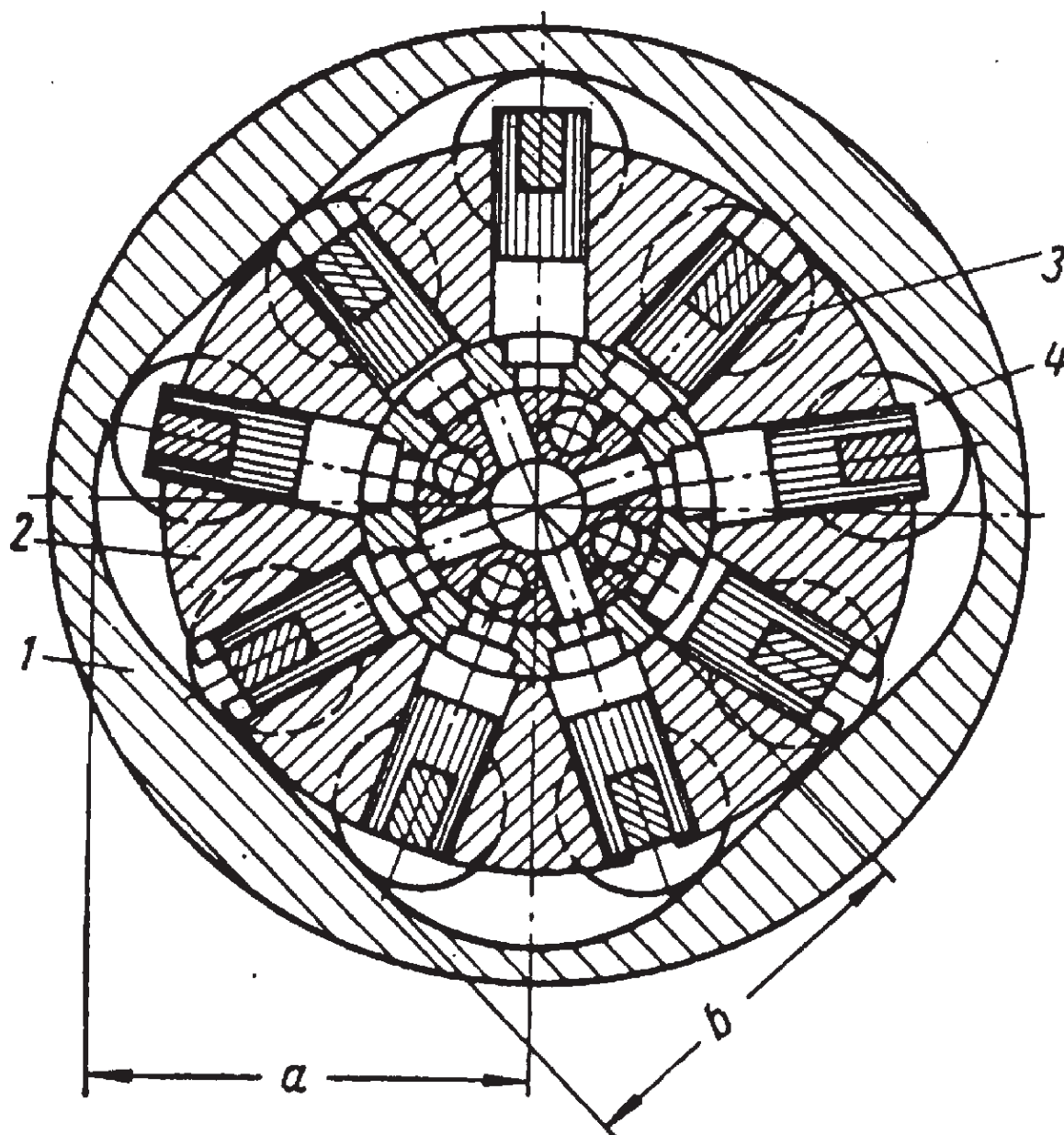


Рис. 2.12. Роторно-поршневой высокомоментный гидромотор:

1 — статор; 2 — блок цилиндров (ротор);
3 — поршень; 4 — ролик

Аксиально-поршневые гидромоторы более компактны и удобны для применения в ММ, чем радиально-поршневые, поэтому и используются они значительно чаще. В настоящее время предприятиями выпускается широкая номенклатура гидромоторов рассматриваемого типа на различные давления и расходы жидкости.

Принцип действия аксиально-поршневого гидромотора поясняется рис. 2.13.

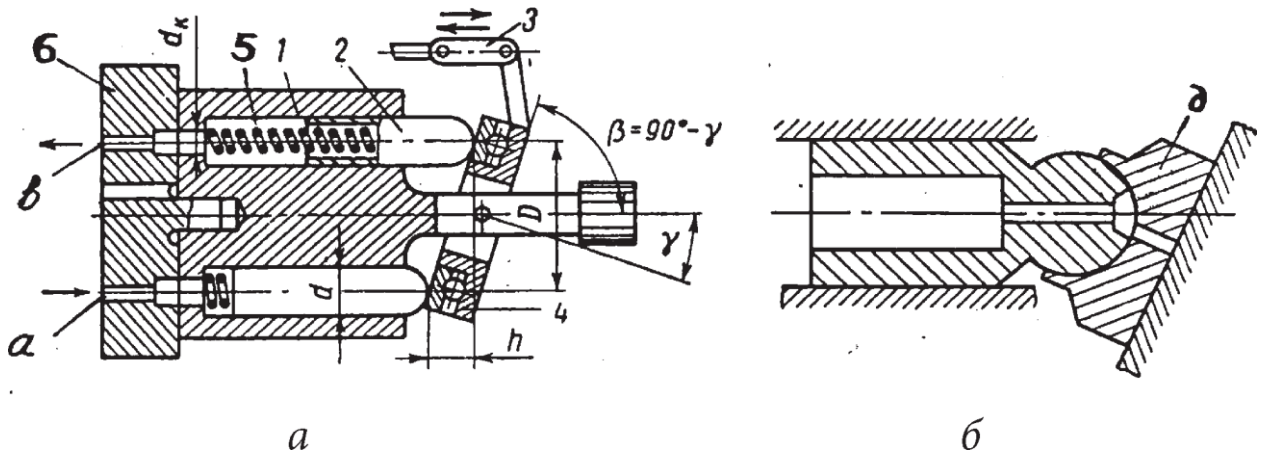


Рис. 2.13. Схема аксиально-поршневого гидромотора: а — конструкция; б — опорный башмак;

1 — ротор; 2 — поршень (плунжер); 3 — звено механизма качания наклонной шайбы 4; 5 — пружина; 6 — узел распределения жидкости; а — окно для подвода жидкости; б — сливное окно

При подаче жидкости из линии нагнетания через узел распределения 6 в окно а плунжер 2 нижнего цилиндра, контактирующий с наклонной шайбой 4 посредством упорного подшипника качения, выдвигается за половину оборота на расстояние h из цилиндра. За последующую половину оборота ротора плунжер снова вдвигается в цилиндр, и жидкость через узел распределения и окно б вытесняется в сливную линию.

Пружины 5 обеспечивают постоянный контакт плунжеров с упорным подшипником наклонной шайбы.

Механизм качания (3 — его концевое звено) изменяет угол γ наклона шайбы 4, причем соответственно изменяется ход плунжера h по закону

$$h = D \operatorname{tg} \gamma, \quad (2.1)$$

где D — диаметр окружности, на которой расположены плунжеры в роторе.

Очевидно, что поворотом шайбы 4 против часовой стрелки можно получить $h = 0$, и следовательно, остановку гидромотора, а затем и реверсирование направления вращения ротора.

Опорный башмак (рис. 2.13, б) позволяет заменить точечный контакт плунжеров с поверхностью опорной шайбы поверхностным контактом (плунжера с башмаком — по сферической поверхности, башмака с наклонной шайбой — по плоскости) и таким образом снизить интенсивность износа контактирующих поверхностей.

В качестве примера в табл. 2.8 приведены основные параметры серийно выпускаемых аксиально-поршневых нерегулируемых гидромоторов ряда Г15—2 [7].

Таблица 2.8

Основные параметры аксиально-поршневых гидромоторов Г15—2

Параметр	Г15— 21Н	Г15— 22Н	Г15— 23Н	Г15— 24Н	Г15— 25Н
Номинальный крутящий момент, Нм	9,4	16,7	33,3	66,7	133
Номинальный расход, дм ³ /мин	10,8	19,2	38,4	76,8	154
Номинальная мощность, кВт	0,96	1,7	3,4	6,8	13,6
Масса, кг	4,5	7,0	12	20	40

Примечания: 1. Номинальная частота вращения 960 об/мин. 2. Номинальное давление 6,3 МПа. 3. Полный КПД 0,87.

Пластинчатые гидромоторы в ММ составляют определенную конкуренцию гидромоторам аксиально-поршневым. Поэтому интересно сравнить между собой эти два типа по конструктивной сложности и рабочим параметрам.

Схема пластинчатого гидромотора двойного действия показана на рис. 2.14.

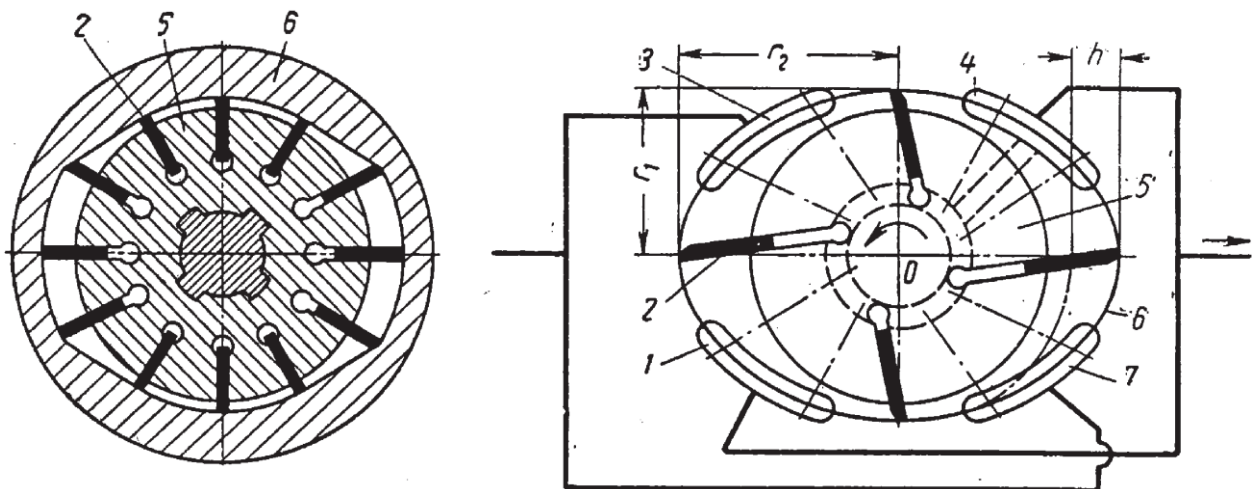


Рис. 2.14. Пластинчатый гидромотор двойного действия: 1,4 — сливные окна; 2 — пластины; 3,7 — подающие окна; 5 — ротор; 6 — статор

Поверхность статора 6 спрофилирована таким образом, что при вращении ротора 5 против часовой стрелки жидкость под давлением поступает в насос через окна 3 и 7 и выходит в сливную линию через окна 1 и 4. Силы давления жидкости на ротор со стороны полостей подачи взаимно уравниваются.

Недостаток таких гидромоторов — невозможность их регулирования.

Основные рабочие параметры гидромоторов Г16—1... М даны в табл. 2.9.

При сравнении параметров пластинчатых и поршневых гидромашин обращает на себя внимание существенно меньший объемный КПД пластинчатых гидромоторов. Причина этого состоит в невозможности предотвращения перетечек жидкости между пластинами и поверхностью расточки статора, между пластинами и боковыми стенками.

К достоинствам пластинчатых гидромоторов следует отнести их более простую конструкцию.

Об эксплуатационных преимуществах аксиально-поршневых гидромоторов перед пластинчатыми говорят следующие данные.

Основные параметры пластинчатых гидромоторов Г16—1... М

Таблица 2.9

Основные параметры пластинчатых гидромоторов Г16—1... М

Параметр	Г16— 11М	Г16— 12М	Г16— 13М	Г16— 14М	Г16— 15М
Номинальный крутящий момент, Нм	6,2	12,3	24,5	49	98
Номинальный расход, дм ³ /мин	14	19,4	37,1	67,2	129
Номинальная мощность, кВт	0,6	1,2	2,4	4,9	9,8
Номинальное давление, МПа	8			7	
Полный КПД	0,5	0,63	0,69	0,73	0,76
Масса, кг	6,3		10	24	

Примечание. Номинальная частота вращения 960 об/мин.

По номинальному расходу близки гидромоторы Г15—23Н и Г16— 13М, но Г15—23Н развивает в 1,4 раза большие крутящий момент и мощность, имеет полный КПД в 1,26 раза выше, причем масса его только в 1,2 раза больше. К этому следует добавить, что Г15—23Н способен работать при перепаде давлений 12,5МПа, а Г16—13М — 8МПа, и уровень шума у Г15—23Н на 12дБ (А) ниже, чем у Г16—13М.

Разумеется, такого «экспресс-сравнения» недостаточно, чтобы однозначно утверждать о превосходстве аксиально-поршневых гидромоторов. В каждом конкретном случае необходимо рассматривать в совокупности весь ММ и сравнивать варианты по стоимости, габаритам и пр.

В конструкциях ММ находят широкое применение **неполноповоротные гидромоторы**, или моментные гидроцилиндры.

Схема моментного гидроцилиндра с одной пластиной показана на рис. 2.15. Он состоит из корпуса 1 и ротора, представляющего собой втулку 2 с пластиной 3. Кольцевая полость между внутренней поверхностью корпуса и втулкой разделена переключкой 4 с уплотнительным элементом 5.

При подаче жидкости под давлением p_p в верхний канал пластина 3 с втулкой 2 поворачивается по часовой стрелке. Максимальный угол поворота обычно равен 270° .

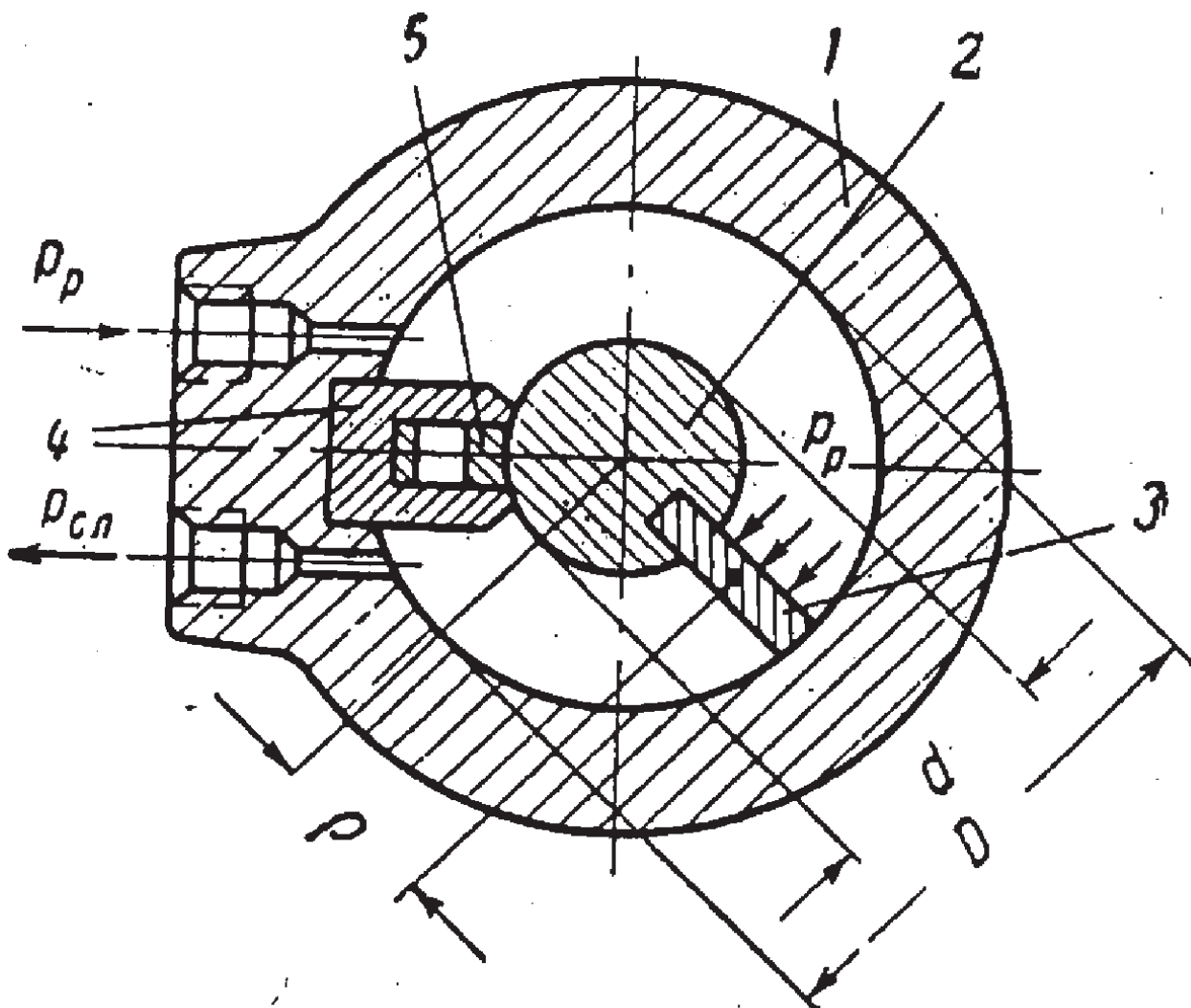


Рис. 2.15. Моментный гидроцилиндр:

1 — корпус; 2 — втулка; 3 — пластина;

4 — переключка; 5 — уплотнительный элемент

Развиваемый моментным гидроцилиндром крутящий момент равен

$$T = (p_p - p_{сл}) A_{пл} \rho \eta_{мех}, \quad (2.2)$$

где $p_{сл}$ — давление жидкости в сливном канале; $A_{пл}$ — площадь рабочей поверхности пластины; ρ — плечо приложения силы давления.

Площадь рабочей поверхности пластины

$$A_{пл} = (D - d)b/2, \quad (2.3)$$

где b — ширина пластины по оси цилиндра;
плечо силы давления

$$\rho = (D + d)/4, \quad (2.4)$$

поэтому для $p_{сл} \approx 0$

$$T = 0,125 p_p (D^2 - d^2) b \eta_{мех}. \quad (2.5)$$

Угловая скорость ротора

$$\omega = Q \eta_{об} / (A_{пл} \rho) = 8Q[(D^2 - d^2)b]^{-1} \eta_{об}. \quad (2.6)$$

В отличие от гидроцилиндров поступательного движения, в моментных гидроцилиндрах $\eta_{об} < 1$, так как достаточно эффективно уплотнить зазоры между пластиной, корпусом и боковыми стенками не удастся.

Многопластинчатые моментные гидроцилиндры содержат две или три пластины и развивают соответственно большие крутящие моменты, но меньшие угловые скорости (при равных расходах жидкости), причем максимальный угол поворота соответственно уменьшается.

Для многопластинчатых гидроцилиндров формулы (2.5) и (2.6) принимают следующий вид:

$$T = 0,125p_p z(D^2 - d^2) b \eta_{\text{мех}}; \quad (2.7)$$

$$\omega = 8Q[(D^2 - d^2)bz]^{-1} \eta_{\text{об}}. \quad (2.8)$$

В (2.7) и (2.8) z — число пластин.

Основные технические параметры серийно выпускаемых моментных гидроцилиндров ДПГ приведены в табл. 2.10 [8].

Таблица 2.10

Основные параметры моментных гидроцилиндров ДПГ

Параметр	ДПГ16	ДПГ63	ДПГ125	ДПГ200
Номинальный крутящий момент, Нм	160	630	1250	2000
Расход при максимальной угловой скорости, дм ³ /мин	1,6	6,3	12,5	20
КПД:				
полный	0,9	0,92	0,89	0,9
объемный	0,94	0,97	0,98	0,98
Масса, кг	4	14	40	45

Примечания. 1. Угловая скорость максимальная 3,14 с⁻¹. 2. Номинальное давление 16 МПа. 3. Угол поворота 270°.

Шестеренные гидромоторы имеют наиболее простую конструкцию из всех машин объемного вытеснения.

На роторе гидромотора закреплена шестерня 1 (рис. 2.16), в зацеплении с которой находится шестерня 4. Зазоры между вершинами зубьев шестерен и внутренней поверхностью корпуса 3 весьма малы. Жидкость под давлением поступает в полость 5, приводя зубчатую пару во вращение. Из полости 5 в полость 2 жидкость переносится во впадинах между зубьями, ограниченных поверхностью корпуса и двумя (передней и задней) боковыми крышками.

Об одном из достоинств шестеренных гидромоторов — конструктивной простоте — уже сказано выше.

Кроме того, следует отметить надежность в эксплуатации и несколько более высокий, по сравнению с пластинчатыми насосами, объемный КПД.

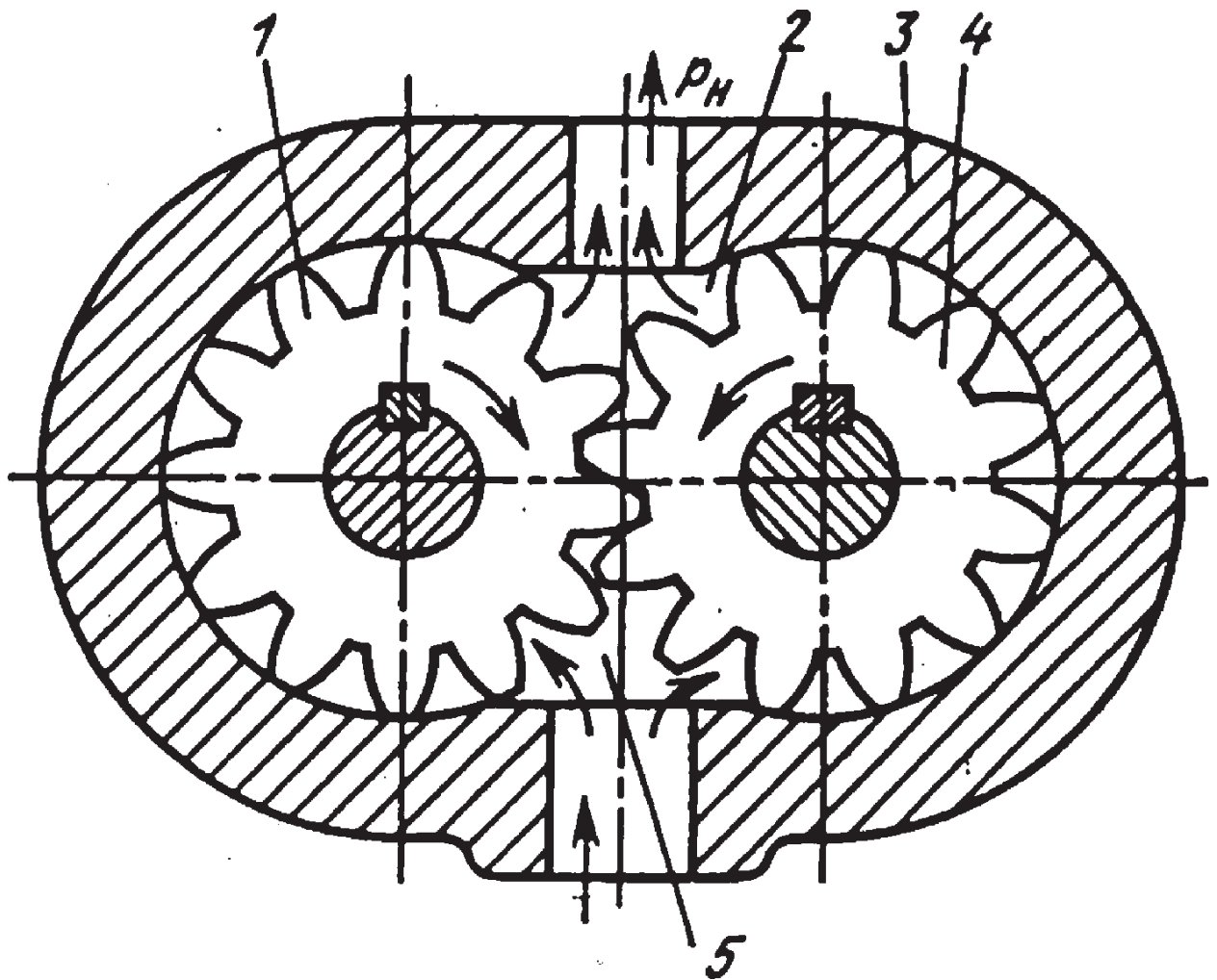


Рис. 2.16. Схема действия шестеренного гидромотора: 1, 4 — шестерни; 2 — подающая полость; 3 — корпус; 5 — сливная полость

Основной недостаток этих гидромашин состоит в невозможности их регулирования. Попытки создать регулируемый шестеренный насос предпринимаются, но успеха до настоящего времени достичь не удалось, так как конструкция резко усложняется, увеличиваются утечки, снижается качество зацепления и связанные с ним надежность и долговечность и т. п.

Также нужно указать на сравнительно низкий механический КПД. Дело в том, что ротор и шестерня 4 (рис. 2.16) установлены обычно на подшипниках скольжения, что дает возможность уменьшить размеры насоса в целом и избежать больших утечек, но увеличивает потери мощности на трение.

3. Гидроцилиндры

Принцип работы гидроцилиндров поясняется рис. 2.17.

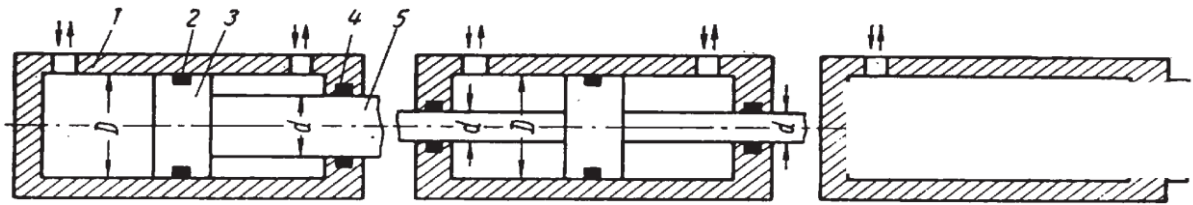


Рис. 2.17. Схемы гидроцилиндров: а — гидроцилиндр двустороннего действия с односторонним штоком; б — гидроцилиндр двустороннего действия с двухсторонним штоком; в — гидроцилиндр одностороннего действия плунжерный

Гидроцилиндр содержит корпус (гильзу) 1, в котором расположен поршень 3, шток 5 которого выходит наружу. Зазор между поршнем и корпусом перекрыт уплотнением 2, а между штоком и корпусом — уплотнением 3.

При расчете гидроцилиндров необходимо принимать во внимание силы трения между уплотнительными элементами и движущимися поверхностями. Эти силы учитываются механическим КПД, вели-

чина которого, по различным данным, находится в интервале $\eta_{\text{мех}} = 0,85 \dots 0,98$. Конкретное значение $\eta_{\text{мех}}$ на стадии расчета определить невозможно, оно зависит от многих факторов. Один из них — диаметр уплотняемой поверхности, с величиной которого величина $\eta_{\text{мех}}$ связана линейной зависимостью. К сожалению, полагаться на значения $\eta_{\text{мех}}$, полученные из приводимых в различных источниках формул, нельзя. Так, формула для определения силы трения уплотнительного кольца, рекомендованная в [7], дает явно заниженные величины, что означает сильное завышение $\eta_{\text{мех}}$. На основе анализа ряда научно-технических работ могут быть рекомендованы для использования на стадии предварительного расчета следующие значения $\eta_{\text{мех}}$:

- при диаметрах поршня (плунжера) до 40мм $\eta_{\text{мех}} = 0,85$;
- при диаметрах поршня свыше 40 до 60мм $\eta_{\text{мех}} = 0,9$;
- при диаметрах поршня свыше 60 до 125мм $\eta_{\text{мех}} = 0,92$;
- при диаметре поршня свыше 125мм $\eta_{\text{мех}} = 0,95$.

У гидроцилиндра двустороннего действия с односторонним штоком различают поршневую (слева от поршня на рис. 2.17, а) и штоковую (справа от поршня на рис. 2.17, а) полости. От того, в какую полость подается жидкость под давлением, зависят усилие на штоке и скорость движения штока. Подача жидкости в поршневую полость при условии, что давление в штоковой полости мало отличается от атмосферного, обеспечивает усилие

$$F_1 = \pi D^2 p \eta_{\text{мех}} / 4 \quad (2.9)$$

и скорость выдвижения штока из цилиндра

$$v_1 = 4Q/(\pi D^2), \quad (2.10)$$

где Q — расход поступающей в цилиндр жидкости.

При подаче в штоковую полость усилие равно

$$F_2 = \pi(D^2 - d^2) p \eta_{\text{мех}} / 4; \quad (2.11)$$

скорость перемещения штока в цилиндр

$$v_2 = 4Q/\pi(D^2 - d^2). \quad (2.12)$$

Усилие и скорость перемещения штока гидроцилиндра с двусторонним штоком (рис. 2.17, б) не зависят от того, в какую полость подается жидкость, и определяются по формулам (2.11) и (2.12).

Усилие и скорость выдвижения плунжера гидроцилиндра, изображенного на рис. 2.17, в, определяются по формулам (2.9) и (2.10), в которых под D подразумевается диаметр плунжера. Такой гидроцилиндр под действием давления жидкости совершает ход в одну сторону (на рис. 2.17, в — вправо), а обратный ход — под действием внешней силы (на рис. 2.17, в это сила пружины).

В настоящее время действует ряд стандартов на гидроцилиндры. В качестве примера могут быть приведены стандарты на гидроцилиндры для станочных приспособлений с диаметрами поршня от 40 до 80 мм для работы при номинальном давлении жидкости 10 МПа со скоростями до 0,063 м/с [9]. Эти стандарты распространяются на цилиндры одностороннего действия со сплошным и полым штоками, а также двустороннего действия.

Лекция

Тема 1.1.8. Гидропривод мехатронных модулей

ВОПРОСЫ

10. Классификация насосов, клапаны и дроссели.
11. Гидрораспределители и вспомогательные устройства.
12. Методика проектирования гидросистем мехатронных модулей.

ЛИТЕРАТУРА

7. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: Учебник. – 2е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во «СТАНКИН», 2005. – 368 с.: ил. (ЛЗ с. 97-121).
8. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей: учеб.пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 336 с. (Л4 с.184-228).

1. Классификация насосов, клапаны и дроссели

В п. 2.2.1 сказано о свойстве обратимости гидромашин и о его следствии — тождественности принципиального устройства гидродвигателей и насосов. Это дает возможность, ознакомившись с конструкциями гидромоторов, конструкции насосов уже не рассматривать, ограничившись их основными характеристиками.



Рис. 4.1. Классификация насосов

Полная классификация насосов по виду рабочих органов приведена на рис. 4.1. В нее включены, кроме насосов объемного вытеснения,

также и лопастные: центробежные, осевые и вихревые. Недостатки лопастных гидромашин с точки зрения их применения в ММ уже отмечены, поэтому в дальнейшем речь пойдет о насосах объемного вытеснения.

Из насосов объемного вытеснения наиболее широкое распространение в мехатронике получили **поршневые, пластинчатые и шестеренные**. Они и будут рассмотрены ниже.

Радиально-поршневые насосы

Конструктивная схема радиально-поршневого насоса показана на рис. 4.2.

Работает насос следующим образом. При вращении ротора 3 по часовой стрелке поршни 4 цилиндров, находящихся слева от вертикальной оси ротора, выдвигаются, и рабочая жидкость через окна всасывания *a* поступает из линии всасывания в расточки ротора (цилиндры). В то же время поршни цилиндров справа от вертикальной оси вдвигаются в расточки ротора, и жидкость через окна нагнетания *b* вытесняется в линию нагнетания.

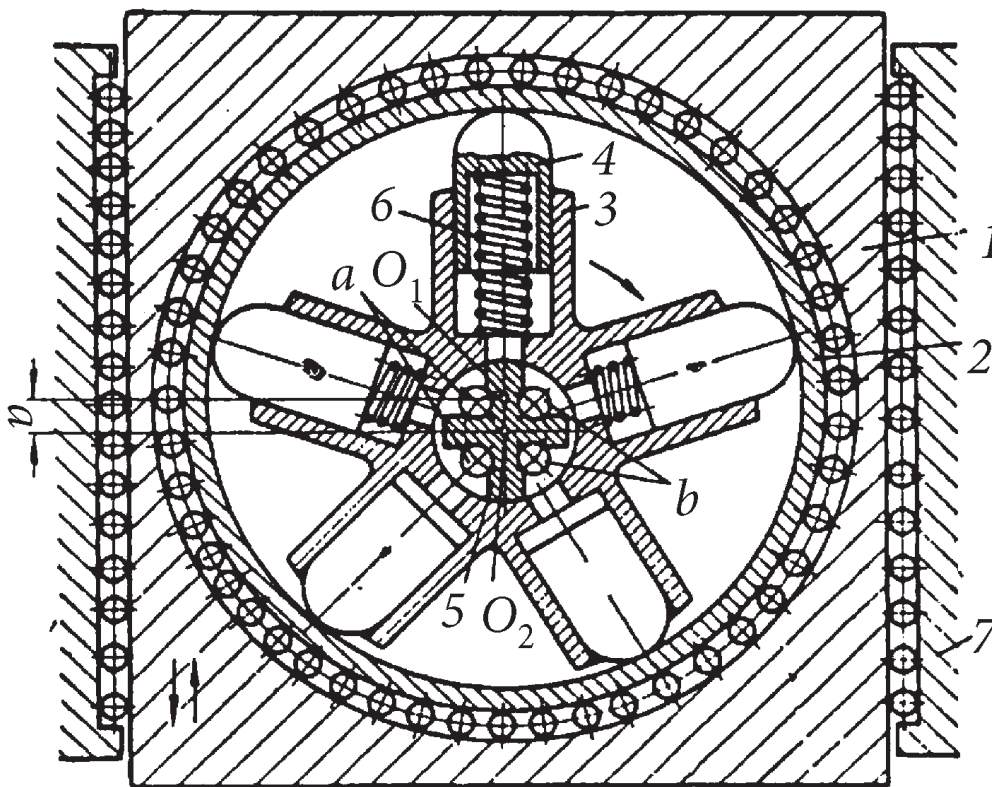


Рис. 4.2. Схема радиально-поршневого насоса: 1 — корпус; 2 — внутреннее кольцо подшипника качения; 3 — блок цилиндров (ротор); 4 — поршень (плунжер); 5 — цапфа; 6 — пружина; 7 — направляющая; *a* — окно всасывания; *b* — окно нагнетания; *e* — эксцентриситет;

O_1 — ось отверстия в корпусе 1; O_2 — ось вращения ротора 3

Величина хода поршня за полный оборот равна $2e$, поэтому изменением эксцентриситета можно регулировать **производительность** насоса. Для этого корпус 1 установлен с возможностью вертикального перемещения в направляющих 7.

Перемещение корпуса 1 таким образом, что точка O_1 занимает положение ниже точки O_2 , приводит к **реверсированию потока** при неизменном направлении вращения ротора, причем окна b становятся окнами всасывания, а окна a — нагнетания.

Под действием сил давления жидкости, центробежных сил и упругости пружин 6 поршни прижимаются к кольцу 2. Силы трения между поршнями и кольцом вовлекают кольцо во вращение вместе с ротором, за счет чего резко снижается скорость относительного скольжения в паре «*поршень — кольцо*» и уменьшается интенсивность износа контактирующих поверхностей.

Цапфа 5 выполняет функцию перегородки и устраняет возможность перетекания жидкости напрямую из окон b в окна a .

Производительность насоса:

теоретическая (без учета утечек)

$$Q_T = 0,5\pi d^2 e z n, \quad (4.1)$$

фактическая

$$Q = Q_T \eta_{об}, \quad (4.2)$$

где d — диаметр поршня; z — число цилиндров ротора; $\eta_{об}$ — объемный КПД насоса.

Мощность на валу приводного электродвигателя определяют по формуле

$$P_{дв} = Q_T p / \eta_{мех}, \quad (4.3)$$

где p — создаваемое насосом избыточное давление жидкости; $\eta_{мех}$ — механический КПД насоса.

Недостатком радиально-поршневых насосов по сравнению с другими типами являются **большие размеры** в поперечном сечении (т. е. ширина и высота). С целью повышения производительности без увеличения размеров ротор выполняют с несколькими рядами цилиндров.

Например, радиально-поршневые насосы НР [7] имеют 4 модификации по управлению:

- 1) нереверсивные с ручным управлением НРР и НРРШ (в насос НРРШ входит шестеренный насос для питания гидросистемы вспомогательных механизмов);
- 2) нереверсивные НРС и реверсивные 2НРС со следящим гидравлическим управлением;
- 3) реверсивные с электрогидравлическим механизмом управления на два (НРМ) и четыре (НР4М) значения производительности;
- 4) нереверсивные с управлением по давлению НРД.

Основные технические параметры некоторых насосов серии НР

приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Основные параметры насосов НР

Параметр	НРР, НРРШ, НРС, 2НРС, НРМ, НР4М			НРД		
	125А/ 200	250А/ 200	450/ 200	125А/ 200	250А/ 200	500А/ 200
Номинальная производитель- ность, дм ³ /мин	100	200	400	46	110	250
Потребляемая мощность, кВт	45	91	182	28	62	115
КПД: объемный полный	0,85 0,77		0,87 0,77	0,85 0,77		0,87 0,77
Масса, кг	726... 770	1348... 1430	1608... 1690	758	1400	1660

Примечания: 1. Номинальная частота вращения 960 об/мин. 2. Номинальное давление 20 МПа.

Аксиально-поршневые насосы

Принцип действия аксиально-поршневой гидромашины, используемой в качестве двигателя, поясняется рис. 2.13. Как насос эта гидромашина работает следующим образом.

При вращении ротора 1 плунжер 2 нижнего цилиндра, контактирующий с наклонной шайбой 4 посредством упорного подшипника качения, выдвигается за половину оборота на расстояние h из цилиндра, и рабочая жидкость поступает из

линии всасывания через окно a и узел распределения b в цилиндр. За последующую половину оборота ротора плунжер снова вдвигается в цилиндр, и жидкость через узел распределения и окно b вытесняется в линию нагнетания.

Поворотом шайбы 4 против часовой стрелки можно получить $h = 0$, и следовательно, $Q = 0$, а затем и реверсирование потока без изменения направления вращения ротора.

Теоретическая производительность насоса равна

$$Q_T = 0,25\pi d^2 D z n \operatorname{tg} \gamma. \quad (4.4)$$

Фактическую производительность определяют по формуле (4.2).

Распространенное число цилиндров $z = 7 \dots 9$, максимальный угол $\gamma_{\max} = 20^\circ$. Частота вращения ротора $n = 500 \dots 4000$ об/мин (меньшие значения — для насосов большой мощности).

Конструкция по рис. 2.13 представляет собой лишь один из вариантов исполнения насоса. Известны и серийно выпускаются насосы, в которых поршни связаны с наклонной шайбой шатунами, а наклонная шайба с ротором — специальным карданным валом; насосы с двумя наклонными шайбами — передней и задней; со вспомогательным пластинчатым насосом и пр.

Основные параметры нерегулируемых насосов аксиально-поршневых НА и аксиально-поршневых секционных НС со вспомогательным пластинчатым насосом приведены в табл. 4.2. Буква М в марке насоса означает «модернизированный».

Основные параметры регулируемых аксиально-поршневых насосов НАС (реверсивных с механическим регулированием), НА4М (реверсивных с электро-гидравлическим управлением на 4 производительности), НАД (нереверсивных с автоматическим поддержанием постоянства мощности) даны в табл. 4.3.

Таблица 4.2

Основные параметры насосов НА и НС... М

Параметр	НА			НС		
	10/ 320М	25/ 320М	32/ 320М	10/ 320М	25/ 320М	32/ 320М
Производительность, дм ³ /мин	13,5	34,8	45	13,5	34,8	45
Потребляемая мощность, кВт	8,3	20,8	26,8	9,4	22	27,9
КПД: объемный	0,91	0,93	0,94	0,91	0,93	0,94
полный	0,86	0,87	0,88	0,80	0,83	0,86
Масса, кг	21	48		25	52,5	

Примечания: 1. Номинальная частота вращения 1500 об/мин. 2. Номинальное давление 32 МПа.

Таблица 4.3

Основные параметры насосов НАС, НА4М, НАД

Параметр	НАС		НА4М		НАД	
	16/ 200	140/ 200	40/ 200	140/ 200	140/ 200	140/ 200
Производительность, дм ³ /мин	22	200	56,5	200	56,5	200
Давление номинальное, МПа	20				6	
Потребляемая мощность, кВт	8,5	75	22,1	75	6,9	23,7
КПД: объемный	0,92	0,95	0,93	0,95	—	—
полный	0,86	0,89	0,87	0,89	0,83	0,85
Масса, кг	32,5	140	92	152	65	130

Примечания: 1. Номинальная частота вращения 1500 об/мин. 2. Максимальное давление насосов НАД 20 МПа.

Приведенные в табл. 4.3 параметры относятся к наименьшему и наибольшему насосам каждой марки.

Данные табл. 4.1 и 4.3 могут служить базой для сравнения радиальнопоршневых насосов с аксиально-поршневыми. Аналогами являются, например, насосы НР4М250А/200 и НА4М140/200. И тот, и другой —

реверсивные, на номинальную производительность 200 дм³/мин и давление 20 МПа. Но масса насоса НА4М140/200 **в 9,4 раза меньше**. И если к этому добавить, что он потребляет **в 1,2 раза меньшую мощность**, работает при большей частоте вращения и **требует** поэтому значительно **менее тяжелого электродвигателя**, то

становится очевидной целесообразность применения насоса НА4М140/200 в приводе ММ.

Пластинчатые насосы

Простейший двухпластинчатый насос (рис. 4.3) содержит пластины 3, расположенные в пазах ротора 6 и поджимаемые к поверхности статора 1 пружинами 2. Ось ротора смещена на величину эксцентриситета e относительно расточки статора.

С передней и задней сторон пространство между ротором, пластинами и статором ограничено боковыми стенками.

При повороте ротора 6 по часовой стрелке объем камеры насоса, сообщаемой с полостью 5, увеличивается, а камеры, сообщаемой с полостью 4, уменьшается, в результате чего происходит всасывание жидкости из полости 5 и нагнетание в полость 4.

1 2

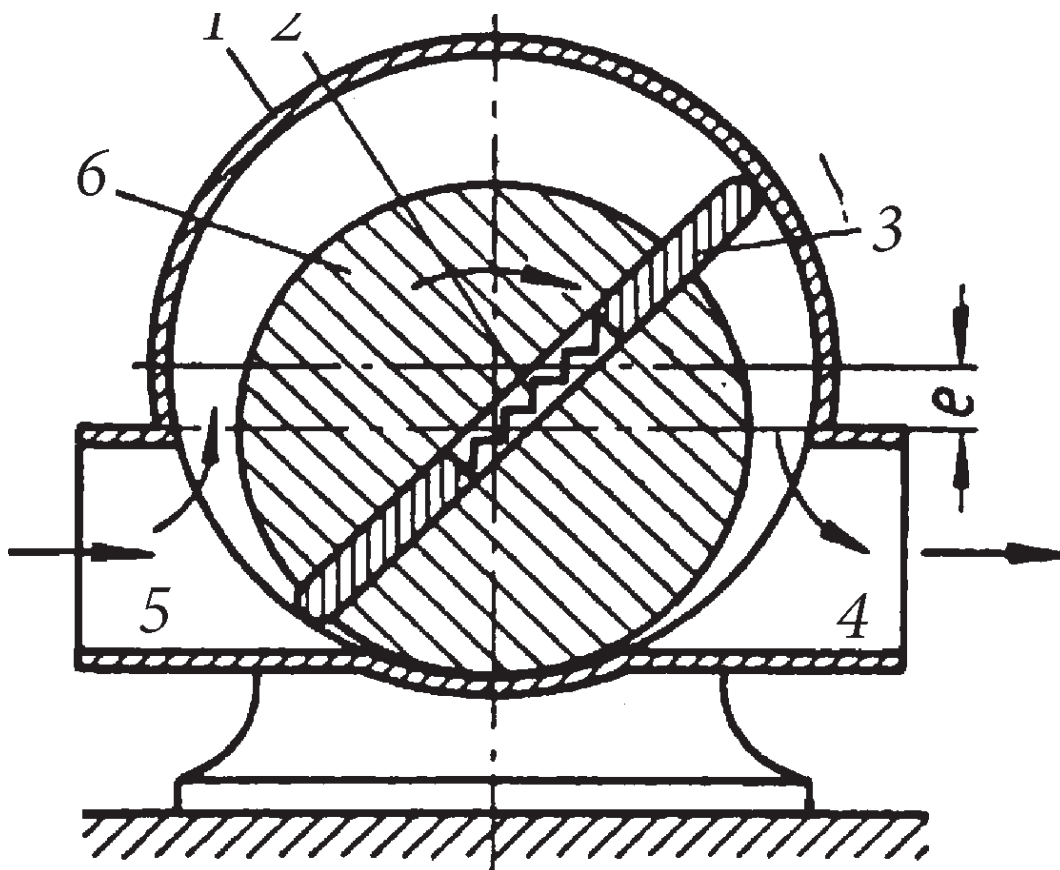


Рис. 4.3. Схема двухпластинчатого насоса: 1 — статор; 2 — пружина; 3 — пластина; 4 — полость нагнетания; 5 — полость всасывания; 6 — ротор

Ротор 6 в нижней части имеет плотный контакт с поверхностью статора, поэтому в любом положении ротора одна из пластин отделяет полость 4 от полости 5.

Изменение величины e в таком насосе невозможно, т. е. насос нерегулируемый. Подобные насосы используются для вспомогательных целей при невысоких давлениях в гидросистеме.

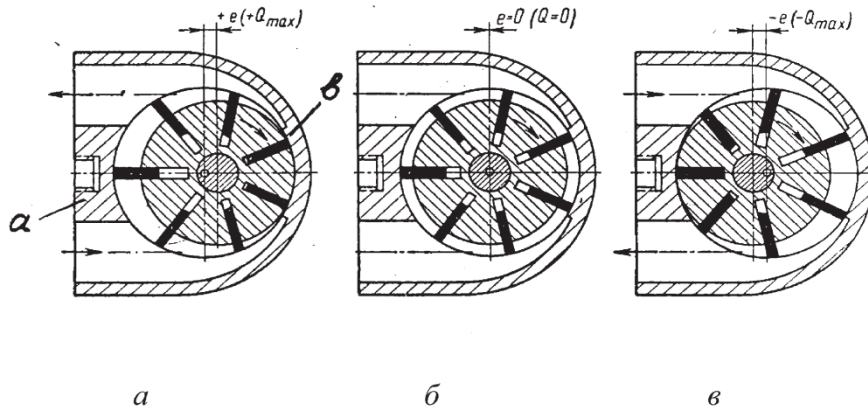


Рис. 4.4. Схема многопластинчатого насоса

На рис. 4.4 показана схема регулируемого пластинчатого насоса с числом пластин $z > 2$.

Ротор имеет возможность перемещаться относительно статора. Положение ротора по рис. 4.4, а соответствует максимальной производительности (направление потока указано стрелками), положение по рис. 4.4, б — нулевой производительности, по 4.4, в — максимальной производительности в направлении, обратном первоначальному. В любом положении ротора полости нагнетания и всасывания разделены контактом пластин с перемычками а и б, ширина которых не меньше расстояния между двумя соседними пластинами.

Число пластин в таких насосах $z = 6...12$. Плотность контакта пластин со статором обеспечивается различными средствами: подпружиниванием, давлением жидкости, центробежными силами.

Теоретическая производительность многопластинчатого насоса с учетом толщины пластин равна

$$Q_T = 2ben(\pi D - zs), \quad (4.5)$$

где b — ширина ротора (т. е. ширина пластины); D — диаметр расточки статора; s — толщина пластины.

Параметры серийно выпускаемых регулируемых насосов Г12—5 приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4.

Основные параметры насосов Г12—5 и БГ12—2

Параметр	Г12—5		БГ12—2			
	3АМ	5АМ	1АМ	2АМ	4АМ	5АМ
Производительность, дм ³ /мин	0...58	0...105,6	5,4	19,4	56	102
Давление номинальное, МПа	6,3		12,5			
Потребляемая мощность, не более, кВт	8,1	13,6	2,0	5,65	15,1	26
КПД: объемный полный	0,86	0,88	0,72	0,81	0,83	0,9
	0,74	0,8	0,55	0,7	0,76	0,85
Масса, кг	30	40	9,5		22	

Примечание: номинальная частота вращения 1500 об/мин.

Недостатком описанных пластинчатых насосов является большая **неуравновешенная нагрузка** на ротор от давления жидкости в полости нагнетания, поэтому насосы эти предназначены, как правило, для гидросистем с давлением не выше 7 МПа.

Указанный недостаток отсутствует в пластинчатых насосах двойного действия типа БГ12—2, конструкция которых аналогична конструкции пластинчатого гидромотора, показанного на рис. 2.14.

Насосы двойного действия выпускаются на давления до 14 МПа. **Недостаток** таких насосов — **невозможность их регулирования**. Основные рабочие параметры насосов БГ12—2 даны в табл. 4.4. Теоретическая производительность насоса двойного действия

$$Q_x = 2vnb, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.6)$$

где v — средняя окружная скорость пластины; h — рабочая высота пластины.

Подстановка в (4.6) выражений для v и h

$$v = \pi n (r_2 + r_1)/60; \quad (4.7)$$

$$h = r_2 - r_1 \quad (4.8)$$

дает

$$Q_x = \pi n(r_2^2 - r_1^2)b/30, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4.9)$$

При сравнении параметров **пластинчатых и поршневых насосов** обращает на себя внимание существенно **меньший объемный КПД пластинчатых насосов**. Причина этого состоит в невозможности предотвращения перетечек жидкости между пластинами и поверхностью расточки статора, между пластинами и боковыми стенками.

К **достоинствам** пластинчатых насосов следует отнести их **меньшие массы** при равных производительностях.

Шестеренные насосы

Шестеренные насосы так же, как и шестеренные гидромоторы (рис. 2.15) отличаются простотой конструкции.

Кроме того, следует отметить **надежность** в эксплуатации и несколько **более высокий**, по сравнению с пластинчатыми насосами, **объемный КПД**.

Считается, что максимальное давление, развиваемое шестеренными насосами, равно 10 МПа, но специальными насосами (в авиационных гидросистемах) достигается и 20 МПа [18].

Об основном **недостатке** этих гидромашин — **невозможности их регулирования** — уже сказано.

Как правило, шестеренные насосы используют для вспомогательных целей. Основные параметры низконапорных шестеренных насосов Г11—2 приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Основные параметры насосов Г11—2

Параметр	Г11— 22	Г11— 23А	Г11— 23	Г11— 24А	Г11— 24	Г11— 25А
Производительность, дм ³ /мин	18	26	38	50	72	104
Потребляемая мощность, кВт	1,3	1,6	2,3	3,0	4,1	5,8
КПД: объемный	0,78	0,8	0,82	0,88	0,89	0,91
полный	0,56	0,64	0,68	0,72	0,74	0,76
Масса, кг	6	8,7		12		17

Примечания. 1. Номинальная частота вращения 1500 об/мин. 2. Номинальное давление 2,5 МПа.

Клапаны и дроссели

Обратные клапаны

Обратный клапан, например, типа Г51—2 [7] (рис. 4.5) состоит из корпуса 1, плунжера 3 с пружиной 4 и пробки 5. Пружина поджимает плунжер к коническому седлу корпуса. Масло, подводимое в отверстие 7, действует на нижнюю торцовую поверхность плунжера, преодолевает силу пружины и приподнимает плунжер. Между плунжером и коническим седлом появляется зазор, через который масло поступает в отводное отверстие 2.

При изменении направления потока давление масла в отверстии 2 действует на верхнюю торцовую поверхность плунжера со стороны полости 6 и вместе с пружиной плотно прижимает плунжер к седлу, перекрывая поток из отверстия 2 в отверстие 7.

Таким образом, клапан обеспечивает **прохождение жидкости только в одном направлении** — из отверстия 7 в отверстие 2.

Клапаны Г51—2 устанавливают непосредственно на концах отрезков трубопровода. Предусмотрено также исполнение со стыковым присоединением (клапаны ПГ51—2), отличающееся только конструкцией корпуса.

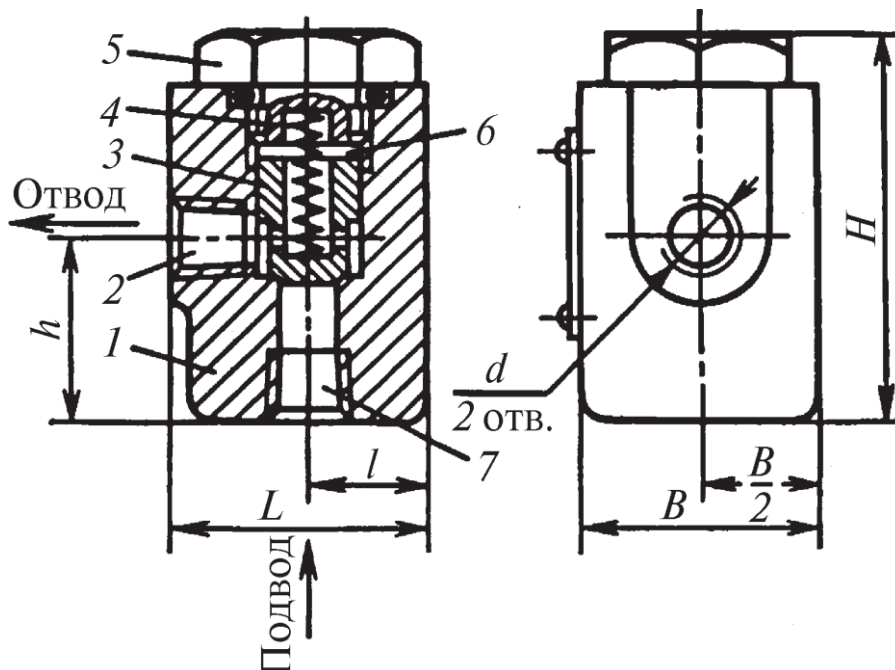


Рис. 4.5. Обратный клапан марки Г51—2: 1 — корпус; 2 — отводное отверстие; 3 — плунжер; 4 — пружина; 5 — пробка; 6 — полость; 7 — отверстие для подвода масла

Основные параметры обратных клапанов типа Г (ПГ) 51—2 приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Основные параметры обратных клапанов Г (ПГ) 51—2

Параметр	Г51—21	Г51—22	Г51—23	Г51—24	Г51—25
Номинальный расход, $\text{дм}^3/\text{мин}$	8,0	20	40	80	160
Диаметр: условного прохода, мм отверстия d	8 $K^{1/4}$ "	10 $K^{3/8}$ "	16 $K^{1/2}$ "	20 $K^{3/4}$ "	32 $K^{1/4}$ "
Размеры, мм: L B H h	55 52 83 40	70 52 105 54	103 82 138 69		
Масса, кг	1,2	1,6	5,45		

Примечание: номинальное давление 20 МПа.

Существует ряд типовых случаев применения обратных клапанов. Один из них — установка параллельно с дросселем — будет рассмотрен ниже.

Промышленность выпускает обратные клапаны различных конструкций.

Предохранительные клапаны

Предохранительные клапаны в гидроприводе предназначены для **предотвращения превышения давлением допустимой величины**.

Они действуют эпизодически в аварийных режимах работы — пропускают масло из напорной линии в сливную.

Схема действия предохранительного клапана **прямого действия** показана на рис. 4.6.

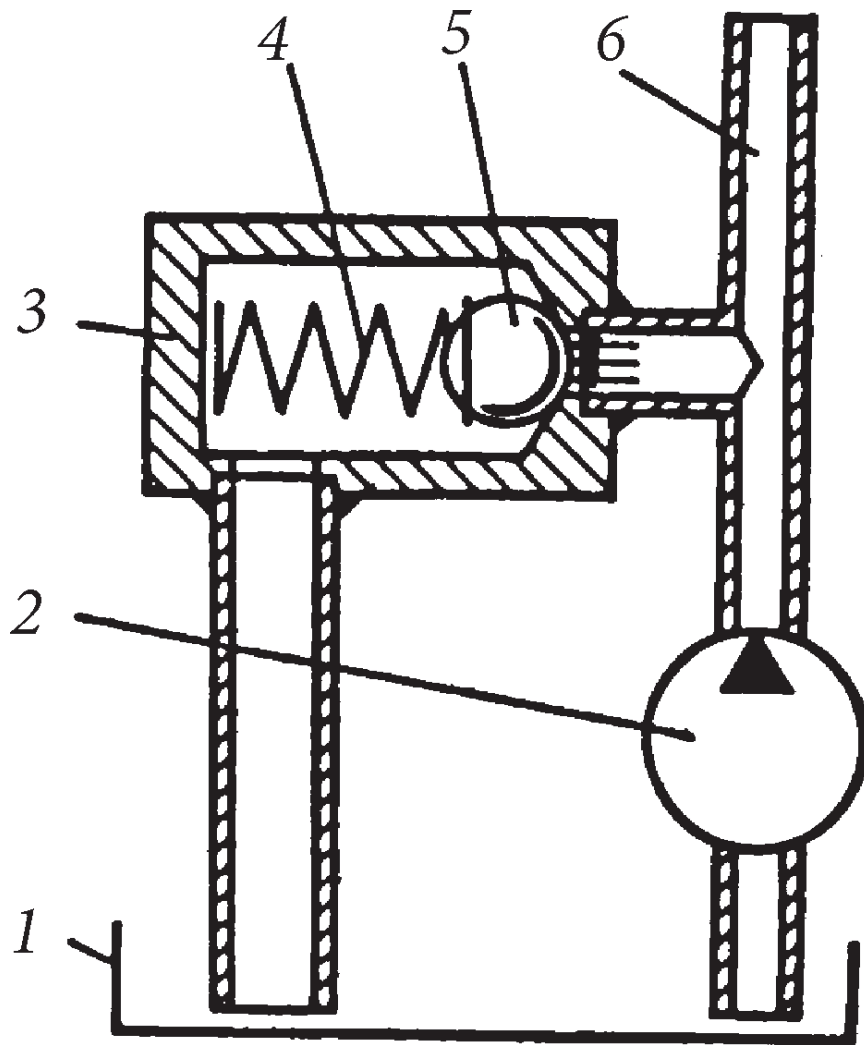


Рис. 4.6. Схема действия предохранительного клапана:

1 — маслобак; 2 — насос; 3 — клапан;

4 — пружина; 5 — шарик;

6 — трубопровод

Насос 2 всасывает масло из маслобака 1 и подает в гидросистему по трубопроводу 6, давление масла действует на шарик 5 предохранительного клапана 3, прижатый к седлу пружиной 4. В момент, когда сила давления жидкости на шарик превысит силу пружины, шарик отойдет от седла влево, и масло через образовавшуюся щель начнет сливаться в бак. Таким образом, клапан будет поддерживать в трубопроводе давление не выше значения, определяемого силой воздействия пружины на шарик. Изменяя силу пружины, можно регулировать величину максимального давления в гидросистеме.

Клапаны прямого действия применяют при небольших расходах и давлениях рабочей жидкости, так как увеличение этих параметров приводит к резкому возрастанию

размеров пружины. Поэтому в гидросистемах чаще используют аппараты **непрямого действия**, в которых небольшой вспомогательный клапан управляет перемещением **переливного золотника**, подключенного к напорной и сливной линиям.

В качестве примера могут быть приведены предохранительные клапаны непрямого действия марки Г52—2 (рис. 4.7 и табл. 4.7) [7].

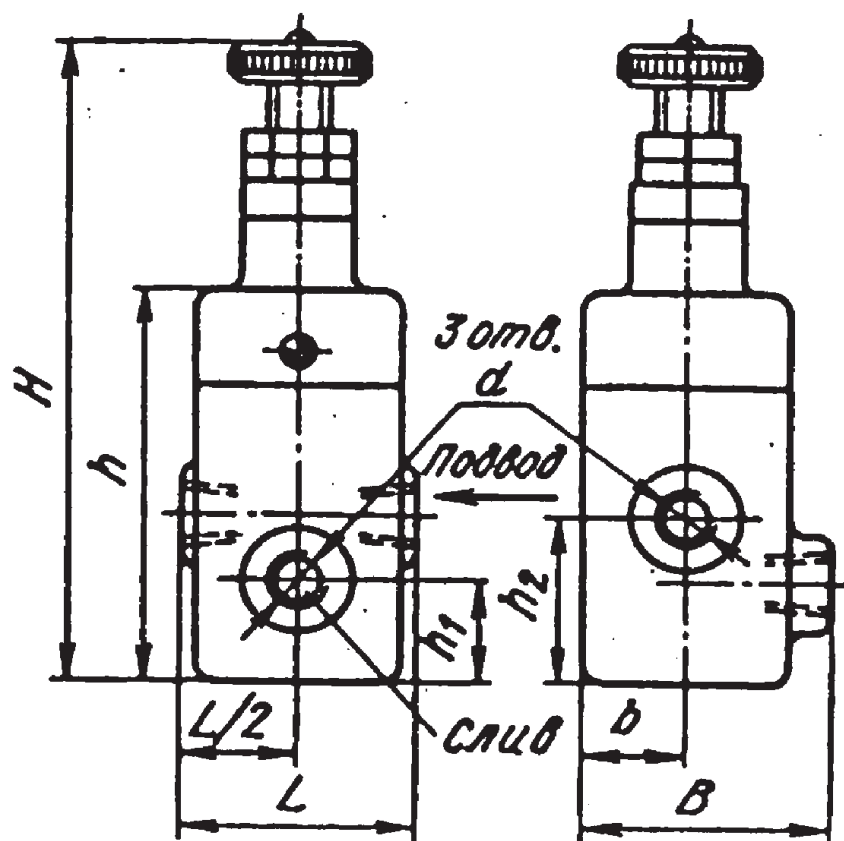


Рис. 4.7. Предохранительный клапан марки Г52—2

Таблица 4.7

Основные параметры предохранительных клапанов Г52—2

Параметр	Г52—22	Г52—23	Г52—24	Г52—25
Номинальный расход, $\text{дм}^3/\text{мин}$	20	40	80	160
Диаметр: условного прохода, мм отверстия d	10 $K^3/8''$	16 $K^1/2''$	20 $K^3/4''$	32 $K1^1/4''$
Размеры, мм:				
L	64	96		120
B	66	82		100
H	180	200		240
h_1	31	37		47
h_2	49	62		91
Масса, кг	2,5	4,6		8,4

Примечание: номинальное давление 20МПа.

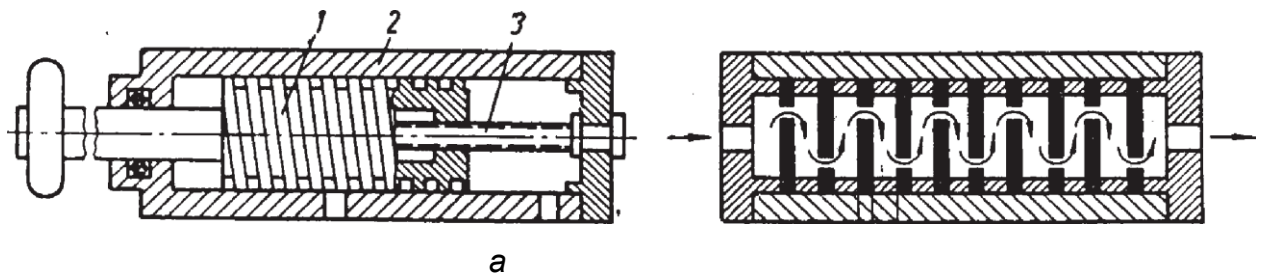
Дроссели и дроссельные регуляторы скорости гидродвигателя

Дроссель является **местным гидравлическим сопротивлением** течению жидкости и применяется для ограничения ее расхода или создания перепада давления. Как правило, дроссели используются **для регулирования скорости** перемещения штока гидроцилиндров или частоты вращения вала гидромотора.

Дросселирование жидкости сопровождается интенсивным тепловыделением, поэтому дроссельное регулирование не рекомендуется в гидросистемах мощностью свыше 4кВт.

Различают дроссели **вязкостного сопротивления** и **инерционного сопротивления**. В дросселях вязкостного сопротивления потеря давления обеспечивается, как показывает само название, преимущественно вязкостным сопротивлением потоку жидкости в длинном дроссельном канале. В дросселях инерционного сопротивления длина канала мала, а потеря давления определяется в основном деформацией потока жидкости, сопровождающейся вихреобразованием при внезапном сжатии русла, расширении и т. п.

Примером дросселя вязкостного сопротивления служит так называемый **линейный** дроссель (рис. 4.8, а), состоящий из дроссельного винта 1, помещенного во втулку 2, и вспомогательного винта 3, предназначенного для осевого перемещения винта 1. Жидкость подается в отверстие a , проходит по винтовой канавке дроссельного винта и отводится через отверстие b . При вращении винта 1 он перемещается вдоль винта 3, вследствие чего изменяется длина пути прохождения жидкости по винтовой канавке, а значит, и сопротивление дросселя.



б

Рис. 4.8. Дроссели: а — вязкостного сопротивления; б — инерционного сопротивления

Схема **многошайбового** инерционного дросселя, содержащего набор из нескольких шайб, показана на рис. 4.8, б. Суммарное сопротивление такого дросселя регулируется подбором требуемого количества шайб.

Кроме приведенных, используют дроссели **поворотного (кранового)** типа, **игольчатые** и пр. [7].

На основе дросселей созданы простейшие устройства для регулирования скорости гидродвигателя в приводах с нерегулируемыми насосами.

Принцип регулирования скорости гидроцилиндра с дроссельным регулятором **на входе** поясняет рис. 4.9, а.

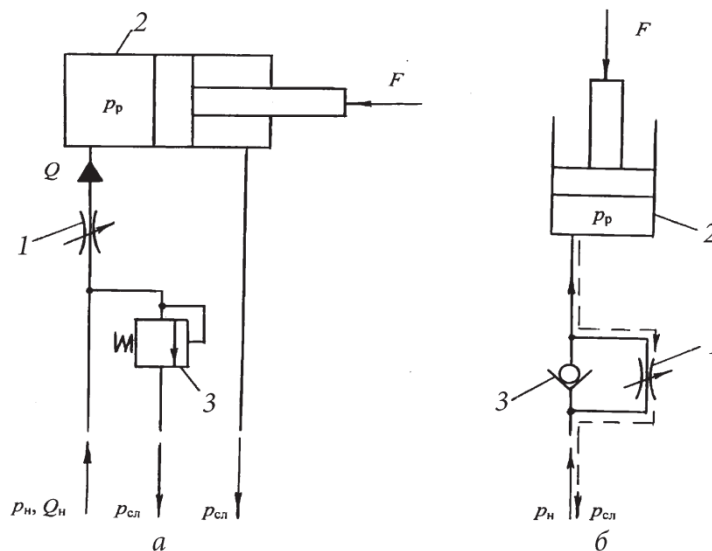


Рис. 4.9. Схемы дроссельного регулирования: а — регулирование скорости гидроцилиндра двустороннего действия с дросселем на входе; б — регулирование скорости обратного хода гидроцилиндра одностороннего действия

Регулируемый дроссель 1 расположен на линии нагнетания жидкости в цилиндр 2. Перед дросселем в систему включен **переливной клапан 3**. Конструкция переливного клапана подобна конструкции клапана предохранительного.

Нерегулируемый насос создает давление p_n ; перемещение поршня, нагруженного силой F , происходит при давлении в поршневой полости p_p ; штоковая полость соединена со сливной линией, жидкость в которой находится под давлением $p_{сл}$.

Расход жидкости через дроссель равен

$$Q = \mu f [2(p_n - p_p)/\rho]^{0,5}, \quad (4.11)$$

где μ — коэффициент расхода; f — площадь проходного сечения дросселирующей щели; ρ — плотность жидкости.

Скорость поршня прямо пропорциональна Q .

Насос создает в сети расход жидкости $Q_n > Q$. Разность расходов $Q_n - Q$ поступает через переливной клапан в сливную линию. Для этого клапан 3 должен быть установлен на давление, развиваемое насосом, т. е. p_n .

Следовательно, при $Q_n = \text{const}$ и $F = \text{const}$ (т. е. $p_p = \text{const}$) скорость поршня прямо пропорциональна величине Q . Это дает возможность регулировать скорость с помощью дросселя.

Используются также схемы с установкой дросселя **на сливной линии** или **на ответвлении** [7, 18].

Схема дроссельного регулирования скорости обратного хода гидроцилиндра одностороннего действия типа домкрата, нагрузка F на который постоянна по направлению, приведена на рис 4.9, б.

И подача жидкости в цилиндр 2, и слив ее из цилиндра производятся по одному участку трубопровода, который при рабочем ходе поршня (вверх) соединяется с насосом, а при обратном (вниз) — с маслобаком. Параллельно дросселю 1 установлен обратный клапан 3.

В период рабочего хода жидкость под давлением p_n поступает от насоса. Обратный клапан открывается, жидкость движется в основном через него, и давление в цилиндре p_p незначительно (на величину сопротивления обратного клапана) меньше p_n . Обратный ход поршня осуществляется под действием силы F . Обратный клапан закрывается, и цилиндр соединяется с маслобаком через дроссель,

причем скорость опускания поршня при данном перепаде давлений $p_p - p_{сл}$ определяется площадью дросселя (согласно (4.1)).

Дроссель является составной частью устройства, называемого **регулятором потока**, предназначенного для поддержания постоянного расхода в гидросети независимо от внешней нагрузки на гидродвигатель. Подробно конструкции регуляторов потока рассмотрены в [1, 2, 10] и здесь не приводятся.

В качестве примера в табл. 4.8 приведены основные рабочие параметры регуляторов потока ПГ55—2 [7].

Таблица 4.8

Основные параметры регуляторов потока ПГ55—2

Параметр	ПГ55—22	ПГ55—24	ПГ55—25
Расход, $\text{дм}^3/\text{мин}$:			
максимальный	20	80	160
минимальный	0,06	0,12	0,25
Диаметр условного прохода, мм	10	20	32
Габаритные размеры, мм:			
длина	112	125	142
ширина	105	135	175
высота	100	110	135
Масса, кг	4,5	7,5	15,5

Примечания. 1. Максимальное давление 20 МПа. 2. Отклонение расхода от установленного $\pm 5\%$.

Гидрораспределители

Общие сведения

Распределение рабочей жидкости между агрегатами гидросистемы осуществляется специальными устройствами — гидрораспределителями. По виду рабочего элемента различают распределители **золотниковые, крановые и клапанные**.

Принцип действия золотникового распределителя поясняет рис. 4.10, а.

Золотник представляет собой цилиндрическую деталь типа плунжера с проточками (канавками), установленную в корпусе (ГР) с возможностью осевого перемещения и соединенную с приводом управления. На рис. 4.10, а изображен распределитель с ручным управлением посредством рукоятки. В корпусе выполнены ка-

налы для подвода жидкости от насоса (Р), слива (Т) и соединения полостей гидродвигателя (в данном случае гидроцилиндра ГД) либо с насосом, либо со сливом (А, В).

В положении золотника, показанном на рис. 4.10, а, поток жидкости Q от насоса по каналу Р и дальше по линии А поступает в штоковую полость цилиндра ГД, а из поршневой полости вытесняется по каналу В в сливной канал Т.

Перемещение рукоятки в положение, показанное пунктиром, приводит к тому, что поток от насоса по каналу Р и линии В поступает в поршневую полость цилиндра ГД, а из штоковой — вытесняется по линии А в канал Т. Происходит реверсирование потока, сопровождающееся изменением направления движения поршня.

Перемещение золотника в корпусе возможно только при наличии зазоров δ_p между его поверхностью диаметром D и расточкой корпуса, а зазоры обуславливают утечки (перетечки) жидкости между полостями. Поэтому в корпусе выполняют специальные каналы для отвода утечек в сливную линию.

Распределитель, золотник которого может занимать два положения, называется двухпозиционным. Трехпозиционные распределители имеют среднюю (нейтральную) позицию, в которой возможна остановка гидродвигателя.

Крановый распределитель с управлением с помощью рукоятки изображен на рис. 4.10, б. Он содержит цилиндрическую или конусную пробку, помещенную внутрь корпуса (ГР) и имеющую возможность относительного поворота приводом управления (в данном случае рукояткой).

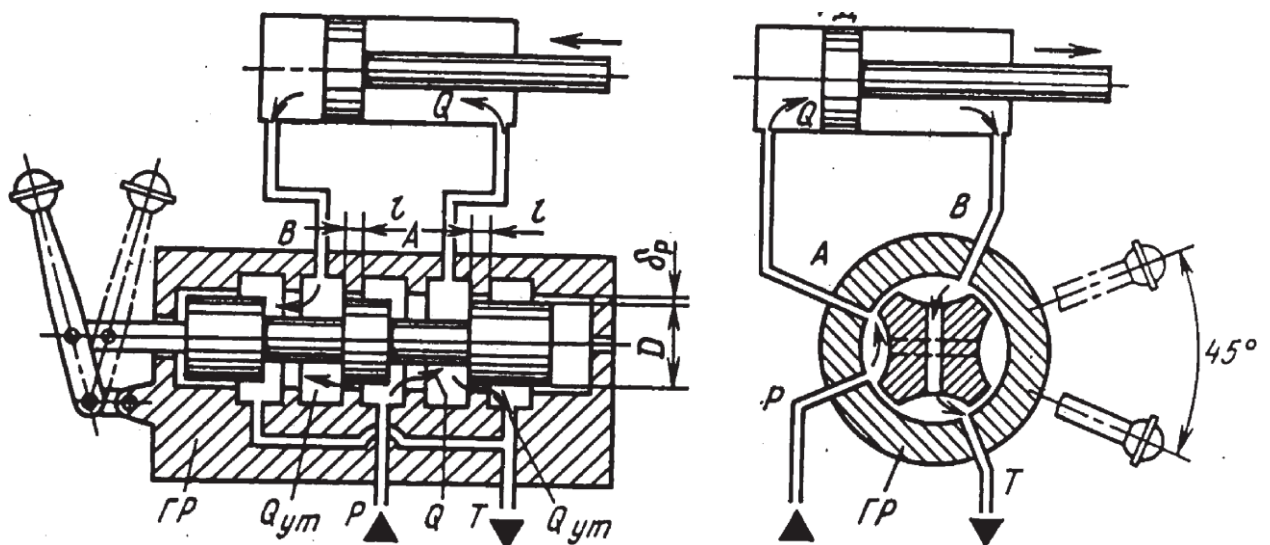


Рис. 4.10. Схемы распределителей: а — золотникового; б — кранового

В исходном положении пробки жидкость от насоса по каналу Р и затем по линии А поступает в поршневую полость цилиндра ГД, а из штоковой полости — по линии В в сливной канал Т. Перевод рукоятки в положение, показанное пунктирными линиями, обеспечивает реверсирование потока.

В клапанном распределителе с ручным приводом (рис. 4.11) поворот рукоятки 1 из нейтрального положения, например, против часовой стрелки приводит к тому, что клапан 2 перемещается вниз, и жидкость от насоса поступает в камеру 4 и затем — через канал 3 к гидродвигателю. Другой клапан пружиной поджимается к своему гнезду.

Распределители каждого типа имеют свои **преимущества**. Так, **крановые** распределители наиболее **просты по конструкции**, а для **клапанных** распределителей характерна практически абсолютная **герметичность** в закрытом положении. По сумме эксплуатационных качеств наилучшим образом выглядят **золотниковые** распределители, в их конструкциях легко реализуются **многопозиционность, разнообразие приводов** (ручной, электрический, электрогидравлический, гидравлический и пр.), хорошая **управляемость**. Именно золотниковые распределители получили наиболее широкое распространение в гидроприводе мехатронных модулей.

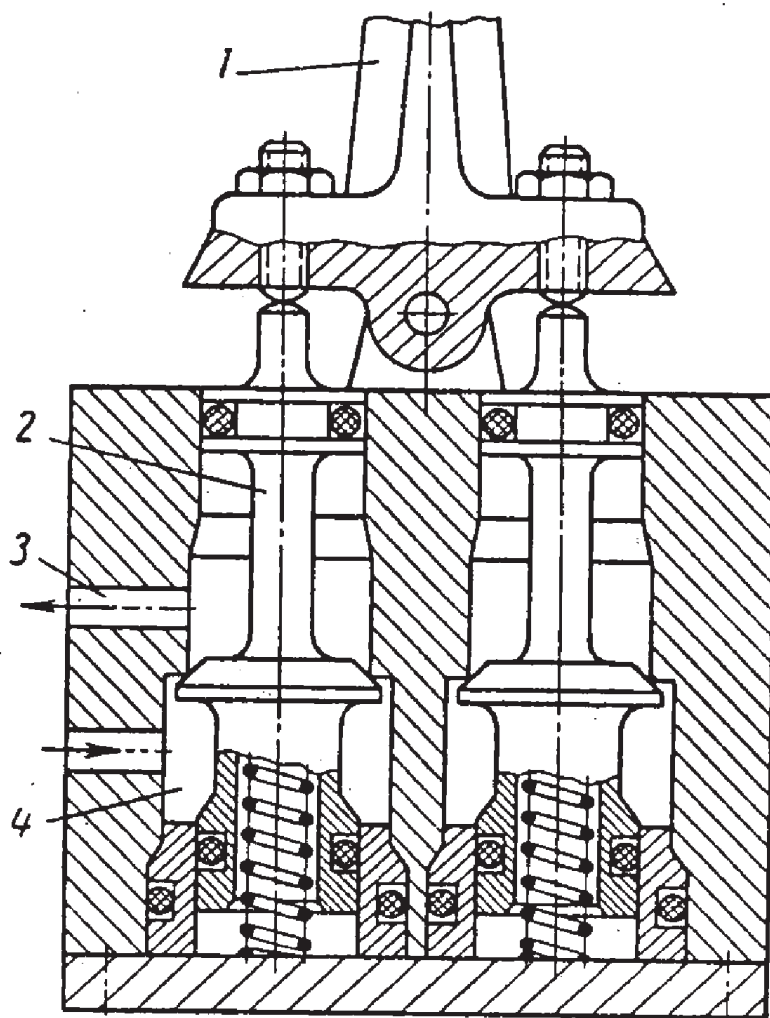


Рис. 4.11. Клапанный распределитель

Золотниковые распределители

По типу управления различают гидрораспределители с ручным управлением от рукоятки или поворотной кнопки; с ножным управлением; с механическим управлением от кулачка; с гидравлическим управлением от вспомогательного распределителя (**пилота**); с электрическим управлением от толкающего электромагнита постоянного или переменного тока; с электрогидравлическим управлением; с пневматическим управлением; с пневмогидравлическим управлением.

Для мехатронных модулей и систем характерна высокая степень автоматизации, при которой ручное и ножное управление неприемлемы. Остальные же типы управления могут применяться в зависимости от конкретного назначения модуля и окружающей обстановки.

Распределители подразделяются в зависимости от **диаметра условного прохода** D_y который примерно равен диаметру подводящего и сливного отверстий. В табл. 4.9 приведены рекомендуемые соотношения между D_y и номинальным расходом жидкости через распределитель.

Таблица 4.9

Рекомендуемые соотношения между диаметром условного прохода и расходом жидкости

D_y , мм	6	8	10	16	20	32
$Q_{\text{НОМ}}$, дм ³ /мин	6,3	12,5	20	50	80	200

Считая D_y равным диаметру подводящего канала, нетрудно определить **номинальную скорость потока** жидкости для каждой пары $(D_y, Q_{\text{НОМ}})$ и убедиться, что она примерно равна 4м/с. При необходимости расход жидкости через распределитель может быть увеличен до $2Q_{\text{НОМ}}$, но скорость жидкости в трубопроводе не должна намного превышать номинальную, поэтому в том случае, когда $Q > Q_{\text{НОМ}}$, следует соответственно увеличить диаметр трубопровода по формуле

$$d = d_{\text{НОМ}} (Q/Q_{\text{НОМ}})^{0,5}, \quad (4.12)$$

где d — увеличенный диаметр; $d_{\text{НОМ}}$ — диаметр, при котором скорость имеет номинальное значение.

По виду присоединения различают **резьбовое** и **стыковое** присоединения распределителей. В распределителях с резьбовым присоединением отверстия для подачи и отвода жидкости выполнены непосредственно в корпусе. В распределителях со стыковым присоединением эти отверстия выведены на стыковую плоскость, соединение с гидросистемой производится через специальные панели, или плиты.

Распределители выполняют двух- и трехпозиционными, в зависимости от **числа позиций** (фиксированных положений) золотника относительно корпуса. Каждая позиция обеспечивает подключение определенным образом гидродвигателя к насосной и сливной линиям гидросистемы. Например, первому положению золотника двухпозиционного распределителя соответствует вращение вала реверсивного гидромотора по часовой стрелке, а второму положению — против часовой

стрелки. Трехпозиционный же распределитель позволяет выполнять, кроме прямого и обратного вращения (первое и третье положения золотника), еще и остановку гидромотора (второе положение золотника).

О том, как соединяются линии в том или ином положении золотника, дает представление **схема** распределителя. Полная схема содержит также условное изображение устройства управления (рукоятки, электромагнита, возвратной пружины и пр.) [19].

Утечка по зазорам золотника зависит от перепада давлений и вязкости рабочей жидкости. Ориентировочные максимальные значения утечек при давлении 20 МПа и вязкости масла около 40 даны в табл. 4.10.

Таблица 4.10

Максимальная утечка по зазорам золотника

Условный проход, мм	8	10	16	20	32
Утечка, дм ³ /мин	0,05	0,1	0,2		0,5

Потеря давления потока при максимальном расходе в подавляющем большинстве распределителей лежит в интервале 0,8 –1,0 МПа.

На рис. 4.12, а показано устройство трехпозиционного гидрораспределителя ПГ73—1 с электрическим управлением.

Управление осуществляется двумя толкающими электромагнитами 4. Поскольку электромагниты приемлемых размеров не способны развивать больших усилий, то непосредственное воздействие на золотник 8 используется в распределителях с малыми условными проходами (6 мм и 8 мм).

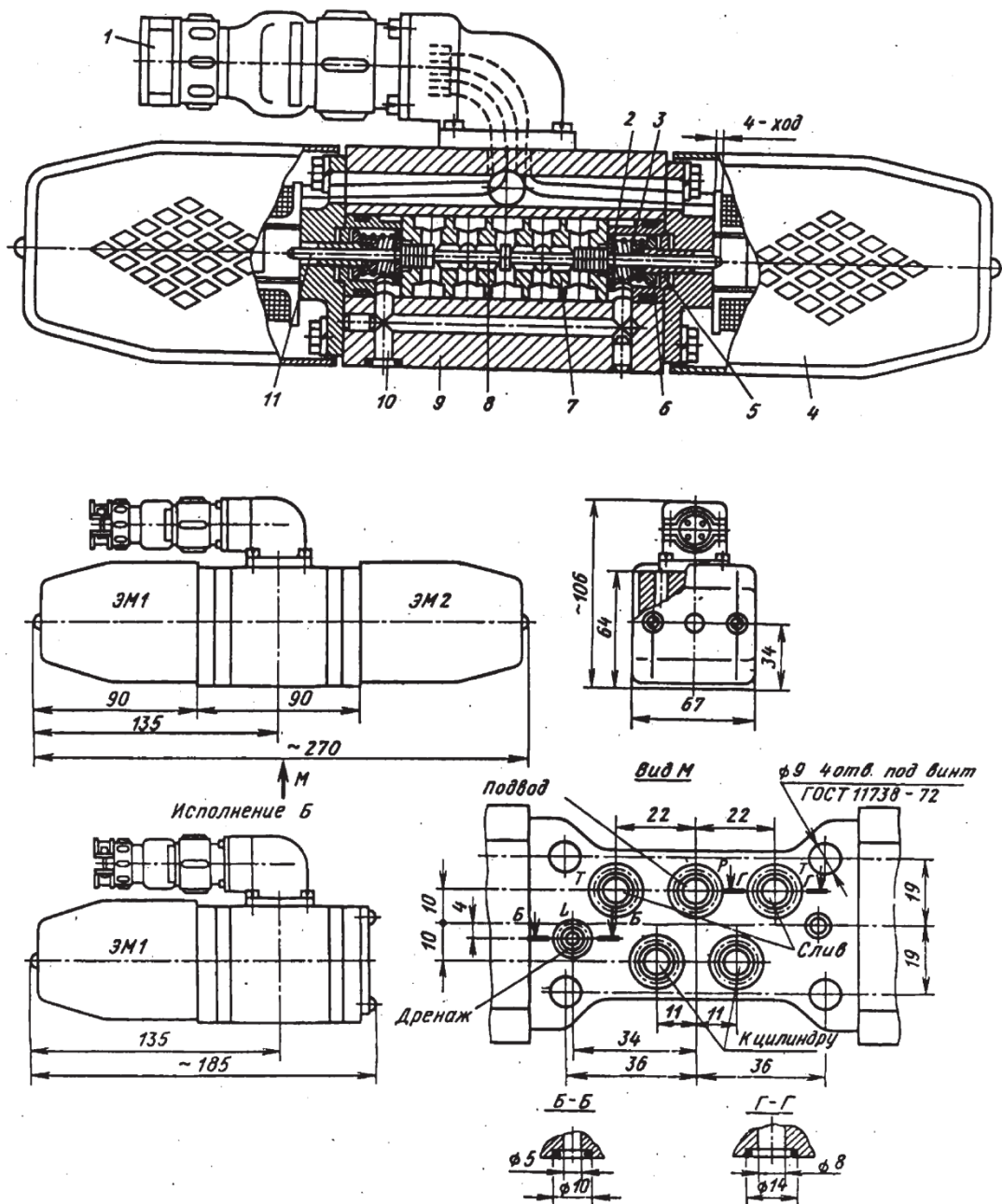


Рис. 4.12. Гидрораспределитель ПГ73—1: а — конструкция; б — габаритные и присоединительные размеры;

1 — штепсельный разъем; 2 — шайба; 3 — пружина; 4 — электромагнит; 5 — втулка; 6 — чашка; 7 — гильза; 8 — золотник; 9 — корпус; 10 — дренажное отверстие; 11 — толкатель

Левый электромагнит посредством толкателя 11 перемещает золотник внутри гильзы 7 в правое крайнее положение, а правый — в левое крайнее положение. Пружины 3 после отключения электромагнитов возвращают золотник в среднее — нейтральное положение. Утечки из торцовых полостей, в которых расположены пружины, отводятся в дренажное отверстие 10. Шайба 2, втулка 5 и

чашка 6 предназначены для установки пружины 3 в корпусе 9 и передачи ее усилия на толкатель 11.

Подводящие и сливные отверстия выполнены в нижней опорной плоскости (рис. 4.12, б). Подключение распределителя к гидросистеме осуществляется через промежуточную плиту с каналами и резьбовыми отверстиями.

Рассматриваемый распределитель может быть выполнен двухпозиционным (рис. 4.12, б, исполнение Б), при этом он оснащается не двумя, а одним электромагнитом, и возврат золотника в исходное положение производится пружиной.

Гидрораспределители с большими условными проходами ПГ73—2 и электрогидравлическим управлением представляют собой комбинацию управляющего распределителя (пилота) ПГ73—11 и управляемого им основного распределителя. В основном распределителе золотник перемещается давлением на толкатель подаваемой пилотом жидкости.

Основные параметры распределителей ПГ73 приведены в табл. 4.11.

Таблица 4.11

Основные параметры гидрораспределителей с электрическим и электрогидравлическим управлением

Параметр	ПГ73—11	ПГ73—12	ПГ73—24	ПГ73—25
Условный проход, мм	8	10	20	32
Расход номинальный, дм ³ /мин	8	20	80	160
Время срабатывания, с	0,02	0,03	0,05...1,5	0,07...3,0
Потери давления, МПа	0,78	0,83		0,78
Утечки, дм ³ /мин	0,05	0,12	0,2	0,3
Усилие электромагнита, Н	16	25	16	
Масса, кг	3	6	15	28

Примечание: рабочее давление 20 МПа.

Дросселирующие распределители

В мехатронных гидравлических системах с программным и адаптивным управлением, в гидросистемах роботов широко используются так называемые **дросселирующие распределители**, обладающие **высокой чувствительностью** к управляющим воздействиям и способные обеспечивать **весьма малые** (порядка 0,1мм и менее) **перемещения** рабочего органа.

Принцип действия дросселирующего распределителя поясняет рис. 4.13.

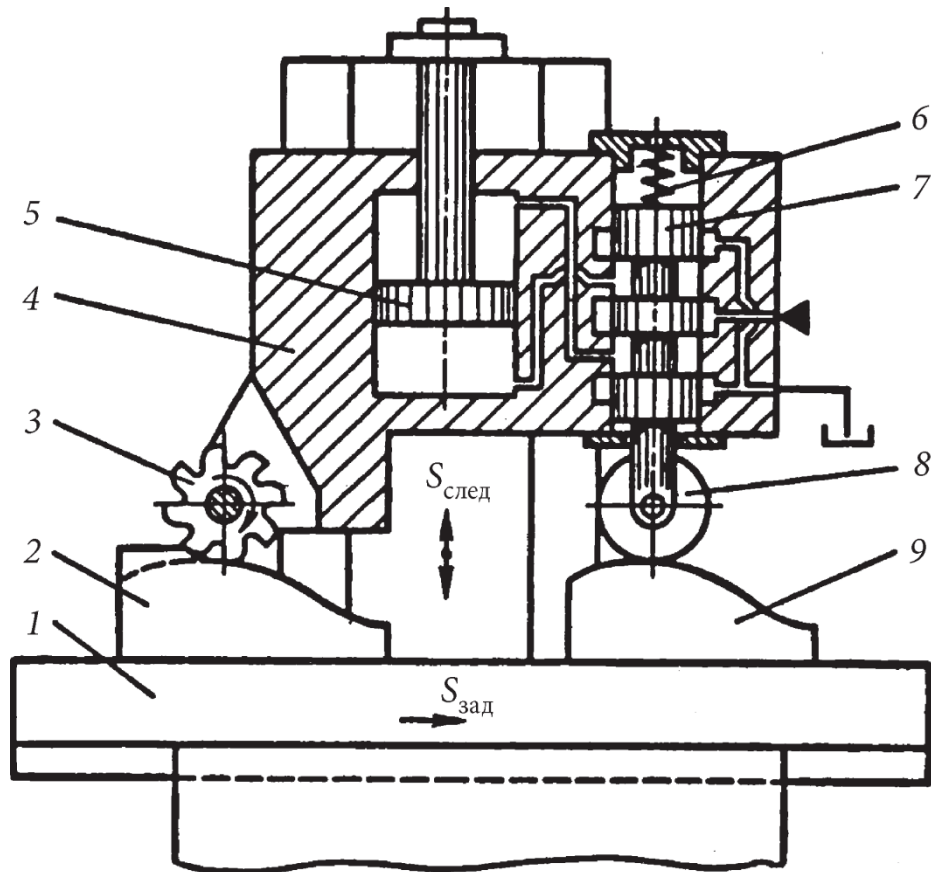


Рис. 4.13. Схема гидравлической копировальной системы фрезерного станка:

1 — стол станка; 2 — деталь; 3 — инструмент (фреза);
4 — каретка; 5 — поршень гидроцилиндра; 6 — пружина; 7 — золотник; 8 — ролик;
9 — копир

Гидравлическая копировальная система фрезерного станка содержит инструмент 3 (фрезу), установленный на каретке 4, которую перемещает гидроцилиндр с поршнем 5. Шток поршня неподвижно закреплен на станине станка. Золотник 7 дросселирующего распределителя пружиной 6 прижат через ролик 8 к фасонной поверхности копира 9. Обрабатываемая деталь 2 и копир 9 закреплены на столе 1 станка, перемещающемся со скоростью задающей подачи $S_{зад}$.

Золотник 7 имеет три **пояска** с четырьмя **рабочими кромками**, частично перекрывающими **кольцевые канавки** в корпусе. **Каналами** в корпусе **средняя** кольцевая **канавка** соединена с **напорной линией** гидросистемы, две **крайние** — с **сливной линией**, а **промежуточные полости** — с **полостями цилиндра**. Закон перемещения золотника определяется профилем копира, а каретка 4, отслеживая его перемещение, обеспечивает соответствующую подачу инструмента $S_{след}$ с усилием, достаточным для преодоления сил резания.

В положении, показанном на рис. 4.13, золотник своими поясками полностью перекрывает напорную и сливную линии. При перемещении стола 1 вправо золотник опускается, напорная линия соединяется с поршневой полостью цилиндра, а сливная линия — со штоковой полостью. Поскольку сам поршень неподвижен, то перемещается каретка вместе с инструментом, в данном случае — вниз, до тех пор, пока пояски золотника снова не перекроют напорную и сливную линии, т. е. пока каретка не отработает такое же перемещение, что и золотник. В результате **инструмент 3** в процессе обработки **движется по кривой**, точно **соответствующей задающей поверхности копира**.

Для применения в следящих гидроприводах разработан **управляющий золотник Г61—41** (рис. 4.14), встраиваемый в корпус дросселирующего распределителя. Он состоит из золотника 1 и гильзы.

Золотник имеет три пояска, а в гильзе выполнены три внутренних кольцевых канавки и пять внешних канавок. Радиальными отверстиями внешние канавки соединены с внутренними канавками и промежуточными полостями 3 и 4. Каналами в корпусе распределителя средняя внешняя канавка гильзы соединяется с напорной линией, две крайние — со сливной, две промежуточные — с камерами гидродвигателя.

Левым концом золотник взаимодействует с пружиной, а правым через промежуточные передаточные звенья — с копиром, толкателем и т. п.

Техническая характеристика управляющего золотника дана в табл. 4.12.

Широкое распространение в гидросистемах получили **электро- управляемые дросселирующие распределители** типа Г68—1, предназначенные для изменения величины и направления потока рабочей жидкости с большой гидравлической мощностью в соответствии с управляющими электрическими сигналами малой мощности [7]. Здесь они подробно не рассматриваются. Необходимо лишь отметить следующие их конструктивные особенности.

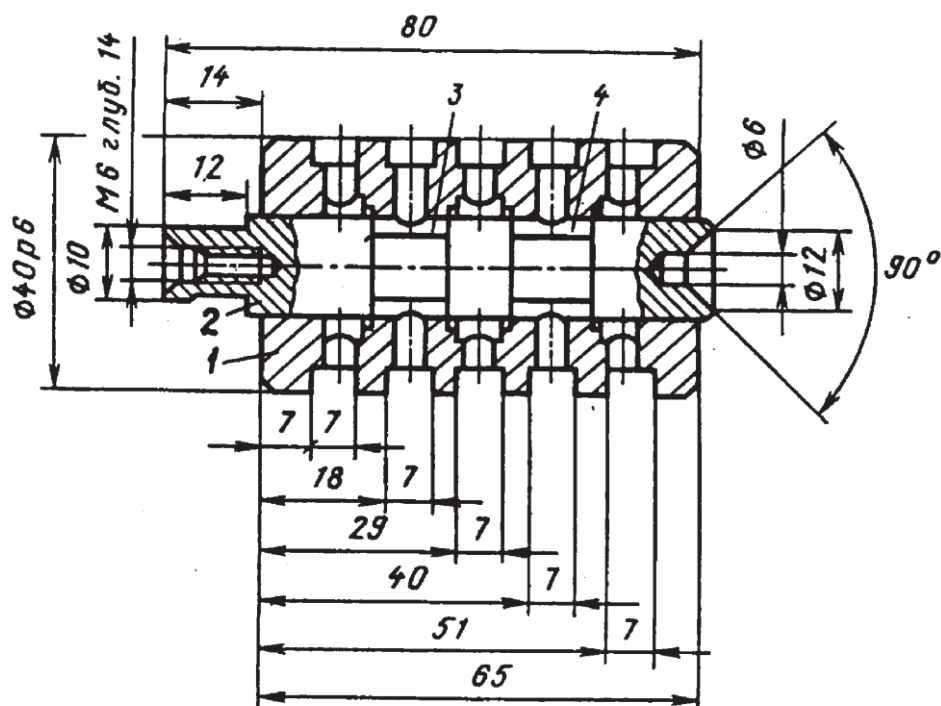


Рис. 4.14. Управляющий золотник Г61—41

Таблица 4.12

Техническая характеристика управляющего золотника Г61—41

Параметр	Величина
Расход номинальный, $\text{дм}^3/\text{мин}$	20
Давление максимальное, МПа	6,3
Диаметральный зазор в сопряжении «золотник — гильза», мкм	15...20
Наружная утечка по зазорам при подпоре в сливной линии 0,2МПа, $\text{дм}^3/\text{мин}$, не более	0,001
Масса, кг	0,45

Во-первых, распределители Г68—1 имеют систему промежуточного гидравлического управления (по сути — гидравлический усилитель), через которую электромагнит воздействует на золотник.

Во-вторых, масло, выходящее в сливную линию, пропускается через реактивную турбинку типа «сегнерово колесо», закрепленную на золотнике и заставляющую его непрерывно вращаться с частотой около 300 об/мин. Таким образом, исключается сухое трение в паре «золотник — гильза».

Основные параметры распределителей Г68 — 1 приведены в табл. 4.13.

Таблица 4.13

Основные параметры дросселирующих распределителей Г68—1

Параметр	12Г68—11	12Г68—12	12Г68—13
Расход номинальный, дм ³ /мин	6,3	20	32
Давление рабочее, МПа	6,3		
Максимальная мощность сигнала управления, Вт	0,42	1,0	1,82
Расход в линии управления, дм ³ /мин	1,2		
Утечки на слив в закрытом положении при рабочем давлении, дм ³ /мин	2,0		
Габаритные размеры, мм:			
длина	170		
ширина	100		
высота	205		
Масса, кг	10		

Вспомогательные устройства гидроприводов

Гидроаккумуляторы

Гидроаккумулятором называется устройство, служащее для **накопления гидравлической энергии** в период пауз в ее потреблении агрегатами гидросистемы. Использование гидроаккумулятора позволяет **понижить мощность насоса** до усредненной по времени мощности гидродвигателей. В системах с эпизодическим включением гидродвигателей наличие гидроаккумулятора дает возможность обеспечить **паузы в работе** питающего **насоса**. Кроме того, в ряде мехатронных систем с гидроприводом высокое **давление** жидкости **в гидродвигателе** рабочего органа должно поддерживаться **постоянным при отключении двигателя от насоса**, что также становится возможным при наличии в системе гидроаккумулятора.

Накопленная в аккумуляторе энергия может быть отдана в очень короткое время, поэтому **гидроаккумулятор способен** кратковременно **развивать высокую мощность**. Применение этих агрегатов особенно целесообразно в системах с большими пиками расхода жидкости, величины которых в некоторых случаях во много раз превышают средний расход жидкости.

По способу создания давления различают грузовые, пружинные и пневматические гидроаккумуляторы.

Грузовой аккумулятор представляет собой цилиндр, поршень которого находится под воздействием груза. Давление жидкости определяется весом груза и площадью поршня.

В **пружинном** аккумуляторе давление жидкости создается усилием пружин, действующим, как и вес груза в грузовом аккумуляторе, на поршень цилиндра.

В пневматическом аккумуляторе (**пневмогидроаккумуляторе**) накопление энергии происходит за счет сжатия газа, обычно — воздуха, реже — азота.

Конструкции пневмогидроаккумуляторов следует рассмотреть более подробно.

В соответствии с типом разделителя сред аккумуляторы могут быть **поршневыми** (рис. 4.15, а) и **диафрагменными** (рис. 4.15, б). Более простым по конструкции считается поршневой. Недостатками его являются трение поршня в цилиндре и утечки жидкости в газовую полость. Этих недостатков лишен аккумулятор, роль разделителя в котором выполняет гибкая мембрана, или диафрагма. Поскольку сопротивление деформации диафрагмы незначительно, то диафрагменные аккумуляторы безынерционны и пригодны для применения в качестве гасителей высокочастотных пульсаций расхода.

Грузовые и пружинные гидроаккумуляторы больших объемов изготавливать нецелесообразно: они становятся весьма массивными и крупногабаритными. Наиболее широкое распространение в машиностроении вообще и в гидросистемах мехатронных модулей в частности получили пневмогидроаккумуляторы. Например, серийно выпускаются поршневые пневмогидроаккумуляторы АР на давления 16 МПа и 32 МПа емкостью от 0,4 дм³ до 100 дм³ [7].

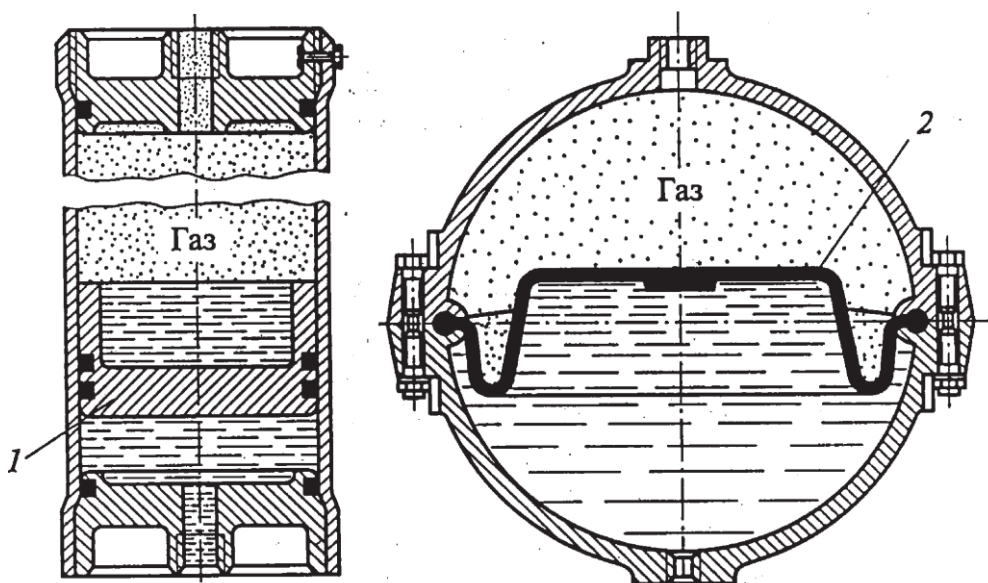


Рис. 4.15. Пневмогидроаккумуляторы: а — поршневой; б — диафрагменный;
1 — поршень; 2 — диафрагма

При подаче жидкости из пневмогидроаккумулятора в систему объем сжатого газа в нем увеличивается, соответственно увеличению объема падает давление. Емкость аккумулятора принимается из условия снижения давления в процессе работы гидросистемы не более чем на 25 % максимального значения (иначе говоря, максимальное давление в аккумуляторе должно превышать номинальное давление насоса не более чем в 1,33 раза).

Резервуары для рабочей жидкости

Резервуар для рабочей жидкости (**маслобак**) является ответственным узлом гидросистемы, так как от правильности его исполнения зависит надежность и долговечность входящих в систему агрегатов. К сожалению, авторы учебной литературы зачастую не уделяют конструкциям маслобаков достойного внимания.

Выделяющееся во время работы агрегатов тепло рассеивается через стенки маслобака, поэтому его **объем** оказывает значительное влияние на тепловой режим гидропривода.

Среднее количество теплоты, выделяемое гидроприводом в единицу времени (средняя **тепловая мощность**), определяют по формуле

$$P_{\text{тепл}} = (P_{\text{дв}} - P) \text{ ПВ}, \quad (4.13)$$

где $P_{\text{дв}}$ — мощность на валу приводного электродвигателя насосной установки; P — суммарная полезная мощность одновременно работающих гидродвигателей; ПВ — продолжительность включения гидропривода (отношение времени работы под нагрузкой к общему времени цикла).

В табл. 4.14 даны значения объема бака в зависимости от $P_{\text{тепл}}$.

Таблица 4.14

Зависимость объема маслобака от тепловыделения в гидросистеме

Средняя тепловая мощность, кВт	0,6	1,0	1,4	1,8	2,2	2,6
Объем маслобака V , дм ³	50	130	220	320	420	540

Примечание: превышение температуры масла в баке над температурой окружающего воздуха 35 °С.

Выбранный объем должен быть округлен до ближайшего из ряда номинальных размеров $Ra10$, если это не противоречит требованиям технического задания на проектируемую мехатронную систему.

По рекомендации [7] **площадь поверхности** маслобака равна

$$A = 0,064V^{2/3}, \text{ м}^2, \quad (4.14)$$

где V — объем, дм³.

Очевидно, что во многих случаях возникает настоятельная необходимость уменьшения объема маслобака. Это возможно за счет **интенсификации** теплообмена между маслом и окружающим воздухом следующими способами:

- оребрение стенок бака (что эквивалентно увеличению площади теплоотдающей поверхности A);
- обдув бака струей воздуха от вентилятора;
- оснащение бака холодильником, выполненным, например, в виде помещенного в масло змеевика из тонкостенных трубок, по которым подается охлаждающая среда (обычно воздух или вода).

Для гидросистем мехатронных модулей наиболее приемлема комбинация двух первых способов.

Днище маслобака должно располагаться **на высоте не менее 100 мм над полом** для обеспечения теплоотдачи через поверхность днища.

Конец вводимой в бак **трубы сливной линии** необходимо удалить **на возможно большее расстояние от начала трубы всасывающей линии**, чтобы создать условия для перемешивания выходящего из сливного трубопровода нагретого масла с уже охлажденным. С этой же целью между концом сливной и началом всасывающей труб целесообразно установить в баке перегородку.

Глубина погружения труб в масло должна быть не менее четырех-пяти их диаметров, расстояние от дна — не менее двух диаметров, концы труб выполняются

со срезом под 45° . Это позволит предотвратить перемешивание масла с воздухом и с осадком.

В баке рекомендуется иметь **смотровые люки** размером не менее 200 x 200 мм.

Заливную горловину следует снабдить **фильтром** с тонкостью фильтрации 40—80 мкм.

Днище бака должно иметь **уклон к сливному отверстию**.

Маслобак также может быть снабжен указателем уровня масла, термометром и пр.

Фильтры

Опыт эксплуатации гидросистем показывает, что выполнение всех требований по поддержанию чистоты рабочей жидкости позволяет повысить надежность привода и снизить эксплуатационные расходы в два раза. Главную роль в очистке масла от твердых частиц играют фильтры различных типов.

Фильтры могут осуществлять полнопроточную или пропорциональную очистку масла во всасывающей, напорной или сливной линиях гидросистемы.

При **полнопроточной** очистке через фильтр проходит **вся жидкость** от насосной установки к силовым гидроагрегатам. **Пропорциональная** очистка подразумевает пропускание через фильтр части рабочей жидкости, т. е. расход фильтруемого масла составляет часть полного расхода насосной установки.

Фильтр, установленный **на всасывающей линии**, (его называют всасывающим, или приемным фильтром) обеспечивает эффективную защиту насоса от сравнительно крупных частиц, его значение очень велико. К сожалению, **приемный фильтр**, являясь гидравлическим сопротивлением, **ухудшает условия всасывания насоса**, поэтому перепад давлений на нем не должен превышать 0,02 МПа. Отсюда следует, что, во-первых, использовать приемные фильтры нельзя в насосных установках с пластинчатыми насосами, чувствительными к сопротивлению на входе; во-вторых, эти фильтры требуют строгого выполнения правил обслуживания.

Фильтр, установленный **на сливной линии** (сливной фильтр), не создает нежелательного сопротивления во всасывающей линии насоса. Применение в гидросистеме только сливного фильтра оправдано в том случае, **если система** надежно **защищена от** попадания **загрязнений извне**. Если такой защиты нет, то необхо-

дима **комбинация всасывающего и сливного фильтров**. Оптимальным считается сочетание приемного фильтра на крупность частиц 80 мкм или 160 мкм со сливным на 10 мкм или 25 мкм.

Для защиты высокочувствительного к загрязнению элемента гидросистемы непосредственно перед ним **на напорной линии** устанавливают фильтр тонкой очистки (напорный фильтр). Через напорный фильтр проходит жидкость с высоким давлением, поэтому, в отличие от приемного и сливного фильтров, он имеет **высокопрочный корпус**.

Как свидетельствует практика, фильтр может эффективно защищать только тот элемент гидросистемы, который установлен непосредственно после него, а остальные получают лишь частичную защиту. По этой причине реальные системы содержат различные сочетания фильтров, например, всасывающего и сливного, о чем было сказано выше.

При выборе фильтров можно пользоваться следующими рекомендациями **по тонкости фильтрации**:

- ❖ насосы шестеренные на давление до 2,5 МПа; насосы и гидромоторы пластинчатые нерегулируемые на давления до 6,3 МПа — 40 мкм;
- ❖ насосы пластинчатые нерегулируемые на давления до 16 МПа; насосы пластинчатые регулируемые на давления до 6,3 МПа; насосы и гидромоторы аксиальнопоршневые на давления до 16 МПа; направляющая и регулирующая гидроаппаратура на давления до 20 МПа — 25 мкм;
- ❖ электрогидравлические следящие и шаговые модули; дросселирующие гидрораспределители — 10 мкм.

Особой разновидностью фильтров можно считать **магнитные очистители** (сепараторы, магнитные фильтры), предназначенные для задерживания находящихся в масле магнитных частиц. Включение сепараторов в гидросистемы высокоточных мехатронных модулей весьма желательно.

Активными элементами сепаратора являются постоянные магниты, задерживающие содержащиеся в масле ферромагнитные частицы. Со временем проходное сечение сепаратора уменьшается, тем более, что он задерживает также и определенное количество немагнитных частиц. Поэтому сепараторы рекомендуется очищать через каждые 500 ч работы.

Трубопроводы

Основные термины

Все трубопроводы могут быть разделены на **простые** и **сложные**. Простым называется трубопровод без разветвлений, а сложным — имеющий хотя бы одно разветвление (или место смыкания труб).

Любое изменение сечения или поворот трубопровода являются **местными сопротивлениями** течению жидкости.

Пусть трубопровод содержит несколько участков, различающихся длиной, сечением и местными сопротивлениями. Если начало участка соединено с концом предыдущего, а конец — с началом последующего, то такое соединение участков называется **последовательным**. Если же участки имеют общее начало (место разветвления) и общий конец (место смыкания), то такое соединение участков называется **параллельным**.

Совокупность нескольких труб, имеющих одно общее сечение (место разветвления или смыкания), называется **разветвленным трубопроводом**.

Различают **разомкнутые** и **замкнутые** трубопроводы. По разомкнутому трубопроводу жидкость перекачивается из одной емкости в другую. В замкнутом трубопроводе циркулирует одно и то же количество жидкости.

Трубопровод, по которому жидкость поступает из резервуара (маслобака) к насосу, называется **линией всасывания**. Трубопровод, по которому жидкость движется от насоса к силовым гидроагрегатам, **называется линией нагнетания**. Трубопровод, по которому жидкость возвращается от силовых гидроагрегатов в маслобак, **называется линией слива**.

В большинстве случаев трубопровод ММ с гидроприводом можно классифицировать как сложный замкнутый трубопровод, содержащий как последовательно, так и параллельно соединенные участки.

Параметры потока жидкости в трубопроводе. Уравнение Бернулли

Полное давление жидкости в некотором сечении трубопровода равно

$$p = p_a + p_{изб}, \quad (4.16)$$

где p_a — атмосферное давление; $p_{изб}$ — избыточное давление.

На входе и выходе трубопровода величина p_a одна и та же, поэтому при расчетах ее обычно не учитывают и под **давлением жидкости** понимают $p_{изб}$.

С другой стороны,

$$p = p_{ст} + p_{дин}, \quad (4.17)$$

где $p_{ст}$ — статическое давление; $p_{дин}$ — динамическое давление (скоростной напор).

Динамическое давление (в паскалях) равно

$$p_{дин} = \rho v^2 / 2, \quad (4.18)$$

где ρ — плотность жидкости, кг/м^3 ; v — скорость жидкости в рассматриваемом сечении, м/с .

Полезно сопоставить порядки величин слагаемых в формуле (4.17). В гидроприводах вообще и в гидроприводах ММ в частности скорости потока редко превышают 5 м/с. Но пусть скорость достигает величины 10 м/с. В качестве рабочей жидкости обычно используют минеральное масло, плотность которого $\rho \approx 0,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Тогда вычисленное по (1.3) динамическое давление в сечении $p_{дин} = 4 \cdot 10^4 \text{ Па} = 0,04 \text{ МПа}$. Статическое давление в гидроприводе общего назначения не ниже 6,3 МПа, а в специальных гидроприводах нередко превышает 25 МПа. Пусть его величина составляет 10 МПа. Таким образом,

$$p_{\text{ст}}/p_{\text{дин}} = 10/0,04 = 250. \quad (4.19)$$

Совершенно очевидно, что в подавляющем большинстве случаев скоростной напор при расчетах можно во внимание не принимать и считать $p \approx p_{\text{ст}}$.

На рис. 4.16 показан участок трубопровода переменного сечения, по которому движется реальная жидкость. Обозначения: v_1, v_2 — скорости потока в сечениях 1—1 и 2—2; s_1, s_2 — площади сечений; p_1, p_2 — статические давления в сечениях.

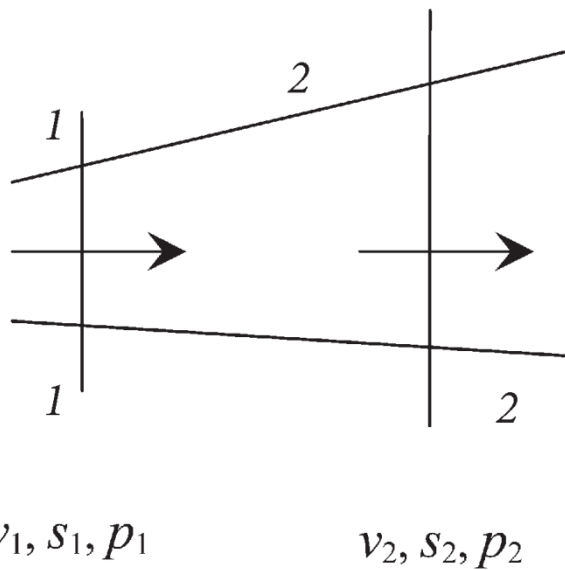


Рис. 1.1. Поток в трубопроводе переменного сечения

Условие неразрывности (сплошности) потока выражается равенством

$$v_1 s_1 = v_2 s_2 = Q, \quad (4.20)$$

где Q — **расход жидкости** в трубопроводе, $\text{м}^3/\text{с}$.

Плотность жидкости при перепадах давления в гидросистеме изменяется незначительно, поэтому полное давление в сечении 1—1 равно

$$p_{1-1} = p_1 + \rho v_1^2/2, \quad (4.21)$$

то же — в сечении 2—2:

$$p_{2-2} = p_2 + \rho v_2^2/2. \quad (4.22)$$

Из закона сохранения энергии потока следует, что

$$p_1 + \rho v_1^2/2 = p_2 + \rho v_2^2/2 + \Delta p, \quad (4.23)$$

где Δp — падение давления в результате сопротивления течению жидкости по трубопроводу на участке, ограниченном сечениями 1—1 и 2—2.

Выражение (4.23) называется **уравнением Бернулли для участка трубопровода**.

Причины возникновения сопротивления следующие:

- трение частиц жидкости при относительном движении (жидкостное трение);
- шероховатость стенок трубопровода;
- местные сопротивления (диафрагмы, щели, повороты и пр.).

Падение давления на местном сопротивлении выражается формулой

$$\Delta p_i = \xi_i \rho v_i^2/2, \quad (4.24)$$

где ξ — коэффициент, зависящий от вида местного сопротивления; i — индекс сечения, в котором расположено сопротивление.

В качестве примера можно привести внезапное сужение трубопровода, для которого, согласно [18],

$$\xi = 0,5 (1 - s_2/s_1), \quad (4.25)$$

где s_1 — площадь сечения до сужения русла; s_2 — площадь уменьшенного сечения.

Коэффициенты ξ для других часто встречающихся местных сопротивлений даны в [18].

Полное сопротивление трубопровода

Сопротивление течению жидкости по прямолинейному участку трубопровода определяют по формуле

$$\Delta p = \lambda l \rho v^2 / (2d), \quad (4.26)$$

где λ — коэффициент сопротивления; l — длина рассматриваемого участка; d — внутренний диаметр трубы.

Значение коэффициента λ зависит от скорости и характера течения жидкости (ламинарное течение или турбулентное). Практически в промышленных гидросистемах ламинарное течение реализуется очень редко. Это объясняется как высокими скоростями жидкости, так и **начальной турбулентностью** уже в момент входа жидкости из насоса в линию нагнетания. Поэтому расчеты реальных трубопроводов производятся в предположении о турбулентном характере течения. Далее под λ подразумевается его величина при турбулентном режиме.

Величина λ зависит от ряда факторов, в том числе — от шероховатости поверхности трубы.

Коэффициент сопротивления **гладкой трубы** с незначительной шероховатостью поверхности может быть определен по одной из следующих формул:

$$\lambda = 0,3164Re^{-0,25} — \text{ для } 2300 \leq Re \leq 10^5; \quad (4.27)$$

$$\lambda = (1,8 \lg Re - 1,5)^{-2} — \text{ для } 2300 \leq Re \leq 10^6, \quad (4.28)$$

где $Re = \nu d/\nu$ — число Рейнольдса; ν — кинематическая вязкость жидкости (см. п. 4.5.4).

К гладким относятся стеклянные трубы, а также цельнотянутые трубы из цветных металлов и высококачественные бесшовные стальные.

В тех случаях, когда используются стальные или чугунные трубы обычного качества, имеющие **значительную высоту неровностей**, λ определяют по формуле

$$\lambda = 0,1 (1,46k_{\text{э}}/d + 100/Re)^{0,25}, \quad (4.29)$$

где $k_{\text{э}}$ — эквивалентная высота неровностей (для стальных труб принимают $k_{\text{э}} = 0,1 \dots 0,5$ мм в зависимости от диаметра; для чугунных — $k_{\text{э}} = 0,2 \dots 1,0$ мм).

Сопротивление трубопровода при последовательном соединении участков определяют следующим образом.

Расход жидкости на каждом участке равен расходу в трубопроводе в целом, т. е.

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_i = Q, \quad (4.30)$$

а сопротивление трубопровода равно сумме сопротивлений участков

$$\Sigma \Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots + \Delta p_i = \Sigma \rho v_i^2 (\lambda_i l_i / d_i + \xi_i) / 2. \quad (4.31)$$

В случае **параллельного соединения участков** расход жидкости в трубопроводе равен сумме расходов на участках

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i = Q, \quad (4.32)$$

а сопротивление трубопровода равно сопротивлению каждого участка в отдельности

$$\Delta p = \Delta p_1 = \Delta p_2 = \dots = \Delta p_i = \rho v_i^2 (\lambda_i l_i / d_i + \xi_i) / 2. \quad (4.33)$$

Расчет сопротивления трубопровода при параллельном соединении участков несколько сложнее, чем при последовательном, так как при его выполнении следует решать систему уравнений.

В самом общем случае трубопровод содержит как параллельно, так и последовательно соединенные участки. При определении сопротивления такого трубопровода важно правильно разбить его на укрупненные участки, для каждого из которых справедлива либо формула (4.30), либо формула (4.32), найти сопротивления этих укрупненных участков и уже затем — трубопровода в целом.

Рабочие жидкости

В гидроприводах ММ применяются различные жидкости в зависимости от условий работы модуля. Наибольшее распространение получили **минеральные масла** по ГОСТ 20799—88 и ТУ 38.101413—78 [20, 21], представляющие собой продукты нефтепереработки с добавками (**присадками**).

Примеры: масло И-Г-А-32 ГОСТ 20799—88, масло И-Т-Д-680 ТУ 38.101413—78. В обозначениях: И — индустриальное; Г — для гидросистем; Т — для тяжело нагруженных узлов; А — без присадок; Д — с антикоррозионными, антиокислительными, противозадирными и противоизносными присадками; число (32; 680) — значение кинематической вязкости при температуре 40 °С.

Минеральные масла используются, как правило, при температурах не выше 100 °С. Если же модуль предназначен для эксплуатации при

более высоких температурах, в качестве рабочих принимают **кремнийорганические** (силиконовые) **жидкости**.

Далее рассматриваются основные характеристики минеральных масел.

Плотность применяемой в гидроприводах гаммы минеральных масел лежит в диапазоне $\rho = (0,84 \dots 0,96) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ (при температуре 15°C). По плотности масла условно разделяют на **легкие** (ρ ближе к нижней границе диапазона) и **тяжелые** (ρ ближе к верхней границе). Вязкость легких масел меньше, чем тяжелых.

Вязкость характеризует силы жидкостного трения. **Динамической вязкостью** μ называется сила сопротивления перемещению одного слоя жидкости относительно другого со скоростью 1 см/с при площади участка слоев 1 см^2 и расстоянии между ними 1 см . Размерность — паскаль на секунду ($\text{Па}\cdot\text{с}$).

Чаще используют уже упомянутую кинематическую вязкость

$$\nu = \mu/\rho. \quad (4.34)$$

Размерность кинематической вязкости — сантистокс (сСт), $1 \text{ сСт} = 1 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Вязкость сильно зависит от температуры масла: с повышением температуры вязкость падает. Это необходимо учитывать в модулях, работающих в напряженном температурном режиме.

Модуль упругости на сжатие E зависит от температуры: с повышением температуры уменьшается [18] по закону, близкому к экспоненте с уравнением

$$E = E_0 e^{-k\Delta t}, \quad (4.35)$$

где E_0 — исходное значение модуля упругости; k — эмпирический коэффициент; Δt — изменение температуры.

При 20°C $E = (1,4 \dots 1,7) \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

Для модуля с высокими давлениями в гидросистеме и малыми скоростями перемещения выходного звена влияние сжатия масла зачастую весьма велико и должно учитываться в расчетах.

Коэффициент температурного расширения жидкости определяют по формуле

$$\beta = \Delta V/(V\Delta t), \quad (4.36)$$

где ΔV — изменение объема жидкости; V — начальный объем жидкости.

Значение β минеральных масел увеличивается с уменьшением плотности. Кроме того, β зависит от давления масла [18]. Зависимость $\beta(p)$ с точностью до 3 % аппроксимируется прямой с уравнением

$$\beta(p) = \beta - a_p p, \quad (4.37)$$

где β — коэффициент температурного расширения при атмосферном давлении; a_p — коэффициент пропорциональности.

Учет (4.35) и (4.37) дает формулу для определения относительного изменения объема масла при совместном действии двух факторов — температуры и давления:

$$\Delta V/V = (\beta - a_p p)\Delta t - pE^{k\Delta t}/E_0. \quad (4.38)$$

Коэффициент температурного расширения минеральных масел при атмосферном давлении $\beta = (6...8) \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$.

3. Методика проектирования гидросистем мехатронных модулей

Исходные данные

Исходные данные для проектирования гидросистемы содержатся в Техническом задании на ММ.

Формулировка технических требований к гидросистеме

В число технических требований к гидросистеме входят:

- усилие (крутящий момент) или мощность на рабочем органе;
- линейная (угловая) скорость рабочего органа;
- максимальная допустимая погрешность позиционирования;
- максимальная допустимая кинематическая погрешность перемещения рабочего органа (для реверсивных модулей, кроме того, мертвый ход);
- места расположения основных агрегатов гидросистемы — насосной установки и рабочего органа;
- необходимость регулирования; если регулирование необходимо, то его пределы;
- прочие требования (перепады температуры, условия безопасной эксплуатации, максимальные габариты и пр.).

Предварительный выбор элементов гидросистемы

На данном этапе проектирования еще не идет речь о конкретных марках входящих в систему силовых гидроагрегатов, аппаратов управления и т. п. Конструктор, анализируя технические требования, устанавливает, какие типы устройств этим требованиям удовлетворяют. Необходимо руководствоваться принципом многовариантности.

Пример 1. Согласно техническому требованию модуль должен обеспечивать поворот рабочего органа на 90° . Требование может быть реализовано: а) с помощью гидроцилиндра, воздействующего на рычаг; б) моментным гидроцилиндром.

Пример 2. Необходимо регулирование скорости рабочего органа. Его можно обеспечить: а) с помощью регулируемого насоса; б) с помощью регулируемого гидродвигателя; в) с помощью дроссельного регулятора.

Составление вариантов гидросхемы

Гидросхема составляется в нескольких вариантах в соответствии с наборами аппаратуры, принятыми на предыдущем этапе. Желательно, чтобы она давала представление о траектории трубопровода (изгибы, наличие гибких рукавов и т. п.), что позволит в дальнейшем оценить его гидравлическое сопротивление.

При составлении гидросхем следует использовать принятые условные обозначения элементов (см. Приложение).

Определение основных рабочих параметров и выбор марки гидродвигателя рабочего органа для каждого варианта

Основными параметрами являются давление и расход рабочей жидкости. Их следует определить из технических требований (этап 1), относящихся к рабочему органу. На данном этапе конструктор снова сталкивается с необходимостью рассматривать различные варианты.

Пример. Техническим требованием задана мощность P на выходном звене рабочего органа. Так как

$$P = pQn, \quad (4.39)$$

то ее можно реализовать различными сочетаниями p и Q . Если требуются минимальные габариты модуля, то целесообразно повышать давление с одновременным уменьшением расхода. Следует иметь в виду стандартные ряды давлений и расходов [1]. Наиболее часто принимают давления в диапазоне 6,3 – 25 МПа. Давление менее 6,3 МПа считают низким, более 25 МПа — высоким. В ММ, к которым требование особо малых габаритов не предъявляется, следует принимать средние давления (12,5 – 20 МПа).

По найденным значениям основных параметров принимают марку гидродвигателя применительно к каждому варианту гидросистемы.

Выбор марок гидроаппаратов

Ориентируясь на сочетания p и Q гидродвигателя рабочего органа, назначают марки аппаратуры управления и регулирования для каждого варианта.

Окончательный выбор варианта и уточнение гидросхемы

Рассматривают варианты гидросхемы с учетом конкретных типов гидродвигателя рабочего органа и гидроаппаратуры и оценивают их по критериям структурной сложности, количества утечек, кинематических погрешностей, трудоемкости обслуживания, надежности, стоимости.

Принимают оптимальный вариант, при необходимости корректируют гидросхему, определяют длины ее участков.

Определение диаметров труб и расчет сопротивления трубопровода

Выбор размера трубы для той или иной линии трубопровода производят с учетом рекомендаций по ограничению скорости потока в зависимости от давления в линии (табл. 4.15).

Таблица 4.15

Скорость потока в трубопроводе в зависимости от давления жидкости

Давление, МПа	2.5	6.3	16	32	63
Скорость, м/с, не более	2	3,2	4	5	6,3

Для сливных линий обычно принимают $v = 2\text{ м/с}$, для всасывающих линий — $v \leq 1,6\text{ м/с}$.

Затем по известному расходу жидкости в линии Q_i и принятой скорости v_i вычисляют внутренний диаметр трубы

$$d_i = 4,6(Q_i/v_i)^{0,5}. \quad (4.40)$$

Размеры труб высокого давления можно принимать по табл. 4.16.

После назначения диаметров линий трубопровода по формулам п. 4.5.3 находят сопротивление участков и полное сопротивление трубопровода.

Определение общего сопротивления сети и суммарных утечек

Общее сопротивление сети определяется как сумма сопротивлений трубопровода и гидроагрегатов, а утечки в сети — как сумма утечек в гидроагрегатах.

Таблица 4.16

Рекомендуемые размеры труб высокого давления

Номинальный расход, дм ³ /мин	Диаметр условного прохода, мм	$d_H \times s$, мм	
		стальная труба	медная труба
3,2	3	—	4 × 0,5; 6 × 0,8
12,5	8	12 × 2	8 × 1; 10 × 1
20	10	14 × 2	12 × 1; 14 × 1
50	16	20 × 2,5	18 × 1,5
80	20	25 × 3	22 × 2
200	32	40 × 4	—

Обозначения: d_H — наружный диаметр; s — толщина стенки.

Определение давления и производительности насосной установки

Давление, которое должен обеспечить насос, равно сумме давления гидродвигателя рабочего органа и общего сопротивления сети.

Производительность насосной установки равна расходу в гидродвигателе рабочего органа и суммарных утечек в сети.

Лекция

Тема 1.1.9. Тормозные устройства и направляющие мехатронных модулей

ВОПРОСЫ

13. Назначение и разновидности тормозных устройств.
14. Назначение и разновидности направляющих.

ЛИТЕРАТУРА

9. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: Учебник. – 2е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во «СТАНКИН», 2005. – 368 с.: ил. (Л3 с. 97-121).
10. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей: учеб.пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 336 с. (Л4 с.228-255).

1. Назначение и разновидности тормозных устройств

Тормозными называют устройства, которыми снабжают ММ для снижения скорости подвижного звена, остановки и удержания (фиксации) его в неподвижном состоянии.

При торможении накопленная в процессе разгона движущихся масс кинетическая энергия переходит в другие обратимые или необратимые виды энергии (потенциальную, тепловую). Тормозные устройства создают дополнительную силу и момент сопротивления, направленные против движения и совершающие отрицательную работу на участке торможения. Кинетическая энергия звеньев ММ частично или полностью преобразуется (поглощается или рассеивается), постепенно снижается скорость движущихся масс по мере их приближения к заданной точке останова, уменьшаются действующие на них динамические нагрузки и удары, что способствует устранению отскоков и колебаний рабочих органов.

В зависимости от природы сил торможения тормозные устройства разделяют на **механические, гидравлические, пневматические, электрические и комбинированные**. Механические тормозные устройства подразделяют на пружинные, резиновые, эластомерные, инерционные и фрикционные; гидравлические представляют собой устройства дроссельного регулирования; пневматические могут быть напорными и вакуумными (применяются редко); к электрическим относят электромагнитные, индукционные и гистерезисные, а также порошковые тормозные устройства с сухим и жидким наполнителем фрикционного и дроссельного типов; комбинированные представляют собой комплекс из двух или более типов перечисленных устройств (пневмогидравлические, пружинно-пневматические и др.).

Ко всем типам тормозных устройств ММ предъявляются следующие **основные требования** [1]:

- обеспечение заданного закона торможения;
- безударный останов и фиксация подвижных элементов в точках позиционирования;
- высокая надежность и долговечность конструкции;
- высокое быстродействие;
- простота и компактность конструкции;
- стабильность характеристик при изменении условий работы;

- малая чувствительность к изменению температуры, влажности, тормозимой массы, скорости;
- возможность настройки и доступность регулирования;
- удобство осмотра и обслуживания;
- низкая стоимость;
- минимальные габариты и масса.

Механические тормозные устройства

В механических тормозных устройствах силу сопротивления создают деформацией рабочих элементов (**упругие** тормозные устройства) или трением (**фрикционные** тормозные устройства).

В качестве упругих элементов наиболее часто применяют цилиндрические пружины сжатия, реже — растяжения. Распространение получили резиновые и резино-металлические, а также пенополиуретановые упругие элементы.

Основными рабочими элементами фрикционных тормозных устройств являются вращательные или поступательные пары трения.

Простейшее тормозное устройство образуют одна или несколько цилиндрических пружин, установленные либо непосредственно между функциональным звеном и упорами параллельно оси его движения, либо оформленные в виде отдельного конструктивного узла.

Силу сопротивления пружины вычисляют по формуле

$$F_{\text{пр}} = cx = c(x_0 + x_d) = F_0 + F_d, \quad (5.1)$$

где x — полная деформация пружины; x_0 — начальная деформация (поджатие) пружины; x_d — дополнительная деформация пружины; F_0 — начальная сила сопротивления пружины; F_d — дополнительная сила сопротивления пружины; c — жесткость, которая для цилиндрической витой пружины равна (Н/мм)

$$c = \frac{F}{x} = \frac{Gd^4}{8nD^3}, \quad (5.2)$$

G — модуль упругости 2-го рода материала пружины (для пружинных сталей $G=(7,85 \dots 8) \cdot 10^4$ МПа); d — диаметр проволоки пружины, мм; D — средний диаметр витка пружины, мм; n — число рабочих витков пружины.

Останов подвижного звена произойдет при равенстве кинетической энергии подвижного звена и потенциальной энергии упругой деформации пружины

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{cx^2}{2}. \quad (5.3)$$

К **достоинствам** пружинных устройств следует отнести возможность больших деформаций, сохранение характеристик под воздействием продолжительной статической нагрузки, нечувствительность к значительным перепадам температур. В то же время они обладают такими **недостатками**, как малое демпфирование, трудности регулирования (настройки) их силовой характеристики, начальное поджатие пружины приводит к возникновению скачка нагрузки на тормозимые массы.

Резиновые тормозные устройства обычно содержат несколько последовательно установленных элементов (рис. 5.1, а), состоящих из резиновых втулок 1 и металлических шайб 2. В зависимости от конструкции тормозных устройств резиновые втулки могут работать на сжатие (рис. 5.1, а, б) или сдвиг (рис. 5.1, в). Втулки, работающие на сжатие, обладают небольшой податливостью, но значительной нагрузочной способностью, втулки сдвига — наоборот, большой податливостью и сравнительно небольшой нагрузочной способностью.

Резина легко меняет форму при незначительном изменении усилия. В замкнутом объеме она ведет себя как несжимаемая жидкость. Поэтому для резиновых элементов, работающих на сжатие, должна быть предусмотрена возможность их деформации перпендикулярно к оси сжатия.

При одноосном сжатии резинового элемента с постоянным поперечным сечением (рис. 5.1, а, б) упругая сила сопротивления равна

$$F = \frac{chx}{h-x}, \quad (5.4)$$

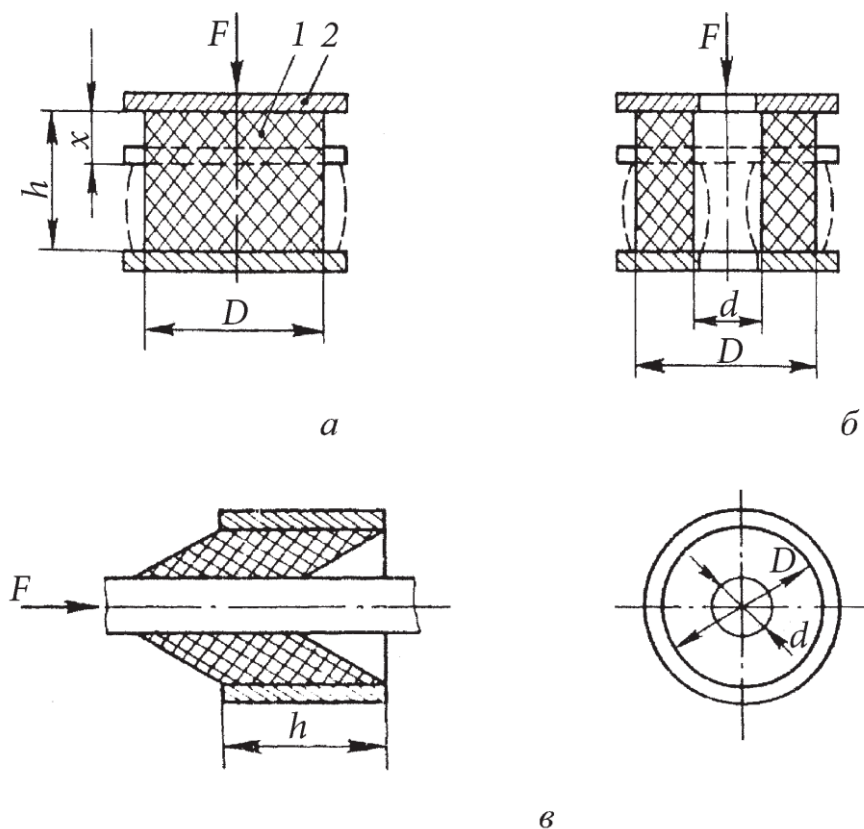


Рис. 5.1. Резиновые тормозные элементы

где c — продольная жесткость резины, Н/мм,

$$c = \frac{BEA}{h}, \quad (5.5)$$

E — динамический модуль упругости резины, равный $(0,6 \dots 1,0) \cdot 10^{-8}$ МПа; A — площадь поперечного сечения резинового элемента; h — высота недеформированного элемента; x — величина деформации элемента; B — коэффициент ужесточения, равный

$$B = 1 - f \cdot K_{\phi}, \quad (5.6)$$

f — коэффициент трения между резиной и материалом опоры ($f = 0,12 \dots 0,15$ для несмазанных поверхностей в паре «резина — сталь»); K_{ϕ} — коэффициент формы (для сплошных цилиндрических резиновых элементов с диаметром D и высотой h коэффициент $K_{\phi} = \frac{D}{4h}$; для резиновых втулок с наружным диаметром D и внутренним диаметром d $K_{\phi} = \frac{D-d}{4h}$).

Условие прочности резиновой втулки при сжатии

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{F}{A} \leq [\sigma]_{\text{сж}}, \quad (5.7)$$

где $[\sigma]_{\text{сж}}$ — допускаемое напряжение сжатия, для резины средней твердости $[\sigma]_{\text{сж}} = (2,5 \dots 5,0)$ МПа.

Для резинового элемента, работающего на сдвиг (рис. 5.1, в), упругую силу сопротивления определяют по формуле

$$F = c'x, \quad (5.8)$$

где c' — коэффициент жесткости резины на сдвиг, Н/мм,

$$c' = \frac{2\pi \cdot Gh}{\ln \frac{D}{d}}. \quad (5.9)$$

Условие прочности резиновой втулки, работающей на сдвиг, имеет вид:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{F}{\pi dh} \leq [\tau], \quad (5.10)$$

где $[\tau]$ — допускаемое напряжение сдвига резины при ударной кратковременной нагрузке; для резины средней твердости $[\tau] = (1 \dots 2)$ МПа.

Максимальное напряжение сдвига возникает на внутренней поверхности резиновой втулки.

Резино-металлические тормозные устройства **обладают** высокой надежностью, простотой конструкции и технологичностью изготовления, удобством обслуживания, большой энергоемкостью. К **недостаткам** следует отнести чувствительность к изменению температуры и влажности, «индивидуальность» технических характеристик (два элемента одинаковых размеров имеют различную жесткость).

Фрикционные тормозные устройства используют как для торможения и позиционирования в промежуточных точках, так и для удержания (фиксации) звеньев.

Главной особенностью фрикционных устройств является то, что они **преобразуют** значительную **часть кинетической энергии в тепловую**, которая рассеивается в окружающее пространство. Фрикционные устройства с упругими элементами накапливают небольшое количество потенциальной энергии, обуславливающей силу отдачи, а фрикционные устройства без упругих элементов полностью поглощают подведенную кинетическую энергию.

Конструкции фрикционных тормозных устройств весьма разнообразны. Они могут быть как автономными, так и встроенными в двигатель, управляемыми и неуправляемыми, нормально замкнутыми и разомкнутыми, одно- и двустороннего действия. Однако независимо от типа и конструкции они содержат одну или несколько фрикционных пар, при относительном движении элементов которых возникает сила трения. Обычно одно из звеньев фрикционной пары удерживают или укрепляют неподвижно относительно корпуса или другого узла, по отношению к которому осуществляется торможение.

Упруго-фрикционное тормозное устройство с цилиндрической пружиной и разрезной конической втулкой изображено на рис. 5.2. При перемещении штока 6 с коническим буртиком сегменты 5 скользят по внутренней цилиндрической поверхности корпуса 2, прижимаясь к ней с возрастающей силой вследствие сжатия пружины 3, расположенной между конической втулкой 4 и винтовой регулировочной втулкой 1.

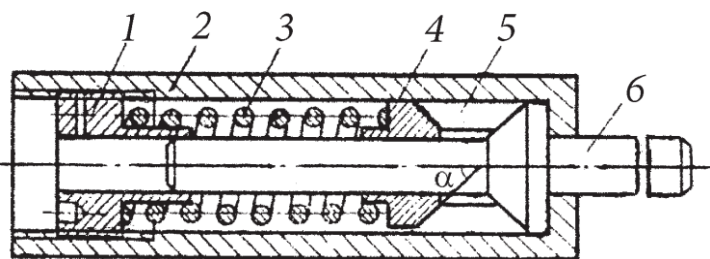


Рис. 5.2. Упруго-фрикционное тормозное устройство

Сила сопротивления перемещению стержня равна

$$F_{\text{сопр}} = F_{\text{пр}} + F_{\text{с.т}}, \quad (5.11)$$

где $F_{\text{пр}}$ — сила упругости пружины (формула (5.1)); $F_{\text{с.т}}$ — сила сухого трения между сегментами и корпусом

$$F_{\text{с.т}} = F_N \cdot f = \frac{2F_{\text{пр}} \cdot f(1 - f_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha)}{f_1 + \operatorname{tg} \alpha}, \quad (5.12)$$

F_N — сила нормального давления между сегментами и корпусом; f — коэффициент трения скольжения между цилиндрическими поверхностями сегментов и корпуса (табл. 5.1); f_1 — коэффициент трения скольжения между коническими поверхностями штока 6, втулки 4 и сегментов 5 (табл. 5.1); α — угол между образующей корпуса и осью штока.

После снятия нагрузки обратный ход штока происходит под действием силы упругости пружины.

Таблица 5.1

Допускаемое давление и коэффициент трения

Материалы фрикционных пар	Конусный тормоз		Дисковый тормоз	
	$[q]$, МПа	$f(f_f)$	$[q]$, МПа	$f(f_f)$
Закаленная сталь	—	—	2...4	0,1
Сталь — чугун	3...4	0,15	2...3	0,15
Сталь — бронза	5...6	0,05	4...5	0,05
Сталь — ферродо	1...2	0,3	2...2,5	0,3
Сталь — текстолит	4...5	0,2	5...6	0,2
Сталь — бронза	3...4	0,05	4...5	0,05

Фрикционный конусный тормоз (рис. 5.3) состоит из вращающегося конуса 1 с рабочим звеном, поступательно движущегося конуса 2 и пружины 3. Усилие пружины, необходимое для останова подвижного звена, находят по формуле

$$F_{\text{пр}} = cx = \frac{2KT \cdot \sin \alpha}{D_{\text{ср}} \cdot f}, \quad (5.13)$$

где $K = 1,25 \dots 1,5$ — коэффициент, учитывающий эксплуатационные условия; T — вращающий момент на конусе 1; f — коэффициент трения скольжения материалов конусов (табл. 5.1); α — угол наклона образующей конуса, во избежание заклинивания конусов его принимают из условия $\alpha > 12^\circ \dots 15^\circ$.

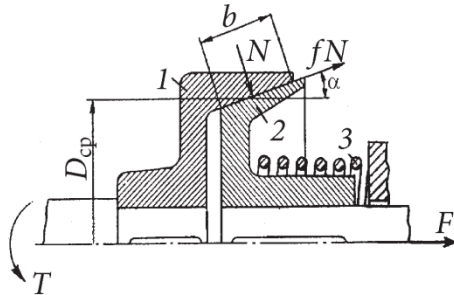


Рис. 5.3. Схема фрикционного конусного тормоза

Из условия износостойкости

$$q = \frac{2KT}{\pi D_{\text{ср}}^3 f \psi} \leq [q] \quad (5.14)$$

находят средний диаметр поверхности трения

$$D_{\text{ср}} \geq \sqrt[3]{\frac{2KT}{\pi [q] f \psi}}, \quad (5.15)$$

где q — давление между конусами; $[q]$ — допускаемое давление между конусами (табл. 5.1); ψ — коэффициент рабочей ширины дисков, $\psi = b/D = 0,15 \dots 0,25$.

Ширину поверхности трения находят по формуле

$$b = \frac{2KT}{\pi D_{\text{ср}}^2 f [q]}. \quad (5.16)$$

С другой стороны,

$$D_{\text{ср}} = (D_1 + D_2)/2, \quad (5.17)$$

где D_1 и D_2 — наименьший и наибольший диаметры поверхности трения соответственно:

$$D_1 = D_{\text{ср}} - b \sin \alpha; \quad (5.18)$$

$$D_2 = D_{\text{ср}} + b \sin \alpha. \quad (5.19)$$

Для растормаживания необходимо приложить усилие $F > F_{\text{пр}}$.

В дисковом фрикционном тормозе (рис. 5.4) диски 1 соединены с помощью шлицевого соединения с полумуфтой 2, а тормозные диски 3 — с полумуфтой 4. Зазор между дисками 1 и 3 рекомендуют принимать $\delta = 0,3 \dots 0,5$ мм. Диски имеют осевую подвижность. Под действием пружины 5 они смещаются и приходят в соприкосновение друг с другом, образуя фрикционные пары.

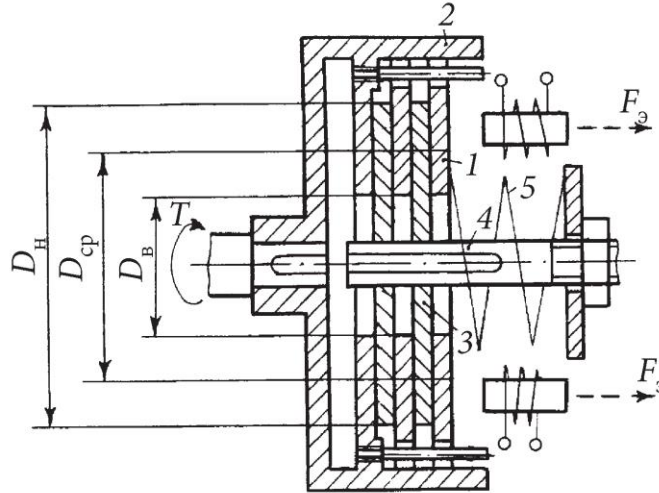


Рис. 5.4. Схема дискового фрикционного тормоза

Число фрикционных пар, необходимое для затормаживания подвижного звена, нагруженного вращающим моментом T , находят так же, как в конусном тормозе, из условия износостойкости

$$q = \frac{2KT}{\pi D_{\text{cp}}^3 f \psi Z} \leq [q], \quad (5.20)$$

откуда

$$Z \geq \frac{2KT}{\pi D_{\text{cp}}^3 f \psi [q]}, \quad (5.21)$$

где q — давление на трущихся поверхностях; D_{cp} — средний диаметр контактирующих поверхностей

$$D_{\text{cp}} = \frac{D_{\text{H}} + D_{\text{B}}}{2} = \frac{D_{\text{B}}}{1 - \psi}, \quad (5.22)$$

D_{H} — наружный диаметр кольца контакта дисков

$$D_{\text{H}} = D_{\text{cp}}(1 + \psi) = (3 \dots 5)d, \quad (5.23)$$

d — диаметр вала подвижного звена; $D_{\text{B}} = (0,5 \dots 0,6)D_{\text{H}}$ — внутренний диаметр контактирующих поверхностей;

ψ — коэффициент рабочей ширины дисков

$$\psi = \frac{D_{\text{cp}} - D_{\text{B}}}{D_{\text{cp}}} = \frac{b}{D_{\text{cp}}}, \quad (5.24)$$

принимают $\psi = 0,33 \dots 0,11$ (чаще всего $\psi = 0,25$); b — рабочая ширина дисков

$$b = \frac{D_{\text{H}} - D_{\text{B}}}{2} = \psi D_{\text{cp}}; \quad (5.25)$$

$[q]$ и f — см. табл. 5.1.

Число дисков в ведомой части тормоза

$$Z_{\text{BM}} = \frac{Z}{2} + 1, \quad (5.26)$$

в ведущей части

$$Z_{\text{ВЩ}} = \frac{Z}{2}. \quad (5.27)$$

Полученные Z , Z_{BM} , $Z_{\text{ВЩ}}$ округляют до целых чисел.

Необходимая сила пружины при числе Z фрикционных пар равна

$$F_{\text{пр}} = cx = \frac{3KT}{Zf} \cdot \frac{D_{\text{H}}^2 - D_{\text{B}}^2}{D_{\text{H}}^3 - D_{\text{B}}^3}. \quad (5.28)$$

Растормаживание (размыкание) осуществляют с помощью n электромагнитов, суммарное усилие которых должно быть больше силы пружины, т.е. $nF_{\text{э}} > F_{\text{пр}}$ ($F_{\text{э}}$ — усилие одного электромагнита).

В фрикционных тормозных устройствах нестабильность силы трения и изменение условий работы (скорости движения, величины движущихся масс) по сравнению с номинальными приводят к отклонению реального закона торможения от заданного, на который рассчитывалось тормозное устройство. Расхождение может оказаться значительным, если условия и режим работы меняются непрерывно. Поэтому устройства этого типа целесообразно использовать в ММ с достаточно стабильными режимами работы.

Для создания **тормозных устройств с программируемыми точками останова** и регулирования скорости движения выходного звена (поршня или цилиндра) (**позиционер**) используют встроенные в двигатель фрикционные механизмы. Они могут быть встроены в поршень или цилиндр и взаимодействовать с цилиндром, штоком или другими движущимися вместе с ними деталями.

Для осуществления программного останова выходного звена позиционера применяют управляемые фрикционные устройства, снабженные собственным приводом, который по команде системы управления замыкает или размыкает тормоз.

В **пневмопозиционере** (рис. 5.5) фрикционный тормоз является нормально замкнутым. В процессе позиционирования обе полости пневмоцилиндра соединены с атмосферой и пружины 1 прижимают плунжеры 2 с фрикционными накладками 3 к внутренней поверхности цилиндра. При подаче сжатого воздуха, например, в правую полость цилиндра шариковый клапан 5, предотвращая перетечку воздуха в левую полость, открывает ему доступ в кольцевой канал 4, соединяющий полости плунжеров 2, которые сжимают пружины и растормаживают поршень.

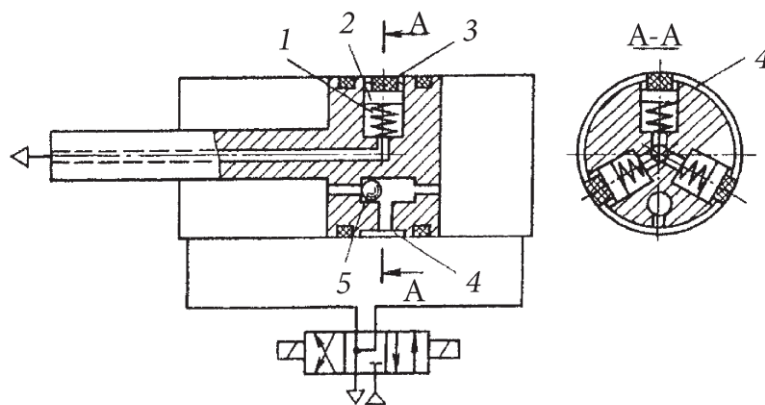


Рис. 5.5. Схема пневмопозиционера

Под действием давления воздуха в правой полости поршень перемещается влево. Для его остановки обе полости пневмоцилиндра соединяют с атмосферой. При этом давление в полости плунжеров и в обеих полостях пневмоцилиндра падает, фрикционные накладки прижимаются к поверхности цилиндра пружинами, тормозят и останавливают поршень.

5.3. Электромагнитные тормозные устройства

Для торможения подвижных звеньев используют управляемые электромагнитные тормозные устройства, в которых источником создания тормозящего момента или усилия является **электромагнитное поле**, воздействующее прямо на движущиеся элементы (электромагнитные, индукционные и гистерезисные тормоза) или косвенно через порошкообразный сухой или жидкий наполнитель (электромагнитные порошковые тормоза и тормоза с ферромагнитными жидкостями).

По принципу действия и устройству электромагнитные тормозные устройства **индукционного и гистерезисного** типов аналогичны электрическим двигателям, в которых ротор или статор неподвижен. Взаимодействие между подвижной и неподвижной частями тормоза осуществляется через электромагнитное поле, создаваемое катушкой управления (возбуждения).

По принципу действия электромагнитные тормозные устройства **с порошковым и жидким наполнителями** аналогичны соответственно фрикционным тормозам и гидравлическим тормозным устройствам дроссельного регулирования.

Действие электромагнитного порошкового тормоза фрикционного типа основано на свойстве сухого или взвешенного в масле ферромагнитного порошка увеличивать в магнитном поле свою вязкость и прочно прилипать к поверхности магнитной системы.

При относительном сдвиге рабочих поверхностей тормоза возникает сопротивление от трения намагниченных частиц порошка между собой. Наибольший сдвиг испытывают частицы, находящиеся в середине слоя. Сдвиг частиц относительно поверхностей, к которым они прилипают, отсутствует, следовательно, рабочие поверхности не изнашиваются. При отсутствии магнитного поля сопротивление сдвига порошка и взвеси падает, элементы тормоза оказываются практически несвязанными друг с другом.

Взвесь ферромагнитного порошка в кремнийорганическом или минеральном масле меняет свою вязкость в магнитном поле, благодаря чему при ее дросселировании достигается эффект переменного гидравлического сопротивления.

Рассмотрим устройство и принцип действия электромагнитного порошкового тормоза (рис. 5.6). Его корпус 1, сердечник 2 и крышка 4 выполнены из стали. Тонкостенный малоинерционный стальной цилиндрический ротор 9 укреплен на выходном валу, установленном в подшипниках 6.

На сердечнике намотана обмотка возбуждения 3. Полость, образованная корпусом и сердечником, в которой расположен ротор, заполнена ферромагнитным порошком. Уплотнение подшипников от проникновения порошка состоит из пропитанного кремнийорганической жидкостью фетрового кольца 7 и постоянного кольцевого магнита 8. Связь тормоза с подвижными элементами ММ осуществляют при помощи шестерни 5.

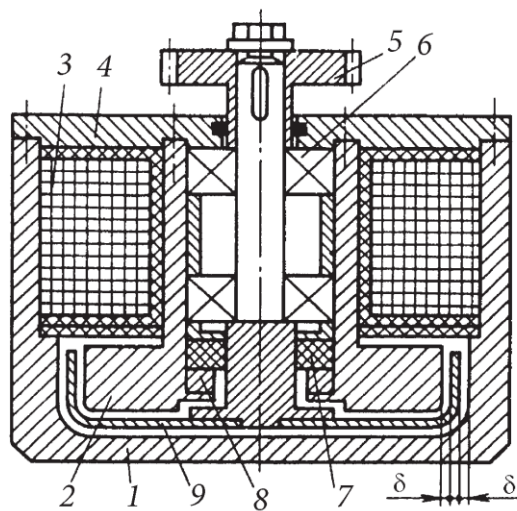


Рис. 5.6. Электромагнитный порошковый тормоз

Под действием электромагнитного поля, создаваемого катушкой управления, расположенный в зазорах порошок группируется и уплотняется. При сдвиге поверхностей ротора относительно стенок корпуса возникает сопротивление, обусловленное трением намагниченных частиц порошка. Удельное усилие сдвига, определяющее тормозной момент, зависит от магнитной индукции в рабочем зазоре, состава порошка и ряда конструктивных параметров тормоза.

Развиваемый тормозной момент практически прямо пропорционален току управления и слабо зависит от скорости скольжения. Тормоз с наружным диаметром 100 мм способен развить тормозной момент до 20 Нм при предельных окружных скоростях порядка 10...15 м/с. Остаточный момент при отсутствии тока управления составляет не более 0,5 % номинального момента.

Тормозной момент электромагнитного порошкового тормоза определяют по формуле, Нм,

$$T_{\text{ТР}} = \frac{\pi K_p K_B m D^3 P}{2}, \quad (5.29)$$

где K_p — коэффициент режима работы, равный 1,0 при жесткой фиксации подвижных элементов и 0,7...0,9 — при их проскальзывании; D — средний диаметр тормоза по рабочим зазорам, мм; $K_B = \frac{b}{D}$ — коэффициент относительной ширины рабочего зазора; m — число рабочих зазоров (число слоев порошка); P — удельная сила сцепления в рабочем зазоре, МПа,

$$P = K_M K_v K_z K_{\Pi} B_z^{\Pi}, \quad (5.30)$$

K_M — коэффициент, зависящий от материала наполнителя (для карбонильного железа и масла при объемном содержании железа в смеси 0,3...0,45 $K_M = 1$; для карбонильного чистого железа при содержании его в смеси 0,65 $K_M = 1,4$; для карбонильного железа и окиси цинка при содержании железа в смеси 0,5...0,65 $K_M = 1,1$; для карбонильного железа и двуокиси кремния с тем же содержанием железа $K_M = 1$); K_v — коэффициент, учитывающий линейную скорость движения частиц в зазоре и зависящий также от величины зазора (рис. 5.7); K_z — коэффициент, учитывающий влияние числа рабочих зазоров на плотность наполнителя (при числе зазоров 1, 2, 4, 6, 8 коэффициент K_z соответственно равен 1; 0,95; 0,9; 0,8; 0,7); B_z — величина электромагнитной индукции; K_{Π} и Π — величины, зависящие от плотности наполнителя и размера зазора (рис. 5.8).

На рис. 5.8 δ — рабочий зазор, равный 0,5...3,0 мм (см. рис. 5.6).

Намагничивающую силу Iw (ампер-витки), необходимую для создания индукции B_z , определяют по формуле

$$J_w = \frac{B_3(m\delta + \alpha)}{\mu_3}, \quad (5.31)$$

где μ_3 — магнитная проницаемость зазора (рис. 5.9, штриховая кривая соответствует сухому наполнителю); α — коэффициент, зависящий от индукции B_3 и величины коэффициента K_B (рис. 5.10).

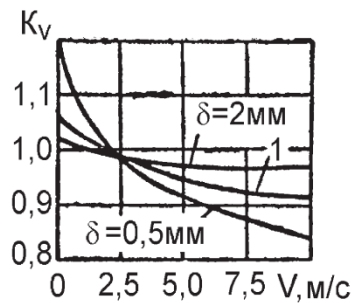


Рис. 5.7. Зависимость коэффициента K_v от линейной скорости

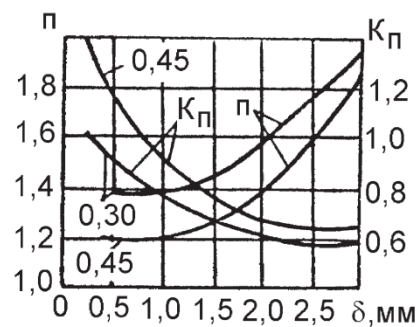


Рис. 5.8. Зависимость коэффициента K_{Π} и параметра Π от зазора

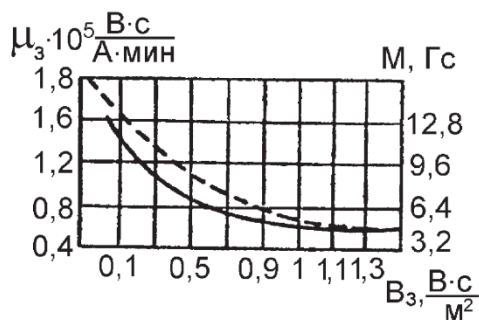


Рис. 5.9. Связь магнитной проницаемости зазора с индукцией

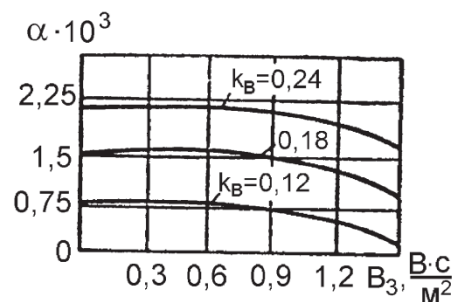


Рис. 5.10. Зависимость коэффициента α от индукции

В проектировочных расчетах можно принимать $P = 0,03 \dots 0,17$ МПа (большие значения P соответствуют меньшим значениям δ).

Электромагнитное тормозное устройство с ферромагнитной жидкостью дроссельного типа (рис. 5.11) состоит из гидроцилиндра 2, поршня 7 с катушкой возбуждения 6 и штока 1, возвратной пружины 9, плавающего поршня 4, поджатого пружиной 3. Рабочая 8 и ком-

пенсационная 5 полости заполнены ферромагнитной жидкостью. Цилиндр, поршень и шток выполнены из магнитного материала. Обмотки возбуждения проложены в пазах на поршне и соединены последовательно.

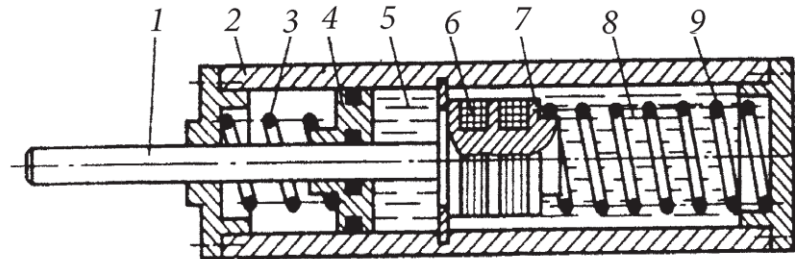


Рис. 5.11. Тормозное устройство дроссельного типа с ферромагнитной жидкостью

При движении поршня жидкость перетекает из одной полости в другую через узкий кольцевой канал между внутренней цилиндрической поверхностью цилиндра и поршнем. При отсутствии тока управления гидравлическое сопротивление канала, зависящее от его геометрических размеров и от вязкости намагниченной жидкости, определяет величину тормозного усилия и скорость поршня. Управление тормозным устройством сводится к изменению вязкости, а следовательно, и гидравлического сопротивления путем создания в кольцевом канале радиального магнитного поля заданной напряженности. Поле возникает под действием тока управления в обмотке возбуждения и концентрируется в зазоре магнитопровода, т. е. между поршнем и цилиндром.

Устройство может быть выполнено двусторонним, для чего следует снабдить поршень вторым штоком и удалить возвратную пружину.

2. Назначение и разновидности направляющих

Направляющими называют устройства, обеспечивающие заданное относительное движение элементов механизма.

В ММ в основном применяют **направляющие** для **поступательного движения**. Их используют тогда, когда необходимо осуществить перемещение одной детали относительно другой с заданной точностью. К направляющим предъявляют следующие **требования**:

- обеспечение плавности перемещения;

- незначительность сил трения;
- большой ресурс работы;
- износостойкость;
- работоспособность при резких перепадах температуры.

В зависимости от вида трения различают направляющие с трением **скольжения** и **качения**. Выбор типа направляющих и конструктивных схем зависит от таких факторов, как их назначение, требования к точности перемещения, допускаемая нагрузка, величины сил трения, стоимость изготовления, сложность монтажа, необходимость обслуживания.

Направляющие с трением скольжения и качения **по характеру (виду) воспринимаемой нагрузки** подразделяют на **открытые** и **закрытые**. К открытым относят направляющие, у которых для замыкания силовой цепи используют дополнительные прижимные усилия (масса подвижной детали, усилие плоской или спиральной пружины, мембраны). Закрытыми являются направляющие, у которых замыкание силовой цепи обеспечивается конструктивными факторами.

Направляющие **в зависимости от формы** исполнения **рабочих поверхностей** делят на цилиндрические, призматические, Н-, П-, Т-образные, в том числе призматические направляющие типа «*ласточкин хвост*».

Направляющие с трением скольжения

По конструктивному исполнению направляющие с трением скольжения проще направляющих с трением качения и меньше их по габаритным размерам. При соответствующем выборе материалов они не подвержены значительному влиянию температурных перепадов. Основной их недостаток — относительно большие потери на трение.

Пары скольжения образуют стали марок 40, 50, У8А с чугунами марок СЧ12, СЧ15, бронзами БрОС10—2, БрОФ10—1, БрОЦС, латунями. Предпочтительны следующие сочетания материалов: сталь — бронза, сталь — латунь, сталь — чугун. Если ММ работает при резких перепадах температуры, то для сопряжения деталей направляющих рекомендуют выбирать материалы с близкими значениями теплового коэффициента линейного расширения (см. табл. 6.1).

Конструктивные схемы закрытых направляющих скольжения приведены на рис. 6.1, а, в, г, а также на рис. 6.2, а-г.

а 1 2 3 б 12 3

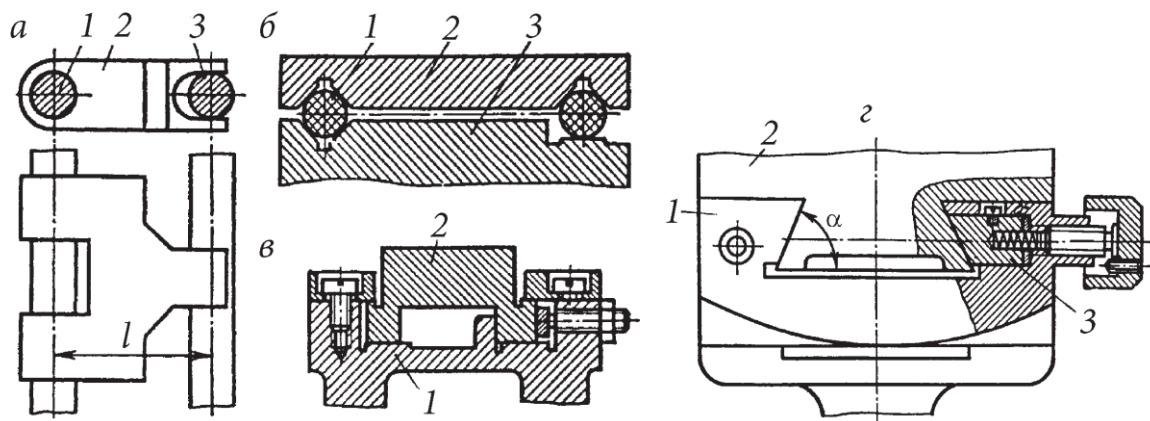


Рис. 6.1. Направляющие скольжения

В схеме на рис. 6.1, а по цилиндрическим направляющим 1 и 3 перемещается ползун 2 с цилиндрической и плоской рабочими поверхностями; по прямоугольным призматическим направляющим 1 (рис. 6.1, в) перемещается П-образная призма 2; по призматическим направляющим 1 типа «ласточкин хвост» с углом профиля α (обычно $\alpha = 60^\circ$) перемещается призма 2. Следует попутно заметить, что призматические направляющие типа «ласточкин хвост» требуют тщательной сборки и регулировки, так как незначительный перекося деталей может привести к заеданию направляющих.

Схема направляющей открытого типа показана на рис. 6.1, б: по цилиндрическим стержням 1, закрепленным на неподвижном основании 3, перемещается каретка 2 с призматическими рабочими поверхностями.

Цилиндрические направляющие 1 (рис. 6.2, а) изготавливают без устройства для предотвращения осевого проворачивания и с таковым устройством в виде планки 2 (рис. 6.2, б, в) или штифта 2 (рис. 6.2, г) с головкой, входящей в паз корпуса.

В призматических направляющих применяют призмы 1 с трапецевидным (рис. 6.3, а), прямоугольным или треугольным сечением. Регулировку зазоров в направляющих проводят с помощью планок или «сухариков». На схеме (рис. 6.3, б) сдвиг направляющих в боковом направлении устраняют с помощью выступа 1 и планки 2, а вертикальное перемещение — с помощью двух планок 3.

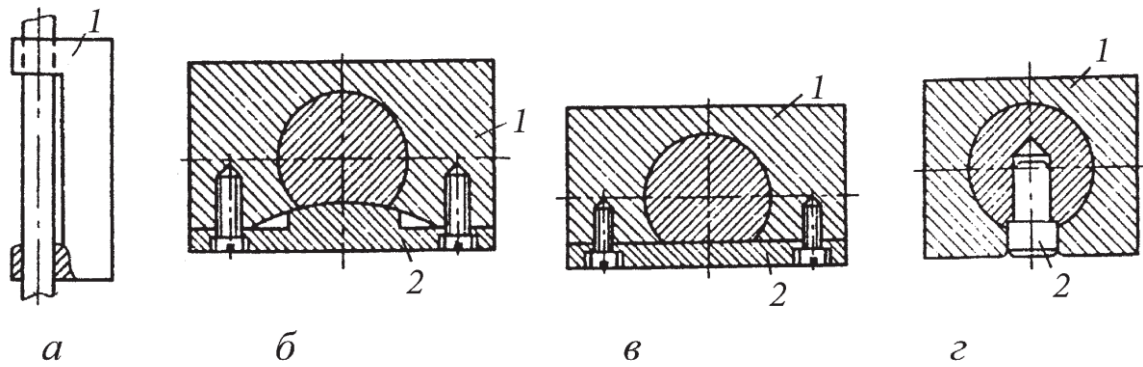


Рис. 6.2. Варианты исполнения закрытых направляющих скольжения

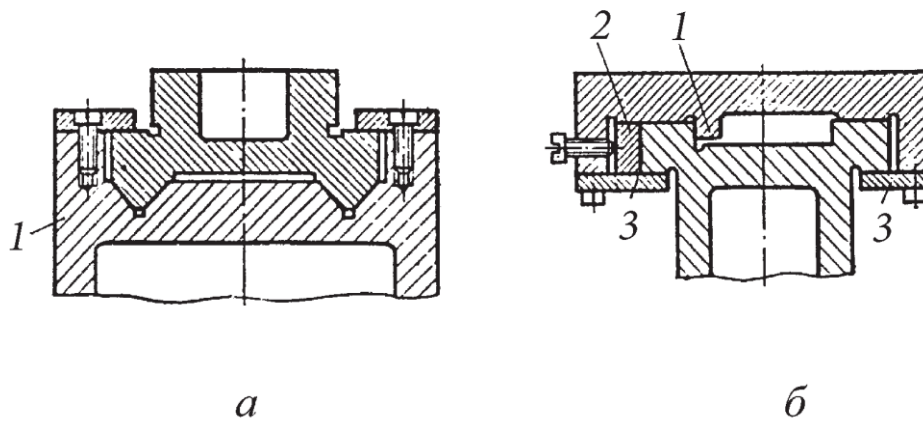


Рис. 6.3. Призматические направляющие скольжения

В направляющих, изображенных на рис.6.1, г регулировку зазора проводят с помощью «сухариков» 3.

Для проверки правильности выбора посадки и класса точности сопрягаемых деталей направляющих проводят проверочный расчет по формуле

$$\Delta = D_1[(1 \pm \alpha_1(t - t_0))] - D_2[(1 \pm \alpha_2(t - t_0))], \quad (6.1)$$

где Δ — минимальный зазор при данной температуре, мм; D_1 — наименьший при данном допуске диаметр (или линейный размер) охватывающей детали, мм; D_2 — наибольший при данном допуске диаметр (или линейный размер) охватываемой детали, мм; t_0 и t — соответственно начальная и конечная температура направляющих, °С; α_1 и α_2 — коэффициенты линейного расширения материалов сопрягаемых деталей (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Коэффициент α линейного расширения

Материал	Коэффициент $\alpha \times 10^{-6}$
Сталь: углеродистая легированная	11,5...12 20
Хром	9
Чугун	10,4
Бронза	17...18
Латунь	18,5...19,8
Медь	17
Серебро	19...19,7
Оргстекло	13

Знак «плюс» берут в том случае, когда $t > t_0$, знак «минус» — при $t < t_0$. Посадка считается допустимой, если $D > 0$. В случае заклинивания ($D < 0$) следует назначить более свободную посадку или применять материалы, имеющие одинаковые или мало различающиеся между собой температурные коэффициенты линейного расширения. В отдельных случаях можно уменьшить ширину или диаметр направляющих, но при этом должны соблюдаться требования жесткости и износостойкости конструкции.

Для предупреждения возможности заклинивания и уменьшения потерь на трение в направляющей необходимо, чтобы равнодействующая Q всех сил сопротивления (кроме сил трения) и движущая сила F (рис. 6.4) действовали по линии направления перемещения в плоскости направляющих и длина l направляющей превышала ширину H ползуна в два — три раза.

При конструировании направляющих возможно появление перекоса, который зависит от длины L между направляющими и плеча h приложения движущей силы F и ее направления, что приводит к заклиниванию (рис. 6.5, а). Если сила F приложена к ползуну на плече h параллельно направлению перемещения, то она создает момент $M = Fh$, уравновешиваемый моментом пары сил, образованных реакциями F_r в опорах.

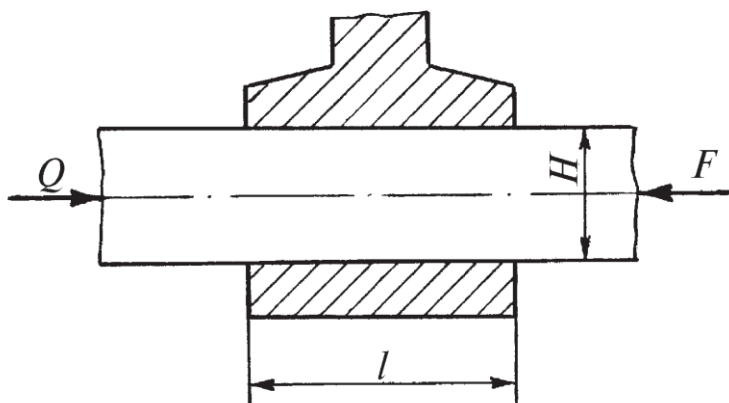


Рис. 6.4. Соотношение длины направляющей и ширины ползуна

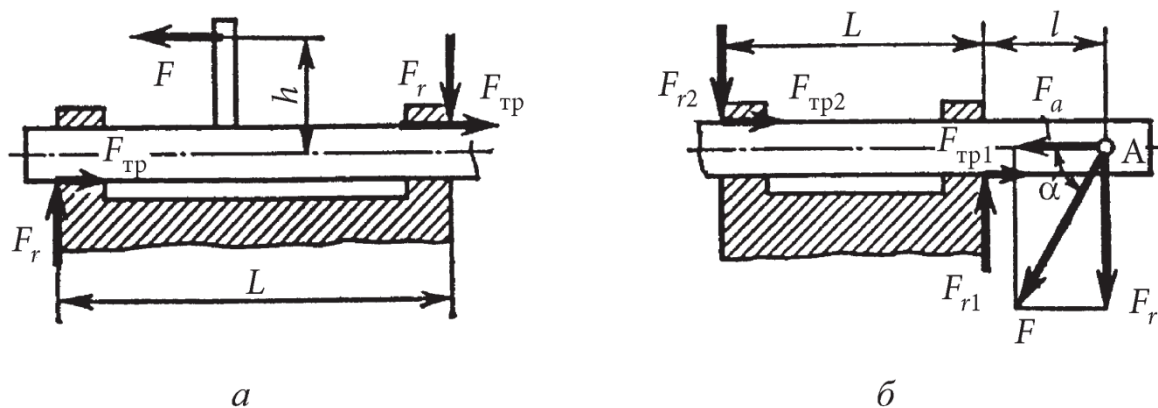


Рис. 6.5. Реакции со стороны направляющей на ползун

Уравнение равновесия ползуна имеет вид:

$$Fh = F_r \cdot L, \quad (6.2)$$

откуда реакции в опорах равны

$$F_r = \frac{Fh}{L}. \quad (6.3)$$

Полная сила трения равна

$$F_T = 2F_{\text{тр}} = 2F_r \cdot f = \frac{2Fhf}{L}, \quad (6.4)$$

где $F_{\text{тр}}$ — сила трения в одной направляющей; f — коэффициент трения скольжения.

Заклинивания не будет при условии $F_{\text{т}} \leq F$, т. е. $hf/L \leq 0,5$.

Для обеспечения плавности хода, малого износа рабочих поверхностей и отсутствия заклинивания необходимо выполнять следующие рекомендации:

для плоских направляющих прямоугольной формы

$$hf/L < 0,25; \quad (6.5)$$

для направляющих типа «ласточкин хвост» при угле профиля α

$$\frac{hf}{L \sin \alpha} < 0,25; \quad (6.6)$$

для направляющих цилиндрической формы

$$hf/L < 0,2. \quad (6.7)$$

Движущая сила, найденная из условия

$$F \geq Q + F_{\text{т}} = Q + \frac{2Fhf}{L}, \quad (6.8)$$

равна

$$F \geq \frac{Q}{1 - \frac{2hf}{L}}, \quad (6.9)$$

где Q — сила полезного сопротивления.

При приложении силы F под углом α к направлению перемещения (рис. 6.5, б) реактивные силы найдем из уравнений статики:

$$F_{r1} = \frac{F(L + \ell) \sin \alpha}{L}; \quad (6.10)$$

$$F_{r2} = \frac{F\ell \sin \alpha}{L}. \quad (6.11)$$

Рабочие поверхности направляющих проверяют на ограничение давления.

Полная сила трения равна

$$F_T = F_{TP1} + F_{TP2} = (F_{r1} + F_{r2})f. \quad (6.12)$$

Заклинивание будет отсутствовать при условии

$$F_T \leq F \cos \alpha, \quad (6.13)$$

или

$$\frac{F \sin \alpha}{L} f (L + 2\ell) \leq F \cos \alpha, \quad (6.14)$$

откуда

$$\operatorname{tg} \alpha \leq \frac{L}{(L + 2\ell)f}. \quad (6.15)$$

Окончательно условие отсутствия силового заклинивания направляющих выглядит следующим образом:

$$\frac{\ell}{L} \leq \frac{1 - f \operatorname{tg} \alpha}{2 f \operatorname{tg} \alpha}. \quad (6.16)$$

Из условий отсутствия заклинивания следует, что для уменьшения длины L направляющей необходимо коэффициент f трения скольжения уменьшить. Этого можно достичь подбором материалов пары и соответствующей обработкой трущихся поверхностей.

Движущая сила из условия отсутствия заклинивания

$$F \geq \frac{Q}{\cos \alpha - \frac{(L + 2\ell)f \sin \alpha}{L}}. \quad (6.17)$$

Рабочие поверхности направляющих проверяют на ограничение давления

$$p = \frac{F_r}{A} \leq [p], \quad (6.18)$$

где F_r — нормальная сила в точке соприкосновения трущихся поверхностей, Н; A — площадь соприкосновения, мм²; $[p]$ — допускаемое давление, при скоростях относительного перемещения до 1 м/с $[p] = 3 \dots 4$ МПа.

6.3. Направляющие с трением качения

Направляющие с трением качения применяют в тех случаях, когда требуется обеспечить перемещение с минимальными силами сопротивления и высокой скоростью. По сравнению с направляющими скольжения они имеют меньшие потери на трение, долговечны, менее чувствительны к перепадам температуры.

Направляющие с трением качения изготавливают из закаленных сталей марок ШХ15, 40Х, У8А, У10А, ХВГ, 38ХМЮА.

По виду тел качения различают **шариковые** и **роликовые направляющие**. Для удержания тел качения на определенном расстоянии друг от друга применяют сепараторы, изготовленные из латуни или текстолита. Иногда применяют стандартные шариковые или роликовые подшипники.

В зависимости от **способа установки** шариков или роликов различают направляющие с **перекатывающимися** и **вращающимися вокруг своих осей** телами качения. В направляющих с перекатывающимися шариками (рис. 6.6, а) при перемещении каретки 1 шарики 2 перекатываются по основанию 3, оси тел качения перемещаются как относительно каретки, так и относительно основания. В направляющих с вращающимися шариками (рис. 6.6, б) тела качения 2 закреплены на осях и при перемещении каретки 1 вращаются в своих гнездах, а оси их остаются неподвижными относительно каретки и основания 3.

Анализ направляющих с перекатывающимися и вращающимися шариками показывает, что теоретическая длина L_1 каретки и основания в случае применения перекатывающихся шариков равна

$$L_1 = L + \frac{S}{2}, \quad (6.19)$$

где L — расстояние между центрами шариков, S — ход каретки; в случае вращающихся шариков

$$L_1 = L + S. \quad (6.20)$$

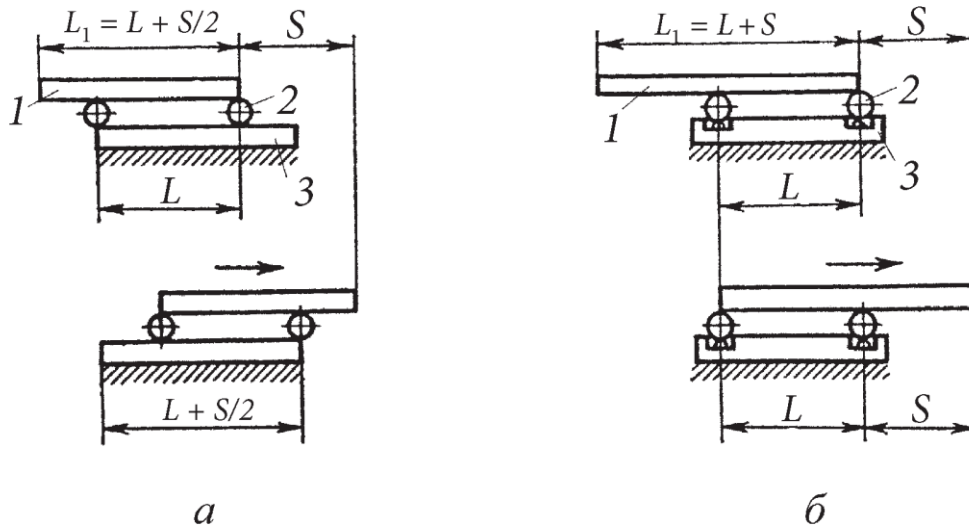


Рис. 6.6. Направляющие с перекатывающимися (а) и вращающимися (б) телами качения

Следовательно, при проектировании ММ с большими перемещениями подвижных звеньев более целесообразна конструкция, в которой тела качения перемещаются вместе с подвижной кареткой, что позволяет уменьшить ее длину. В то же время при установке шариков во вращающихся гнездах исключается влияние погрешности формы поверхности основания. Поэтому такие направляющие при прочих равных условиях обеспечивают более высокую точность перемещения каретки.

Для определения сопротивления движению каретки 1 необходимо выяснить, каким коэффициентом трения покоя должны обладать шарик 2 и направляющая 3 для того, чтобы между ними не было проскальзывания.

Условие равновесия шарика (рис. 6.7)

$$F_T \cdot d_{ш} = R \cdot 2f_k. \quad (6.21)$$

Поскольку сила трения $F_T = f_0 \cdot R$, а отсутствие скольжения должно быть гарантировано, то необходимо, чтобы коэффициент трения покоя в момент перехода к скольжению удовлетворял условию

$$f_0 > \frac{2f_k}{d_{ш}}, \quad (6.22)$$

где f — коэффициент трения качения.

Для направляющих качения отсутствие заклинивания определяют по тем же формулам, что и для направляющих с трением скольжения, только вместо коэффициента f трения скольжения в формулы подставляют коэффициент f трения качения.

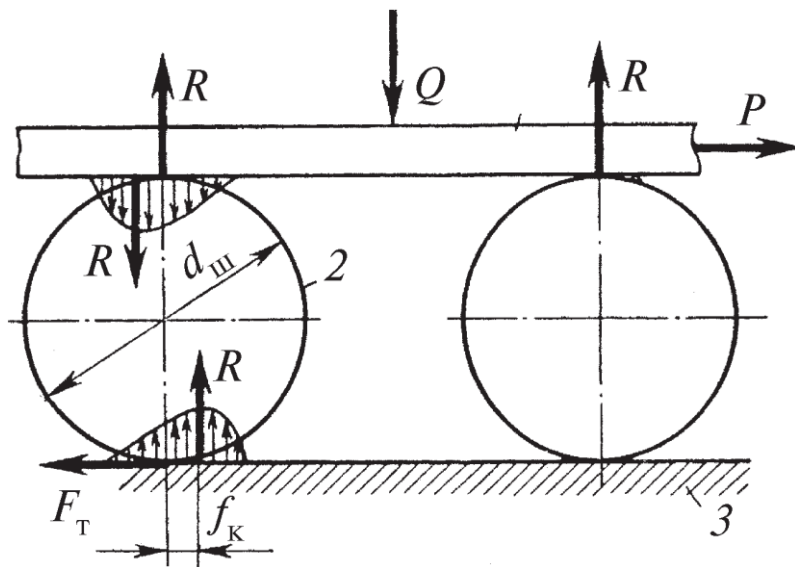


Рис. 6.7. Силы, действующие на тело качения

Существенными факторами, оказывающими отрицательное влияние на работу направляющих качения, являются зазоры между сопряженными через тела качения поверхностями каретки и основания. В открытых направляющих зазоры выбираются автоматически, а в закрытых требуется их регулировка.

Конструктивная схема закрытой шариковой направляющей с сепараторами 2, в которой регулировку зазора между шариками 1 и кареткой 3 проводят при помощи перемещения одной или двух планок 4 с последующим их закреплением винтами 5, приведена на рис. 6.8.

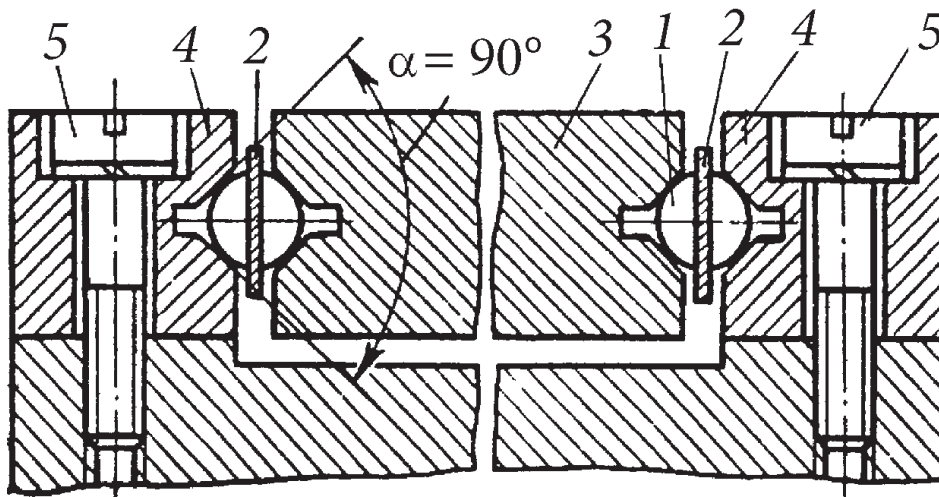


Рис. 6.8. Закрытая шариковая направляющая

В роликовых направляющих основной деталью является ролик, который может перекатываться по цилиндрической или плоской поверхности. В качестве роликов иногда используют стандартные радиальные подшипники. В роликовых направляющих (рис. 6.9, а) ролики 1 перекатываются по цилиндрической поверхности 2.

Для обеспечения контакта всех роликов с направляющими должна быть предусмотрена специальная регулировка, один из вариантов которой показан на рис. 6.9, б. Ролик 4 укрепляют на оси 1 с эксцентриситетом $e = 0,2...0,5$ мм. Окончательно гайки 2 и 3 закрепляют после регулирования положения ролика.

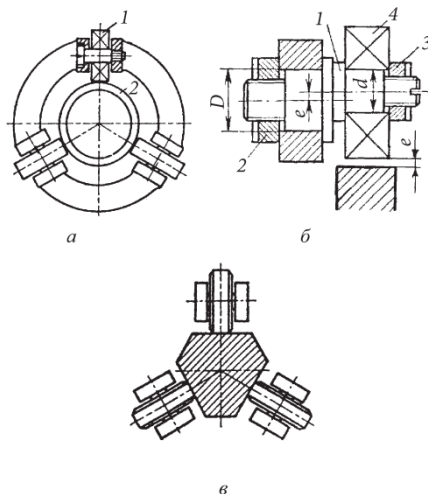


Рис. 6.9. Направляющие, в которых используются стандартные подшипники

Для направляющих (рис. 6.9, в) ролики с эксцентричными осями необязательны, так как каждый ролик удерживается в отдельной державке. Регулирование

осуществляют за счет перемещения державок в пределах зазоров в проходных отверстиях под крепежные винты (на рис. 6.9 не показаны).

Конструктивные схемы роликовых направляющих закрытого типа приведены на рис. 6.10.

В последнее время применяют более экономичные шариковые направляющие линейного перемещения, которые уменьшают габаритные размеры конструкции, массу и общую стоимость ММ.

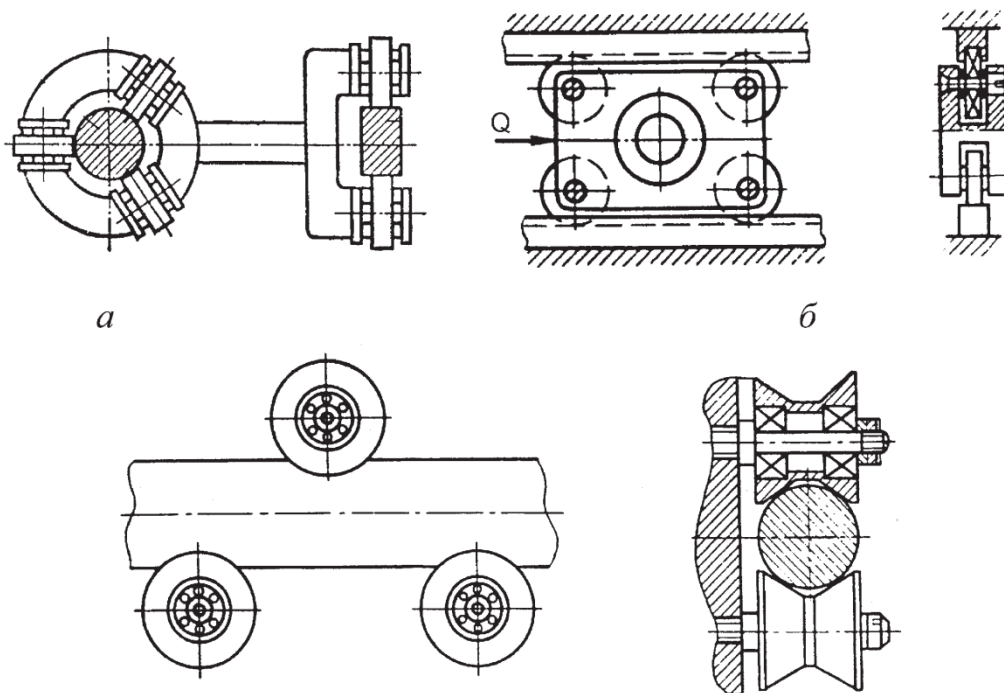


Рис. 6.10. Роликовые направляющие закрытого типа

Шариковые LM-направляющие

Шариковые LM-направляющие фирмы *THK* (Япония), предназначенные для обеспечения прямолинейного перемещения, представлены на рис. 6.11.

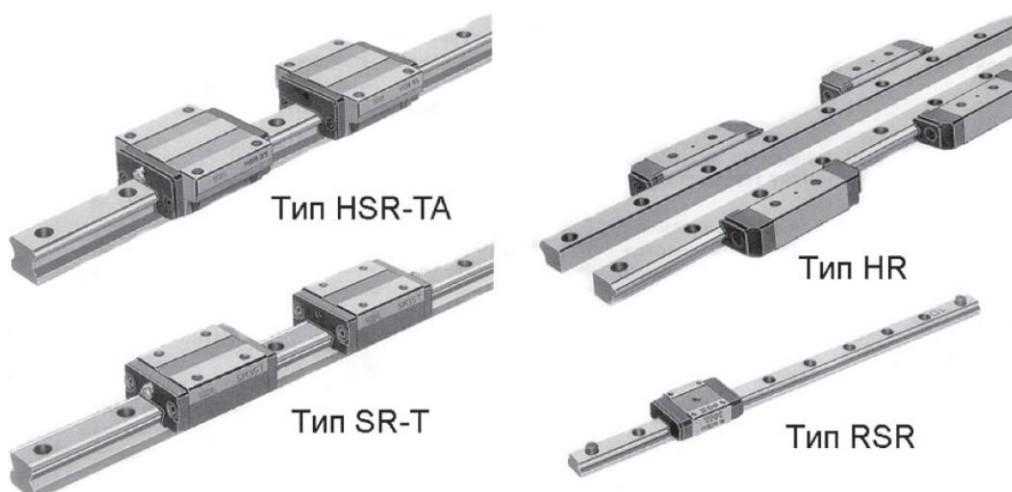


Рис. 6.11. LM-направляющие японской фирмы *THK*

Рассмотрим LM-направляющую типа *HSR* (рис. 6.12). Она представляет собой систему, состоящую из LM-рельса 1 и LM-блока 2, между которыми расположены шарики 3, находящиеся в сепараторе 4, концевой плиты 5, концевой уплотнения 6, ниппеля 7 для подачи консистентной смазки и бокового уплотнителя 8. Четыре ряда шариков, расположенные под углом 45° к поверхностям качения LM-рельса и LM-блока, могут воспринимать нагрузку сверху, снизу, справа, слева. Радиусы r_k кривизны поверхностей качения составляют 52.. 53 % диаметра $d_{ш}$ шарика, т. е. $r_k = (0,52-0,53)d_{ш}$.

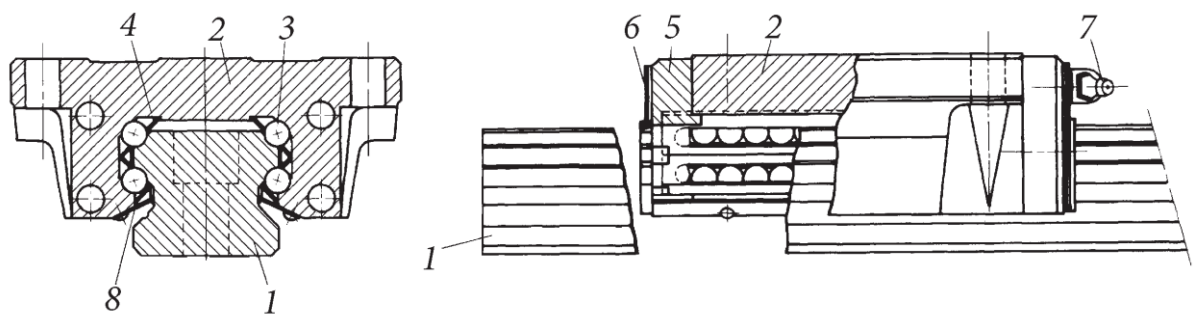


Рис. 6.12. LM-направляющая типа *HSR*

LM-направляющая типа *HR* изображена на рис. 6.13. Она состоит из LM-рельса 1, LM-блока 2, между которыми расположены два ряда осуществляющих циркулирующее перемещение шариков 3, находящихся в сепараторе 4, контактирующих с поверхностями качения под углом 45° и воспринимающих нагрузку сверху, снизу, справа и слева, возвратного канала 5, концевой плиты 6, уплотнения 7 и отверстия 8 для смазки.

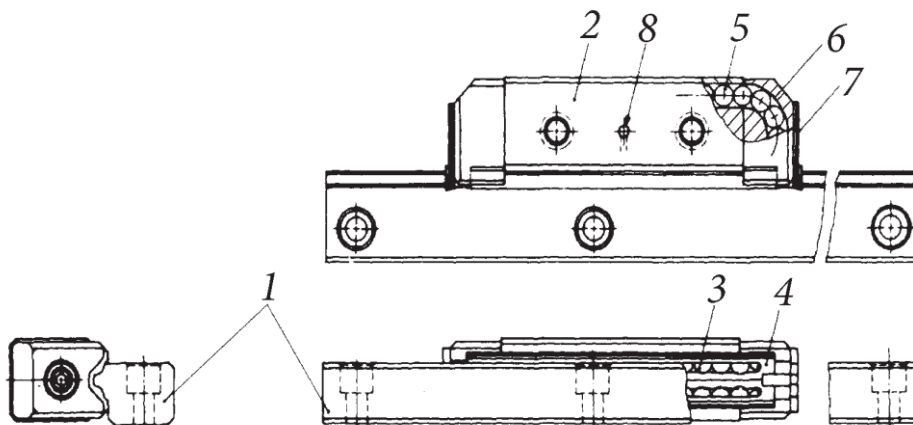


Рис. 6.13. LM-направляющая типа *HR*

Конструкция *LM*-направляющей типа *SR* (рис. 6.14) состоит из *LM*-рельса 1, *LM*-блока 2, между которыми размещены четыре ряда осуществляющих циркулирующее перемещение шариков 3, расположенных в сепараторе 4, контактирующих с поверхностями качения *LM*-рельса под углом 30° и *LM*-блока под углом 90° и воспринимающих нагрузку сверху, снизу, справа, слева, концевой плиты 5, концевого уплотнения 6, бокового уплотнителя 7 и ниппеля 8 для запрессовки консистентной смазки.

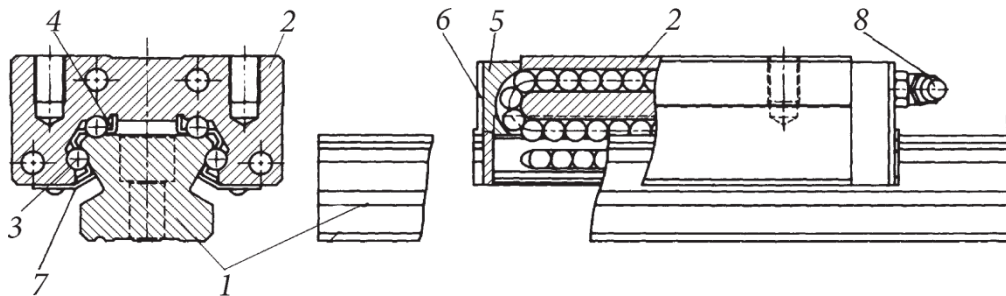


Рис. 6.14. *LM*-направляющая типа *SR*

LM-направляющая типа *RSR* показана на рис. 6.15. Она представляет собой систему, состоящую из *LM*-рельса 1 и *LM*-блока 2, между которыми расположены два ряда осуществляющих циркулирующее перемещение шариков 3, концевого уплотнения 4, резинового уплотнителя 5 и стопора 6, препятствующего снятию *LM*-блока.

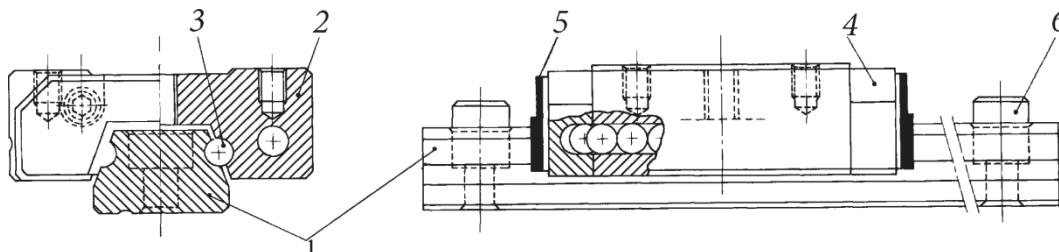


Рис. 6.15. *LM*-направляющая типа *RSR*

Фирма *THK* выпускает широкую гамму данных типов на динамические грузоподъемности 0,5...187 кН. Геометрические параметры *LM*-направляющих приведены в [1].

Шарикосплайновые направляющие

Шарикосплайновые направляющие (рис. 6.16) фирмы *THK* (Япония) состоят из шлицевого вала (**сплайнвала**) и шариковой гайки (**сплайнгайки**). Рассмотрим устройство некоторых шарикосплайновых направляющих.

Конструкция шарикосплайновой направляющей типа *LBS* представлена на рис. 6.17. Она состоит из сплайнвала 1 и сплайнгайки 2 с шпоночной канавкой 3, между которыми расположены в сепараторе 4 шесть рядов воспринимающих нагрузку шариков 5 и шесть каналов 6 возврата шариков, расположенных в сплайн-гайке, резинового уплотнителя 7 и отверстия 8 для смазки.

Шарикосплайновая направляющая типа *LBF* в отличие от *LBS* имеет корпус с фланцем.

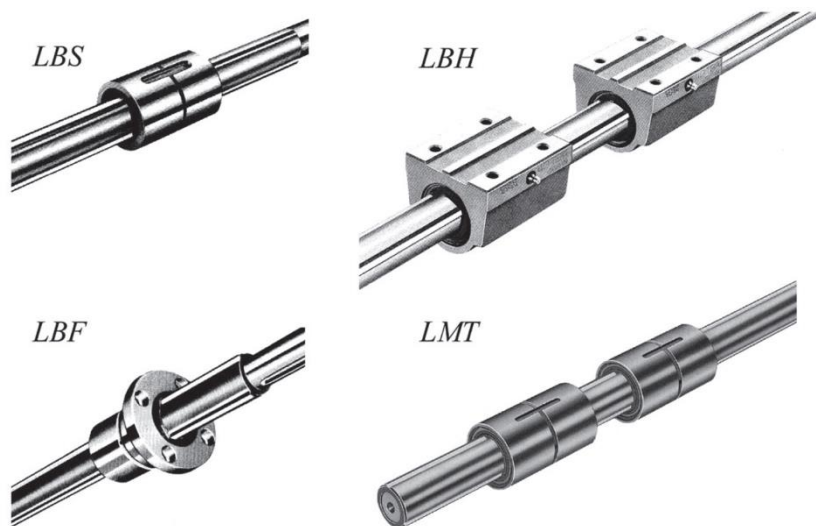


Рис. 6.16. Шарикосплайновые направляющие фирмы THK

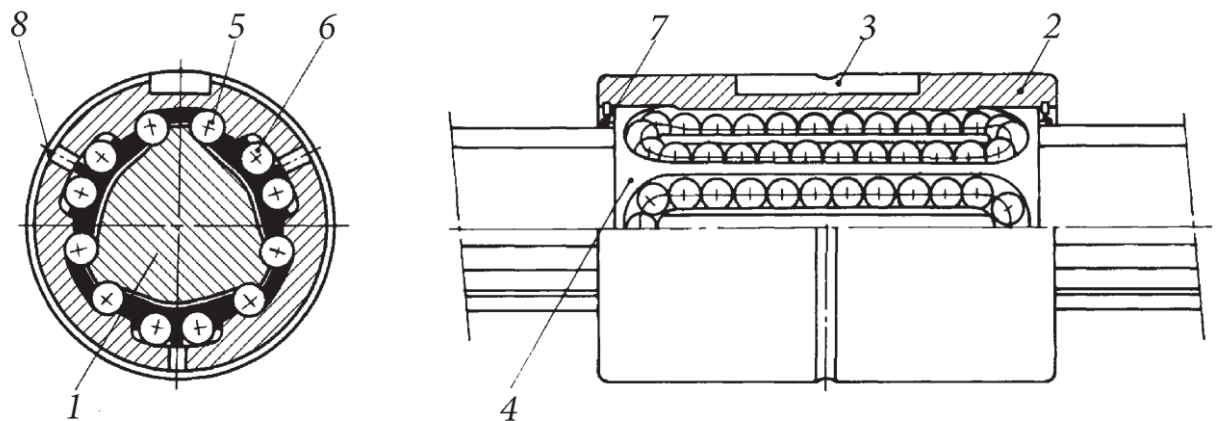


Рис. 6.17. Шарикосплайновая направляющая типа *LBS*

Шарикосплайновая направляющая типа *LBH* отличается от направляющих типа *LBS* и типа *LBF* формой гайки и устройством мест крепления.

Шарикосплайновая направляющая типа *LMT* изображена на рис. 6.18. Она состоит из сплайнвала 1, сплайнгайки 2, трех рядов воспринимающих нагрузку ша-

риков 3, расположенных в сепараторе 4, трех каналов 5 возврата шариков, шпоночной канавки 6, резинового уплотнения 7 и отверстия 8 для смазки. В сплайнвале и сплайнгайке имеется три ряда канавок полукруглого профиля для качения воспринимающих нагрузку шариков и три ряда канавок для возврата шариков, расположенных в сплайнгайке.

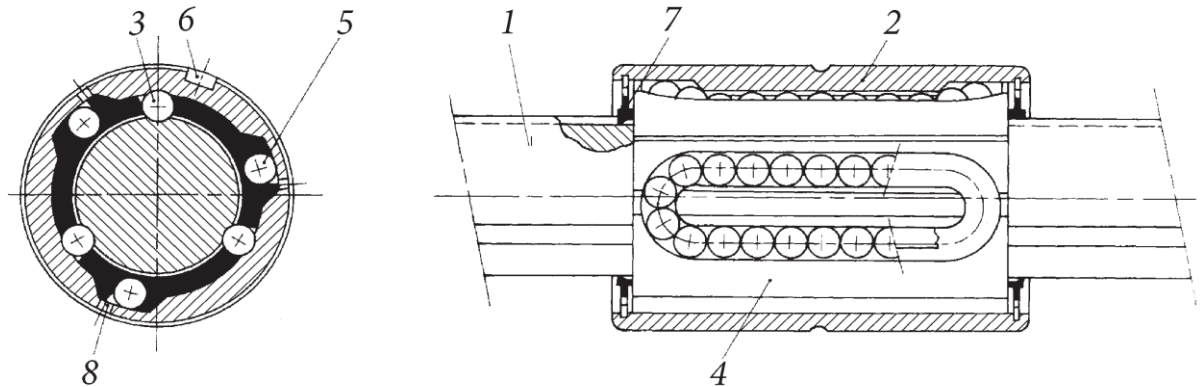


Рис. 6.18. Шарикосплайновая направляющая типа LMT

Геометрические и нагрузочные параметры шарикосплайновых направляющих фирмы *THK* приведены в [1].

Расчеты LM- и шарикосплайновых направляющих

Расчет LM-направляющих на долговечность

Расчет LM-направляющих на долговечность при действии внешних нагрузок производят по формуле, км,

$$L = 50 \left(\frac{f_H f_T f_C}{f_w} \frac{C}{P_C} \right)^3, \quad (6.23)$$

где L — долговечность работы направляющей (выраженная в километрах); C — основная номинальная динамическая нагрузка, Н; P_C — расчетная нагрузка, Н; f_H — коэффициент твердости, определяемый по графику (рис. 6.19); f_T — температурный коэффициент (при

температуре системы $t \leq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ $f_T = 1$, при $100\text{ }^{\circ}\text{C} < t \leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ $1 \geq f_T \geq 0,73$; f_C — коэффициент контакта (принимают в зависимости от числа n подшипниковых блоков на одной направляющей: при $n = 1$ $f_C = 1$; при $n = 2$ $f_C = 0,81$; при $n = 3$ $f_C = 0,72$; при $n = 4$ $f_C = 0,66$); f_W — коэффициент нагрузки (при спокойной внешней нагрузке и скорости перемещения $v \leq 0,25\text{ м/с}$ $f_W = 1,15$; при небольших динамических внешних воздействиях и $0,25 < v \leq 1\text{ м/с}$ $f_W = 1,5 \dots 2,0$; при ударной внешней нагрузке и $v > 1\text{ м/с}$ $f_W = 2,0 \dots 3,5$).

Расчетная нагрузка на блок определяется следующим образом.

В том случае, если LM — блок воспринимает одновременно нагрузки всех направлений (рис. 6.20), то определяют результирующую (эквивалентную) нагрузку P_E , Н, и подставляют ее в формулу (6.23) вместо P_C :

для LM — направляющих типов HSR и RSR

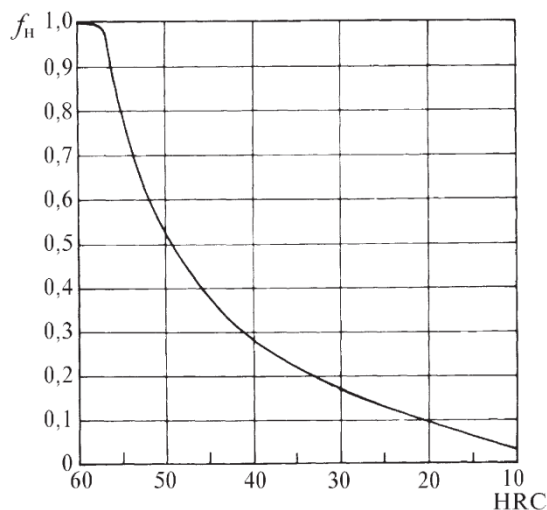


Рис. 6.19. Зависимость f_H от твердости контактирующих поверхностей

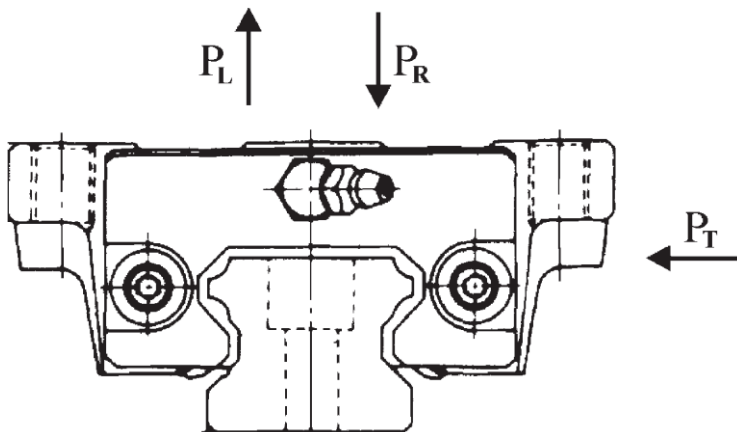


Рис. 6.20. Нагрузки на LM-блок

$$P_E = |P_R - P_L| + P_T, \quad (6.24)$$

где P_R — радиальная нагрузка, Н; P_L — противорадиальная нагрузка, Н; P_T — горизонтальная нагрузка (не осевая), Н;
для LM — направляющих типа SR

$$P_E = XP_L + YP_T, \quad (6.25)$$

где X и Y — коэффициенты эквивалентности (при $P_L/P_T \geq 1$ коэффициенты эквивалентности равны $X = 1$ и $Y = 1,15$, и P_E становится результирующей противорадиальной нагрузкой; при $P_L/P_T < 1$ $X = 0,866$ и $Y = 1$, и P_E является результирующей нагрузкой в горизонтальном направлении).

Долговечность LM — направляющих, выраженная в часах, равна

$$L_h = \frac{10^3 L}{120 l_s n_1}, \text{ ч}, \quad (6.26)$$

где l_s — длина перемещения LM — блока по LM — направляющей, м; n_1 — частота возвратно-поступательных перемещений (циклов) в минуту, мин^{-1} .

Расчет шарикосплайновых направляющих на долговечность

Расчет шарикосплайновых направляющих на долговечность при действии только крутящего момента проводят по формуле

$$L = 50 \left(\frac{f_H f_T f_C C_T}{f_w T_C} \right)^3, \text{ км}, \quad (6.27)$$

где L — долговечность работы направляющей, км; C_T — основной номинальный динамический момент, Нм; T_C — расчетный нагрузочный крутящий момент, Нм.

При действии радиальной нагрузки — по формуле (6.23).

При одновременном действии крутящего момента и радиальной силы определяют эквивалентную радиальную нагрузку, Н,

$$P_E = P_C + \frac{4T_C 10^3}{3d_p \cos \alpha}, \quad (6.28)$$

где d_p — диаметр окружности по центрам шариков, мм; $\alpha = 45^\circ$ — угол контакта шариков с поверхностями винта и гайки.

В этом случае долговечность определяют по формуле, км,

$$L = 50 \left(\frac{f_H f_T f_C}{f_W} \frac{C}{P_E} \right)^3 \quad (6.29)$$

Долговечность работы шарикосплайновых направляющих в часах определяют по формуле (6.26).

Расчет LM — и шарикосплайновых направляющих на статическую грузоподъемность

Расчет направляющих на статическую грузоподъемность проводят по формуле

$$\frac{C_0}{P_0} \geq f_s, \quad (6.30)$$

где C_0 — основная номинальная статическая нагрузка, Н; P_0 — статическая нагрузка, Н; f_s — статический коэффициент безопасности (при спокойной нагрузке и малом прогибе оси $f_s = 1,0 \dots 1,5$; при наличии ударного воздействия и осевой силы $f_s = 2 \dots 5$).

Лекция

Тема 1.1.10. Информационные устройства мехатронных модулей

ВОПРОСЫ

15. Датчики информации: положения и перемещения, скорости.
16. Реле давления и манометры. Динамометры.

ЛИТЕРАТУРА

11. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Конструирование мехатронных модулей: Учебник. – 2е изд. перераб. и доп. – М.: Изд-во «СТАНКИН», 2005. – 368 с.: ил. (Л3 с. 97-121).
12. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей: учеб.пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 336 с. (Л4 с.263-299).

Датчики информации

Датчик (**первичный преобразователь**) — элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства системы, преобразующий контролируемую величину (давление, температуру, частоту, перемещение, скорость, напряжение, электрический ток и т. п.) в сигнал, удобный для измерения, передачи, преобразования, хранения и регистрации, а также для воздействия им на управляемые процессы.

В **состав** датчика входят **воспринимающий** (чувствительный) **орган** и один или несколько **промежуточных преобразователей**. Часто датчик состоит только из одного воспринимающего органа (например, термopара, тензодатчик).

Выходные сигналы датчиков различают **по роду энергии** (электрические, механические, пневматические, гидравлические) и **по характеру модуляции потока энергии** (амплитудные, время-импульсные, частотные, фазовые, дискретные (кодовые)). Наиболее распространены датчики, действие которых основано на изменении электрического сопротивления, емкости, индуктивности или взаимной индуктивности электрической цепи (реостатный датчик, емкостной датчик, индуктивный датчик), а также на возникновении ЭДС при воздействии контролируемых механических, акустических, тепловых, электрических, магнитных, оптических или радиационных

величин (тензодатчик, датчик перемещения, пьезоэлектрический датчик, датчик давления, фотоэлемент).

В соответствии с классификацией, принятой в Государственной системе приборов и средств автоматизации (ГСП), датчик относят к техническим средствам сбора и первичной обработки контрольно-измерительной информации.

Датчики являются одним из основных элементов в устройствах дистанционных измерений, телеизмерений и телесигнализации, регистрирования и управления, робототехники и мехатроники, а также в различных приборах и измерительных устройствах в биологии и медицине для контроля жизнедеятельности человека, животных или растений. В связи с автоматизацией производства важнейшее значение приобрели датчики для измерения и регистрации плотности и концентрации растворов, состава и свойств веществ, динамической вязкости и текучести различных сред, влажности, прозрачности, интенсивности окраски, толщины слоя, температуры, упругости, перемещения, скорости, ускорения и других параметров, характеризующих технологические процессы. Для этого часто используют датчики, основанные на ультразвуковых, радиоволновых, оптических, радиационных и других методах измерений. Для имитации реальных условий при испытании систем автоматического регулирования и в вычислительной технике для решения задач статистическими методами применяют датчики случайных чисел.

Датчики служат для автоматического извлечения информации. Современная измерительная техника может непосредственно оценивать более 300 различных физических, химических и других величин, но этого для автоматизации ряда новых областей человеческой деятельности бывает недостаточно. Экономически целесообразное расширение номенклатуры датчиков в ГСП достигается **унификацией чувствительных элементов**. Чувствительные элементы, реагирующие на давление, силу, вес, скорость, ускорение, звук, свет, тепловое и радиоактивное излучения, применяют в датчиках для контроля загрузки оборудования и его рабочих режимов, качества обработки, учета выпуска изделий, контроля за их перемещениями на конвейерах, запасами и расходом материалов, заготовок, инструмента и т. д. Выходные сигналы всех датчиков преобразуются в стандартные электрические или пневматические сигналы.

Датчики положения и перемещения

Датчики положения и перемещения относятся к наиболее часто используемым в мехатронике информационным устройствам. Невозможно представить область, где бы они не применялись. Датчики играют роль важного связующего звена между электронной и механической частями ММ.

Выбирая датчик, прежде всего необходимо правильно определить приоритеты по следующим **критериям**: чувствительность; разрешающая способность и точность;

линейность; скорость измеряемого процесса; условия применения и класс защиты; надежность; габаритные размеры; стоимость [1].

Необходимо учитывать, что датчик может определять **абсолютное** или **относительное положение** контролируемого **объекта**. Существуют два основных метода определения положения и измерения перемещений. При **первом методе** датчик вырабатывает сигнал, являющийся функцией положения одной из его частей, связанных с подвижным объектом, а изменения этого сигнала отображают перемещение. Такие датчики положения называют **абсолютными**. К ним относят:

- 1) резистивные (потенциометрические) датчики;
- 2) индуктивные датчики с подвижным сердечником;
- 3) емкостные датчики с подвижными обкладками;
- 4) цифровые кодовые датчики абсолютных значений.

При **втором методе** датчик генерирует единичный импульс на каждом элементарном перемещении, а положение определяют подсчетом суммы импульсов в зависимости от направления перемещения. Такие датчики положения называют **относительными**. К ним относят фотоэлектрические (оптоэлектронные) импульсные датчики положения. **Достоинством** относительных датчиков, по сравнению с абсолютными, являются их простота и низкая стоимость, а **недостатком** — необходимость периодической калибровки и дальнейшей микропроцессорной обработки.

Датчики также делят на **контактные** и **бесконтактные**. В бесконтактных датчиках связь между подвижным объектом и датчиком осуществляют посредством магнитного, электромагнитного или электростатического полей, а также оптоэлектронным способом.

Конструкции датчиков должны позволять размещать их в ММ в местах с ограниченным для установки оборудования объемом, обладать помехоустойчивостью, т. е. возможностью эксплуатации в условиях электромагнитных полей, колебаний напряжения и частоты сети, а также устойчивостью к механическим воздействиям (ударам, вибрациям) и к изменениям параметров окружающей среды (температуры, влажности и т. п.).

К **наиболее простым датчикам положения**, работающим по принципу «*включено — выключено*», относят предельные (конечные) выключатели, микропереключатели, бесконтактные переключатели, фотореле, герконы, путевые датчики сигналов. С их помощью возможно осуществлять контроль пути, пройденного выходным звеном ММ.

По виду выходного сигнала более **сложные датчики** делят на **аналоговые** и **цифровые**. Развитие цифровых мехатронных систем вызвало потребность в разработке цифровых датчиков, а также устройств сопряжения аналоговых датчиков с цифровыми устройствами. Несмотря на общеизвестные **достоинства цифровых датчиков** (простое сопряжение с устройствами цифровой обработки сигналов, высокая точность, необходимость только одного маломощного источника питания постоянного тока), применение их ограничено.

Поэтому до настоящего времени электромеханические аналоговые датчики не утратили возможности своего применения в цифровых мехатронных системах. Это связано с такими **достоинствами аналоговых датчиков**, как высокая степень отработанности основных конструктивных элементов и узлов, высокие эксплуатационные качества (надежность в работе, малые масса и габариты), а также с развитием техники, проявившимся в разработке миниатюрных и высокочастотных микроэлектронных аналого-цифровых (АЦП) и аналого-частотных (АЧП) преобразователей. К тому же высокочастотные аналоговые датчики электромашинного типа с вторичными преобразователями сопоставимы по цене, а в ряде случаев и дешевле цифровых датчиков.

Аналоговые датчики положения нашли широкое применение в различных областях техники. В ММ часто используются потенциометрические датчики.

Потенциометрические датчики (потенциометры) по физическому принципу действия являются электромеханическими реостатными устройствами, в которых выходное напряжение изменяется пропорционально линейному или угловому перемещению входного звена. Потенциометры могут быть **проволочными** и **пленочными**. По рабочему диапазону датчики углового перемещения делят на **одно-** и **многооборотные**. Проволочные потенциометры отличаются более высокой стабильностью характеристик, но их точность и разрешающая способность ниже, чем у пленочных из-за ступенчатой характеристики, обусловленной дискретным изменением сопротивления при перемещении щетки движка. Кроме того, в пленочных потенциометрах меньше силы трения, поэтому они имеют более длительный срок службы и допускают более высокие скорости перемещений.

К **достоинствам** потенциометрических датчиков относят высокую линейность, простую схему включения и относительно невысокую стоимость. Основные **недостатки** — наличие механического контакта и сравнительно небольшой срок службы.

Потенциометрический датчик имеет ограниченный рабочий диапазон и невысокие допустимые скорости, поэтому его, как правило, соединяют либо с тихоходным, либо с промежуточным валом ММ. При согласовании углов поворота валов потенциометра и ММ, т. е. при выборе передаточного отношения кинематического преобразователя движения, необходимо наиболее полно использовать рабочий диапазон углов поворота потенциометра, не превышая их предельных значений. Скорость вращения также должна быть меньше допустимой. Если потенциометр имеет механические упоры, ограничивающие диапазон углов поворота, то во избежание его поломки запрещают прикладывать к его валу вращающий момент больше допустимого. Для обеспечения высокой точности измерений и надежной работы датчика соединение валов потенциометра и мехатронного модуля должно быть безлюфтовым, так как люфт приводит к искажению сигнала по положению.

Внешний вид, габаритные, установочные и присоединительные размеры некоторых потенциометрических датчиков изображены на рис. 7.1.. 7.4, а их технические характеристики приведены в табл. 7.1.

Следует отметить, что в многооборотных потенциометрических датчиках типа СПМЛ-И с большим числом витков предусмотрено несколько промежуточных выводов.

Цифровые датчики положения начинают более широко использовать в различных областях техники, в частности в мехатронике.

Их делят на **кодовые** и **импульсные**. Кодовые датчики обеспечивают **абсолютную систему отсчета**, т. е. однозначно определяют положение выходного вала ММ во всем рабочем диапазоне перемещений, а импульсные датчики являются **датчиками относительного отсчета**.

Рассмотрим назначение, устройство, принцип действия и технические характеристики некоторых цифровых датчиков положения.

Фотоэлектрические датчики. Принцип действия фотоэлектрических датчиков основан на использовании физического эффекта периодического изменения освещенности в зависимости от перемещения (угла поворота). Эти датчики являются бесконтактными и дискретными.

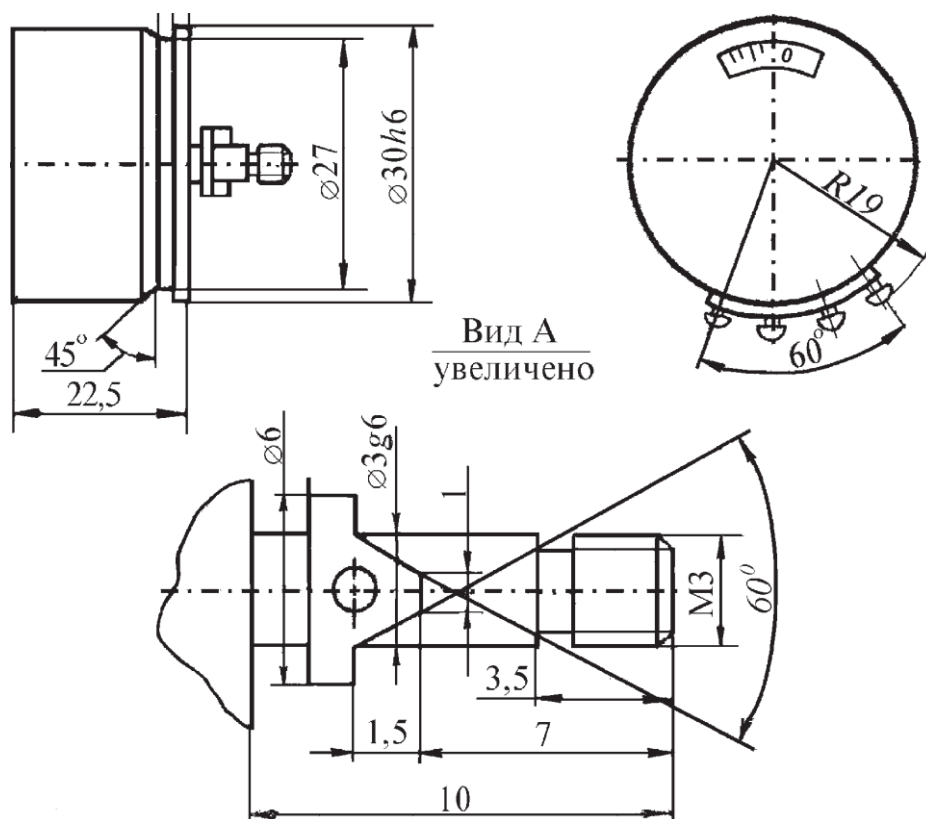


Рис. 7.1. Потенциометрический датчик ПТП-11

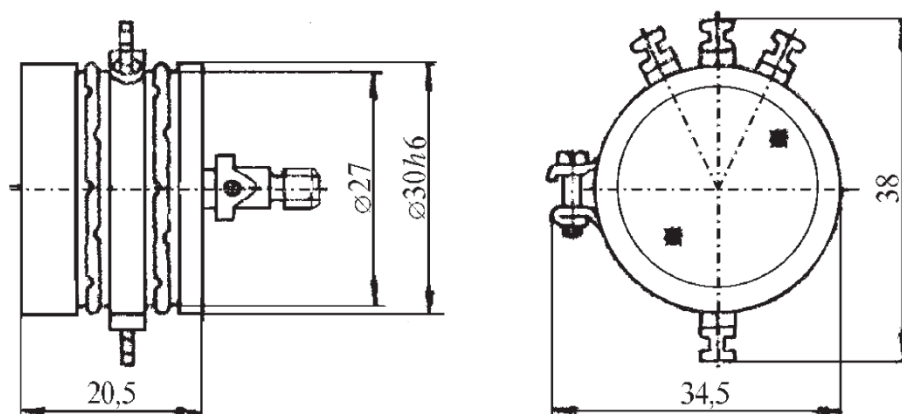


Рис. 7.2. Потенциометрический датчик СП4—8

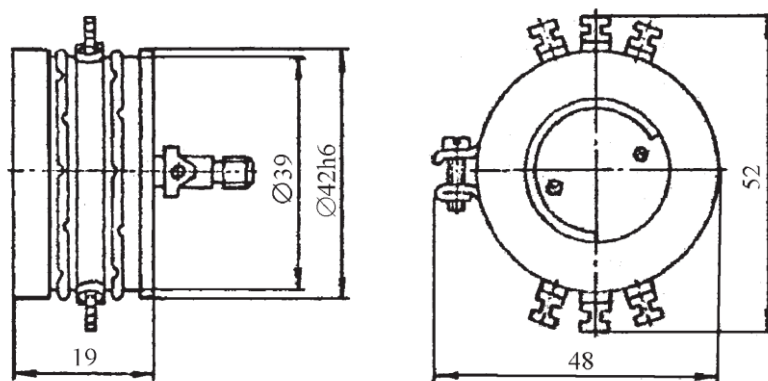


Рис. 7.3. Потенциометрический датчик СП4—10

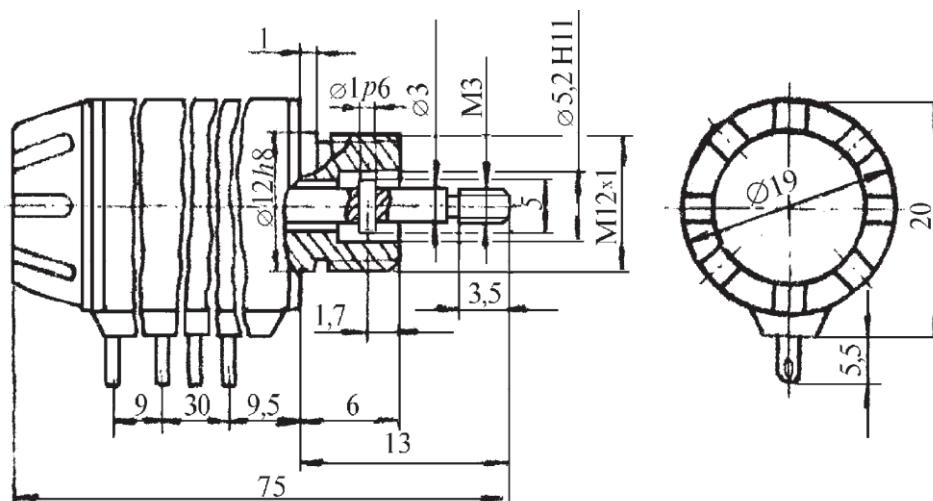


Рис. 7.4. Потенциометрический датчик СПМЛ-И

Таблица 7.1

Технические характеристики потенциометров

Наименование характеристики	Тип			
	Проволочные ПТП-11	Пленочные СП4—8	Пленочные СП4—10	Проволочные много- оборотные ППМЛ-И
Мощность, Вт	1	0,5	0,5	1
Отклонение от линейности, %	$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,1$
Рабочий диапазон, град	330	340	360	7200
Наибольшая частота вращения, об/мин	100	600	600	200
Момент трогания $M \cdot 10^{-4}$, Нм	24,5	—	—	19,6
Срок службы, ч	3000	10000	10000	3000
Износоустойчивость, циклов	$5 \cdot 10^5$	10^7		$25 \cdot 10^3$
Масса, кг	0,030	0,035	0,045	0,140

В **цифровых фотоэлектрических кодовых датчиках** измеряемое непрерывное значение угла поворота вала преобразуется в цифровой двоичный (реже десятичный) код, т. е. кодовую комбинацию электрических сигналов. В таком виде сигналы могут непосредственно поступать в ЭВМ без дополнительных преобразований.

Наибольшее распространение получили кодовые датчики, выполненные в виде кодирующего диска с фотоэлектрической (оптической) системой считывания. Диск устанавливают на валу датчика, который представляет собой стеклянное основание с кодовой маской, состоящей из кодовых дорожек, число которых равно

требуемому числу разрядов выходного сигнала. На дорожке чередуются прозрачные и непрозрачные участки, первые имитируют «1», вторые — «0» двоичного кода. Следует отметить, что для устранения неоднозначности при считывании кодовую маску наносят в соответствии с кодом Грея (циклическим кодом), но могут быть использованы и другие коды.

Кодовые датчики подобно потенциометрическим по величине рабочего диапазона делят на одно- и многооборотные. Они являются датчиками **абсолютного отсчета**.

Основное **достоинство** кодовых датчиков — их высокая разрешающая способность. К **недостаткам** следует отнести конструктивную сложность и громоздкость.

При проектировании ММ выбор кодового датчика целесообразен в том случае, если требуется высокая точность перемещения выходного звена, система управления имеет цифровой вход и нет существенных ограничений по массогабаритным показателям.

Внешний вид кодового датчика типа ФЭП-15 показан на рис. 7.5, а технические характеристики приведены в табл. 7.2

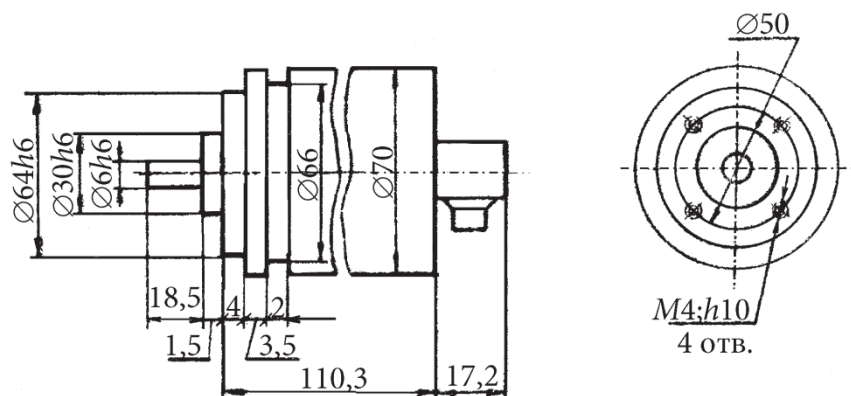


Рис. 7.5. Фотоэлектрический кодовый датчик ФЭП-15

Таблица 7.2

Технические характеристики кодового датчика типа ФЭП-15

Наименование характеристики	Значение
Вид выходного сигнала	Двоичный
Объем информации, единиц дискретности	32768 (2048 на 1 об)
Рабочий диапазон, град	0.....5760
Погрешность преобразования угла за один оборот	10'33"
Наибольшая частота вращения, об/мин	900
Масса, кг	0,8

В цифровых фотоэлектрических импульсных (фотоимпульсных)

датчиках измеряемая непрерывная величина угла поворота вала преобразуется в определенное число электрических импульсов, которые в специальных схемах счета импульсов преобразуются в цифровой код.

Импульсный датчик имеет два канала и вырабатывает сигналы прямоугольной формы, сдвинутые по фазе на 90° , что позволяет определить направление движения звена. Он не имеет ограничений по диапазону углов поворота и измеряет только приращения перемещений (относительное измерение). Для устранения ошибок, вызванных помехами, и выполнения абсолютного отсчета вводится синхронизирующий импульс (ноль-импульс), который подается в третий канал при каждом проходе через отсчетное положение датчика. Для определения начала отсчета необходимо применение специальных схемных решений и дополнительных калибровочных датчиков, например потенциометров, точных механических упоров с концевыми выключателями, рисков и т. п. Основным показателем импульсных датчиков является разрешающая способность. Импульсные датчики по сравнению с кодовыми имеют более простую конструкцию, но требуют специальных схем счета импульсов и калибровки.

При выборе импульсного датчика необходимо учитывать предельную скорость вращения вала и требуемую точность позиционирования выходного звена ММ.

Соединение валов импульсного датчика и ММ производят с помощью специальных соединительных муфт или безлюфтового кинематического преобразователя движения.

Внешний вид импульсных датчиков типов, МИНИ-ФЭП и ВЕ-178 показан на рис. 7.6, 7.7, а их технические характеристики приведены в табл. 7.3.

Рис. 7.7. Фотоимпульсный датчик BE-178

Таблица 7.3

Технические характеристики фотоимпульсных датчиков

Тип датчика	Разрешающая способ- ность γ , дискрет/об	Систематическая погрешность за 1 оборот вала	Напряжение питания, В	Напряжение выходных сигналов, В	Максимальная частота вращения вала, об/мин	Статический момент трения, Нм	Средняя наработка до отказа не менее, ч	Масса, кг
BE-178	600 1000 1024 1500 2000 2500	4	± 15	«0» — 1,5 «1» — 15	6000 6000 6000 4000 3000 2400	0,04	8000	0,67

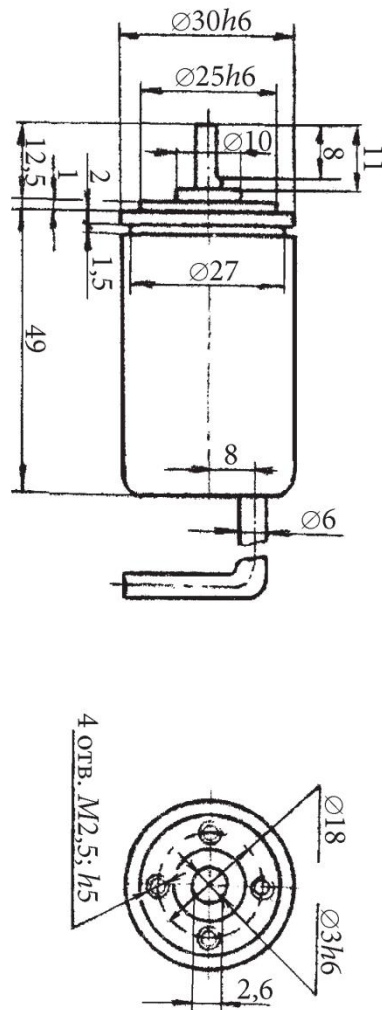
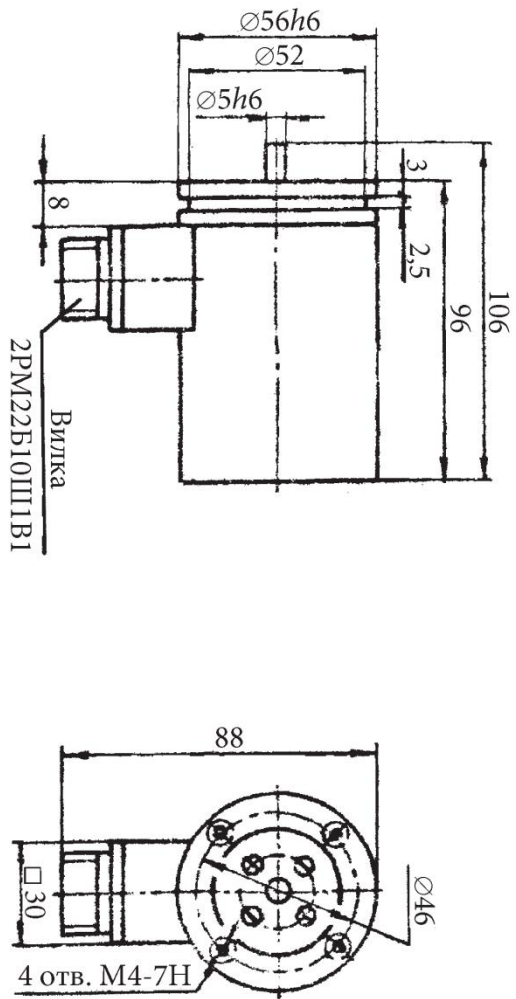


Рис. 7.6. Фотоимпульсный датчик Мини-ФЭП



Окончание табл. 7.3

Тип датчика	Разрешающая способ- ность γ , дискрет/об	Систематическая погрешность за 1 оборот вала	Напряжение питания, В	Напряжение выходных сигналов, В	Максимальная частота вращения вала, об/мин	Статический момент трения, Нм	Средняя наработка до отказа не менее, ч	Масса, кг
ФЭП-4	1000 1024 2048 2500	4	+5	«0» — 0,4 «1» — 2,4	5000 5000 3000 3000	0,05	16000	0,65
ПДФ-7	225 250 600 625 1024 1250 1500 2000 2500	4	± 15	«0» — 0 «1» — 15	6000 6000 6000 6000 5800 4800 4000 3000 2400	0,03	10000	0,35
ПДФ-8	250 256 500 600 625 1024 1250 2048 2500	4	± 15	«0» — 1,5 «1» — 12 $\pm 2,4$	4000 4000 4000 4000 4000 4000 4000 2400 2400	0,01	10000	0,35
Мини- ФЭП	100 128 250 500 512 1000 1024	4	+5	«0» — 0,4 «1» — 2,4	6000		10000	0,2

К фотоимпульсным датчикам перемещений относят преобразователи линейных и угловых перемещений ЛИР, выпускаемые Санкт- Петербургским специальным конструкторским бюро станочных информационно-измерительных систем (СКБ ИС). Они предназначены для различных моделей металлорежущих станков и

обрабатывающих центров, поворотных систем, приборов, робототехнических комплексов, технологических установок, мехатронных систем и т. п.

Принцип действия преобразователей перемещений ЛИР основан на фотоэлектронном сканировании штриховых растров. В качестве осветителей используют инфракрасные светодиоды, а приемниками излучения служат кремниевые фотодиоды.

Поток излучения светодиода 1 (рис. 7.8) модулируется растровым сопряжением, создаваемым перемещающимися относительно друг друга растровой шкалой 2 и индикаторной пластиной 3 с растровым анализатором, и регистрируется фотодиодом 4.

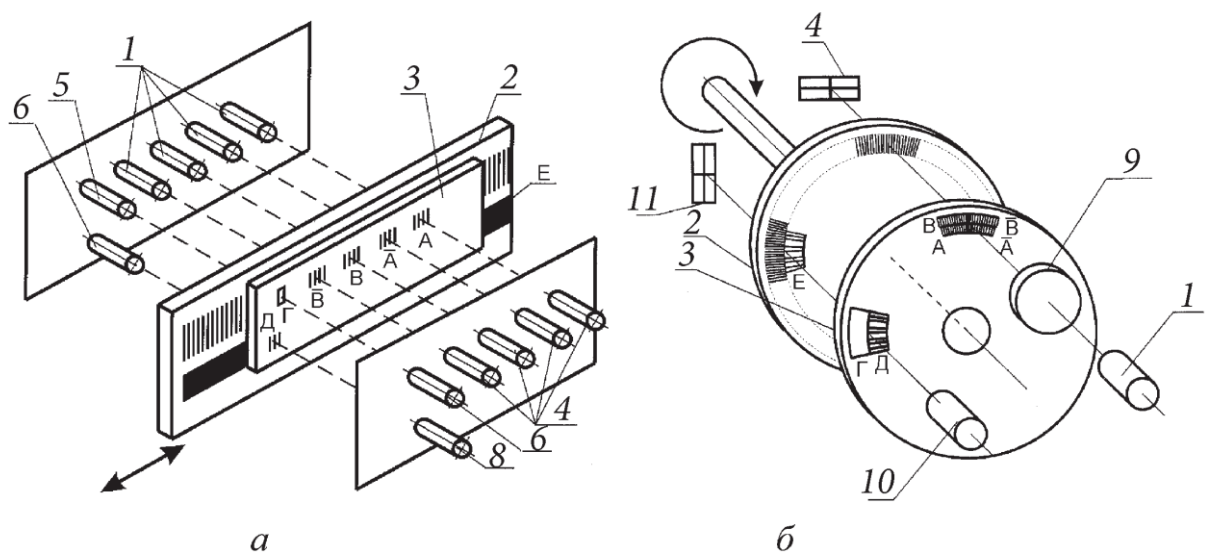


Рис. 7.8. Принцип действия преобразователей линейных (а) и угловых (б) перемещений ЛИР

Для получения информации о перемещении растровый анализатор имеет поле считывания «А», «А», «В», «В» с шагом раstra, соответствующим шагу раstra шкалы 2. Эти четыре поля считывания образуют две пары полей «А»-«А» и «В»-«В», в каждом из которых растры имеют пространственный сдвиг относительно друг друга в $1/2$ шага раstra, что позволяет компенсировать постоянную составляющую основного сигнала. Поля одной пары «А»-«А» имеют пространственный сдвиг растров относительно полей другой пары «В»-«В» в $1/4$ шага раstra.

В преобразователях линейных перемещений (рис. 7.8, а) каждое поле считывания растрового анализатора индикаторной пластины 3 имеет собственные источник и приемник излучения, поэтому в канале считывания задействованы по четыре светодиода 1 и фотодиода 4.

В преобразователях угловых перемещений (рис. 7.8, б) все четыре поля считывания охвачены единым параллельным световым пучком, излучаемым светодиодом 1 и сформированным конденсором 9, а фотодиод 4 имеет четыре светочувствительные площадки, включенные определенным образом.

Независимо от формы построения канала считывания преобразователь перемещений дает два ортогонально сдвинутых токовых сигнала А и В, которые позволяют определить перемещение в пределах шага растра. В результате повышается разрешающая способность преобразователя и появляется возможность определить направление перемещения.

В преобразователях линейных перемещений растровая шкала 2 в зоне Е содержит поля референтных меток. Поле референтной метки представляет собой непериодическую (кодую) шкалу, закон формирования которой обеспечивает получение автокорреляционной функции кода с явно выраженным максимумом. На индикаторной пластине 3 имеется поле считывания Д с кодом, инверсным по отношению к коду референтной метки шкалы, и поле диафрагмы Г, участвующей вместе со светодиодом 5 и фотодиодом 6 в выработке опорного сигнала для формируемого каналом сигнала референтной метки. При относительном перемещении растровой шкалы 2 и индикаторной пластины 3 в зоне совмещения поля референтной метки и поля считывания Д происходит модуляция светового потока, излучаемого светодиодом 1, и на выходе фотодиода 8 формируется токовый сигнал автокорреляционной функции кода референтной метки.

В преобразователях угловых перемещений сигнал референтной метки вырабатывается в общем случае один раз за оборот вала. В канале формирования референтной метки для выработки опорного сигнала и сигнала референтной метки задействованы общий светодиод 10 (рис. 7.8, б) и фотодиод 11, идентичный фотодиоду 4, но с другой схемой включения светочувствительных площадок. Опорный сигнал вырабатывается с помощью поля диафрагмы Г индикаторного лимба 3, а специальный код поля референтной метки Е измерительного лимба 2 и инверсный код поля считывания Д в случае их совмещения при относительном перемещении лимбов модулирует световой поток, что приводит к формированию на выходе фотодиода токового сигнала автокорреляционной функции кода референтной метки.

Преобразователи линейных перемещений выпускают 4 и 3 классов точности, а преобразователи угловых перемещений, в зависимости от моделей, — 8...3 классов точности.

Каждому i -му классу точности соответствует предельная погрешность перемещения — наибольшее отклонение от действительного значения между двумя любыми точками во всем диапазоне перемещения. Для преобразователей линейных перемещений i -го класса соответствует предельная погрешность, мкм: $D_4 = 5,0 + 8,0L$; $D_3 = 2,0 + 4,5L$; $D_2 = 1,0 + 2,5L$; для преобразователей угловых перемещений i -го класса соответствует предельная погрешность, (..."): $D_8 = 300''$; $D_7 = 150''$; $D_6 = 60''$; $D_5 = 30''$; $D_4 = 7,5''$; $D_3 = 2,5''$.

Типы выходных сигналов преобразователей: синусный токовый сигнал типа СТ, синусный сигнал напряжения типа СН, прямоугольный импульсный сигнал типа ПИ.

Геометрические параметры преобразователей линейных и угловых перемещений ЛИР-7, ЛИР-9, ЛИР-14, ЛИР-15 и ЛИР-17 приведены на рис. 7.9.7.12, а их технические характеристики — в табл. 7.4.

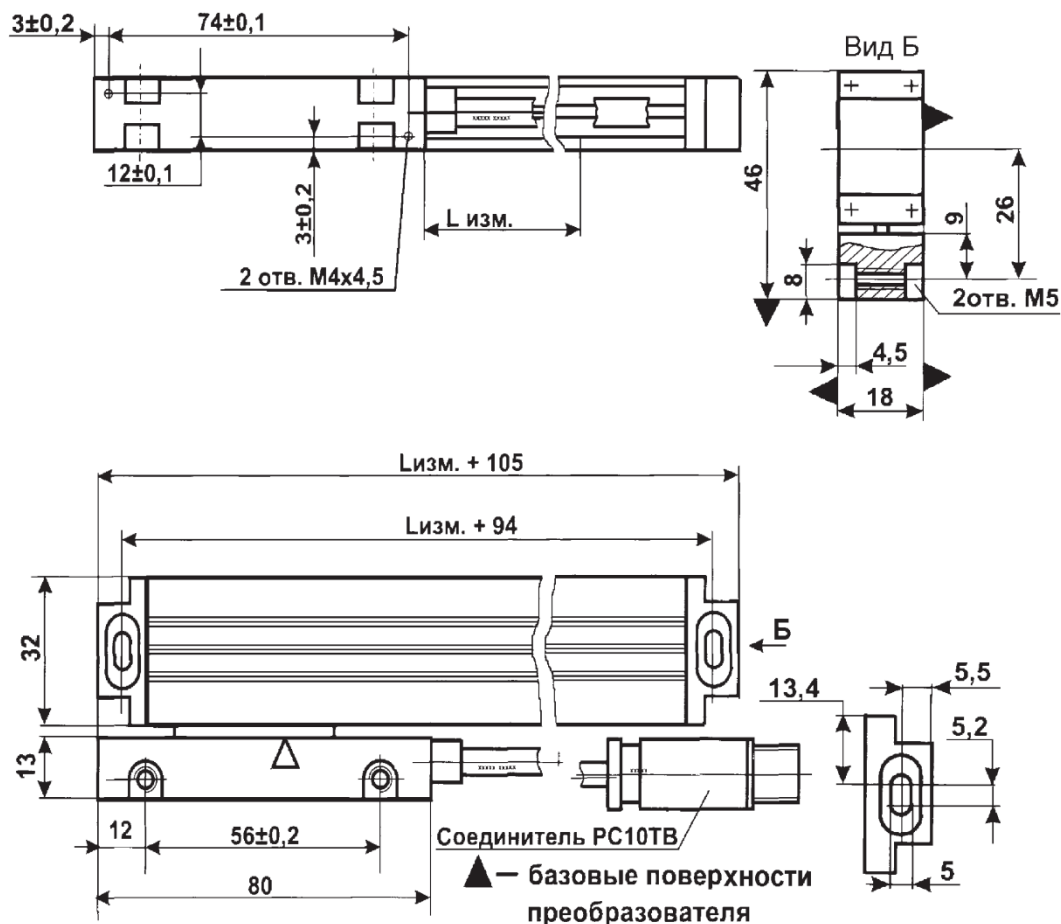


Рис. 7.9. Геометрические параметры преобразователя линейных перемещений ЛИР-7

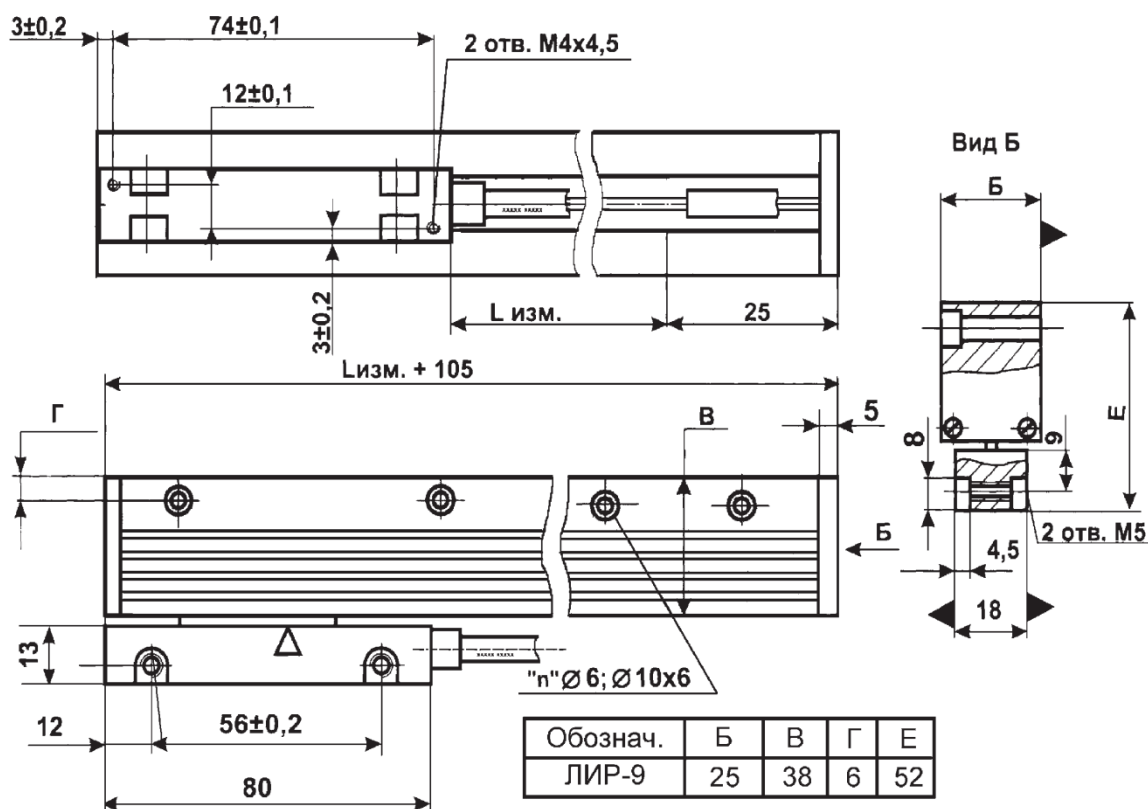


Рис. 7.10. Геометрические параметры преобразователя линейных перемещений ЛИР-9

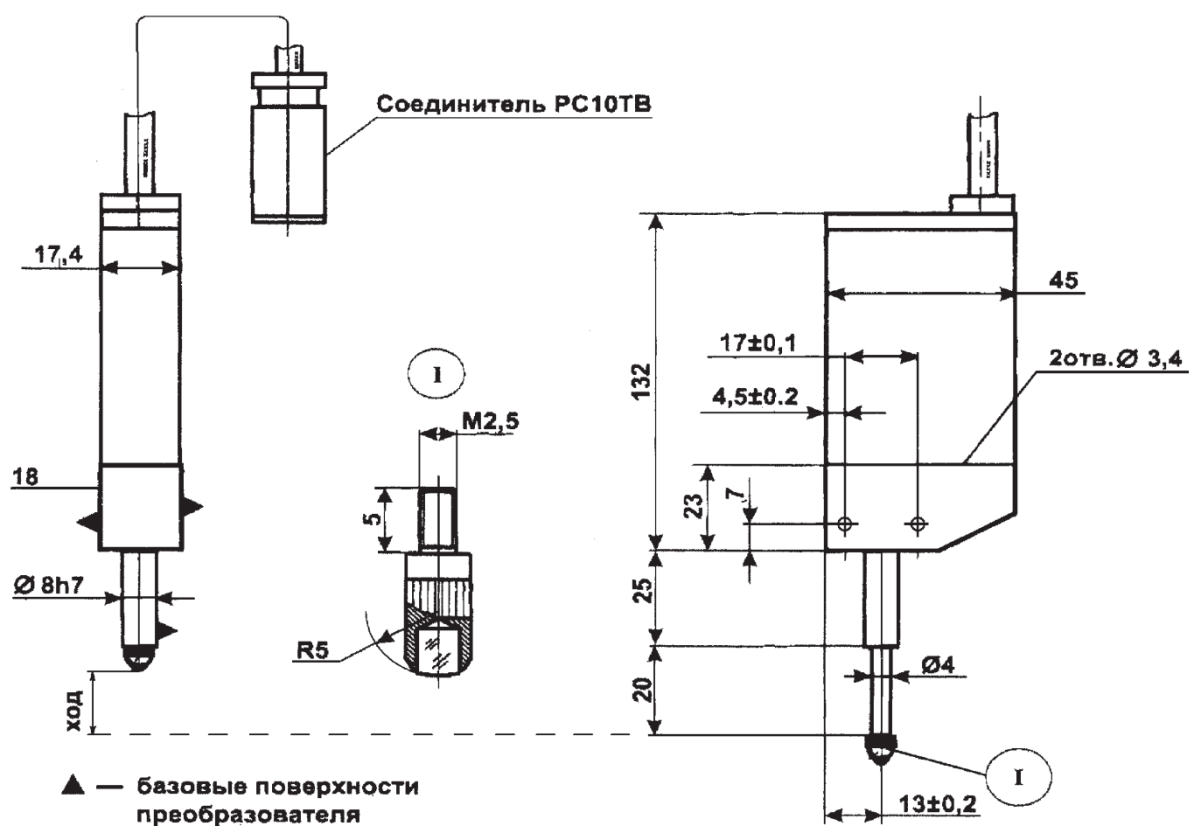


Рис. 7.11. Геометрические параметры преобразователя угловых перемещений ЛИР-14

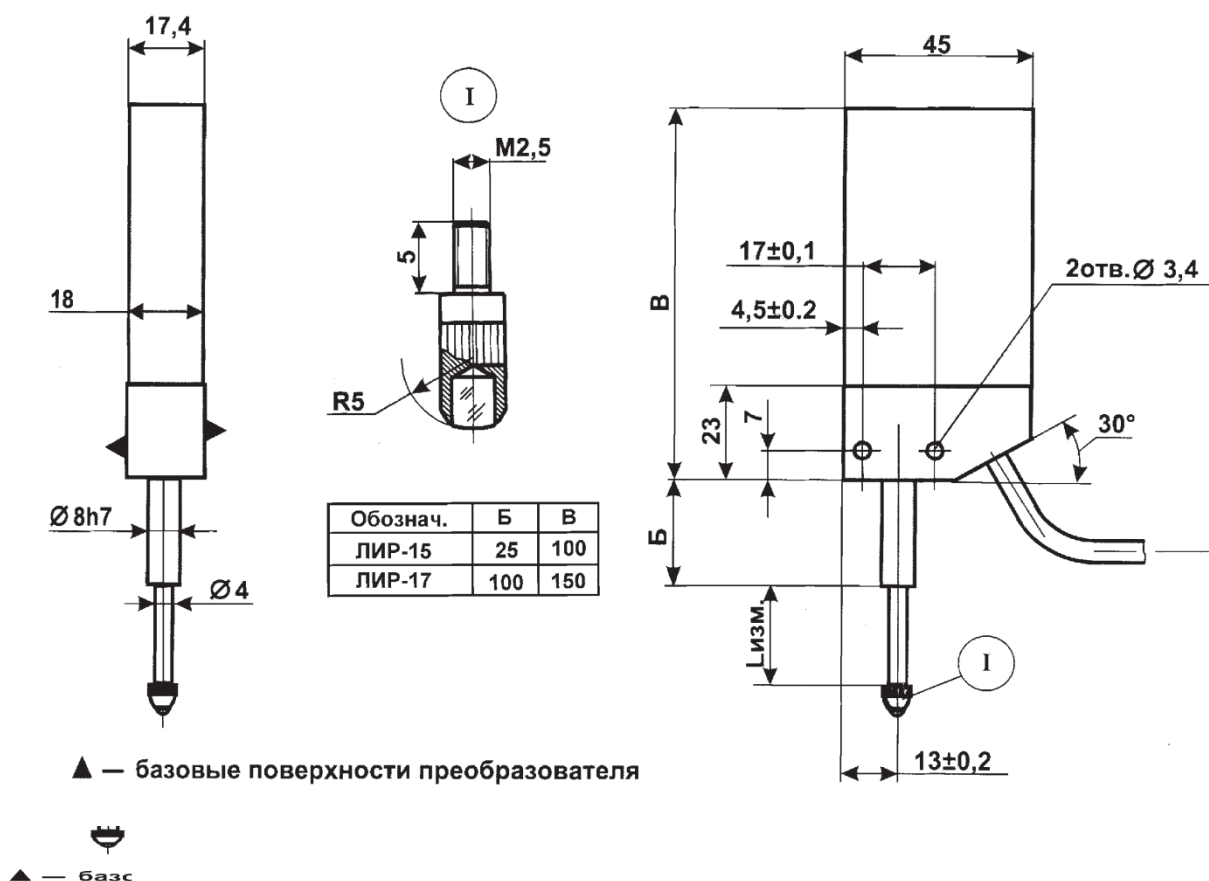


Рис. 7.12. Геометрические параметры преобразователей угловых перемещений ЛИР-15, ЛИР-17

Таблица 7.4

Технические характеристики преобразователей линейных перемещений

Наименование характеристики	Тип преобразователя											
	ЛИР-7			ЛИР-9			ЛИР-14			$\frac{\text{ЛИР-15}}{\text{ЛИР-17}}$		
Разрешающая способ- ность γ , мкм	до 0,1						—					
Стандартный ряд длин преобразуемого переме- щения L, мм	0,07;0,12;0,17;0,22;0,27;0,32;0,37;0,42; 0,47;0,52;0,57;0,62;0,72;0,82;0,92;1,02; 1,14;1,24 1,34;1,44;1,54; 1,64;1,74;1,84; 1,94;2,04;2,24; 2,64;2,84; 3,04;3,22						20; 8			$\frac{20}{40}$		
Напряжение питания U, В	+5		± 12	+5		± 12	+5		± 12	+5		± 12
Потребляемый ток I, мА	≤ 100	≤ 150	≤ 70	≤ 100	≤ 150	≤ 70	≤ 100	≤ 150	≤ 70	≤ 100	≤ 150	≤ 70
Тип выходного сигнала	СТ СН	ПИ	СН	СТ СН	ПИ	СН	СТ СН	ПИ	СН	СТ СН	ПИ	СН
Период выходного сиг- нала δ , мкм	20 40		20 40	20 40		20 40	20 40		20 40	20 40		20 40

Окончание табл. 7.4

Наименование характеристики	Тип преобразователя			
	ЛИР — 7	ЛИР — 9	ЛИР — 14	$\frac{\text{ЛИР-15}}{\text{ЛИР-17}}$
Класс точности i	3; 4		2; 3	$\frac{2;3}{3;4}$
Предельная погрешность преобразователя i -го класса точности Δ_p , мкм	$\Delta_3 = 2 + 4,5L$		$\Delta_2 = 1 + 2,5L$	$\Delta_2 = 1 + 2,5L$ $\Delta_3 = 2 + 4,5L$ $\Delta_3 = 2 + 2,5L$ $\Delta_4 = 5 + 8L$
Максимальная скорость перемещения v , м/с	1	1	1	1
Максимальное ускорение a , м/с ²	0,5	0,5	0,5	0,5
Степень защиты от внешних воздействий	IP53	IP53	IP64	IP64
Масса, м, кг	$0,18 + 0,6L$	$0,28 + 1,55L$	0,20	$\frac{0,18}{0,25}$

Геометрические параметры преобразователей угловых перемещений ЛИР-119А, ЛИР-128А-3, ЛИР-137А даны на рис. 7.13...7.15, а некоторые их технические характеристики — в табл. 7.5.

При поступательном движении выходного звена мехатронного модуля и использовании фотоимпульсного датчика или преобразователя линейного перемещения величину его перемещения S можно определить в виде:

$$S = \gamma n, \text{ мкм}, \quad (7.1)$$

где γ — разрешающая способность датчика (преобразователя), мкм; n — число дискрет, соответствующее перемещению звена.

При вращательном движении угол φ поворота звена определяют по формуле

$$\varphi = \frac{2\pi n}{\gamma}, \text{ рад}, \quad (7.2)$$

где γ — разрешающая способность датчика (преобразователя), дискрет/об; n — число дискрет, соответствующее углу поворота звена.

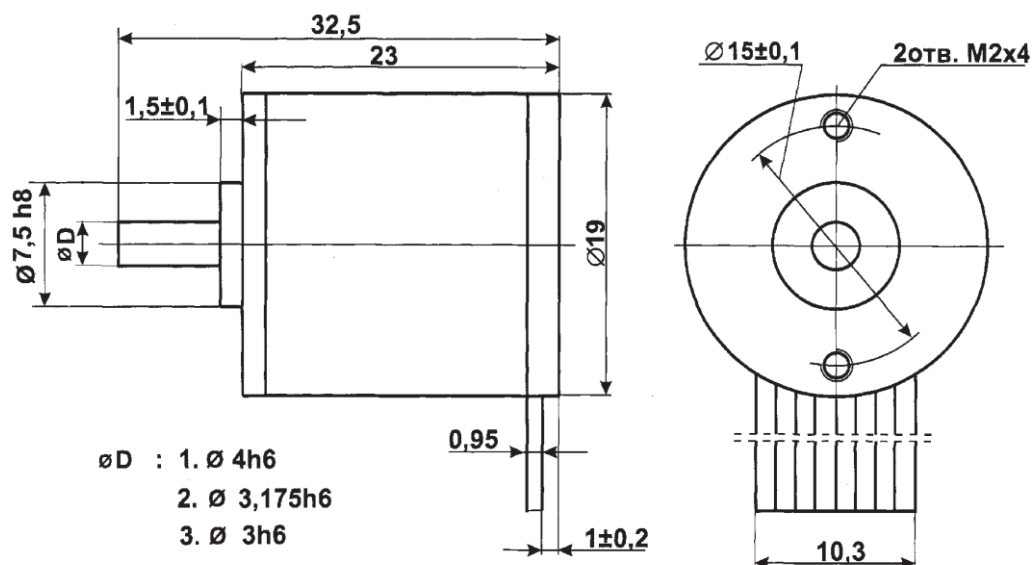


Рис. 7.13. Геометрические параметры преобразователя угловых перемещений ЛИР-119А

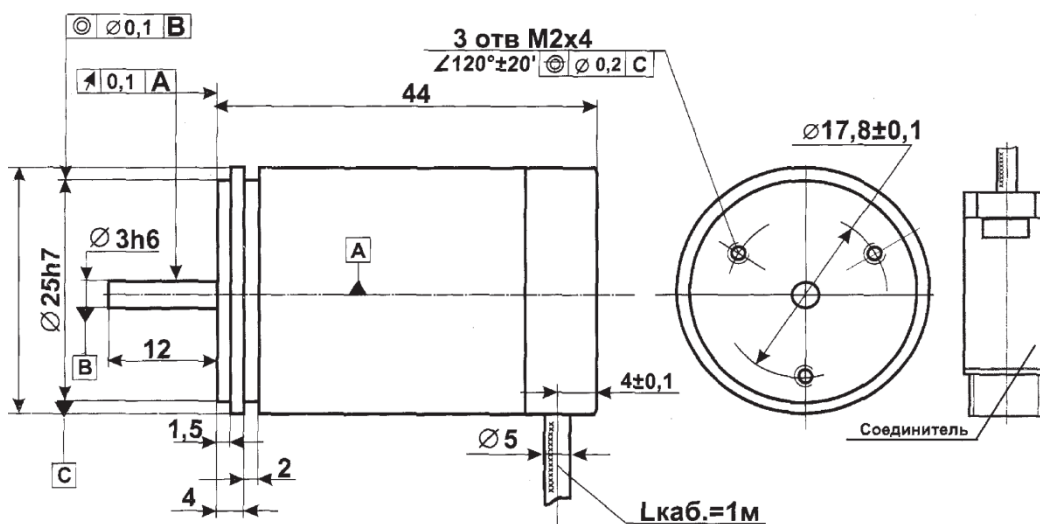


Рис. 7.14. Геометрические параметры преобразователя угловых перемещений ЛИР-128А-3

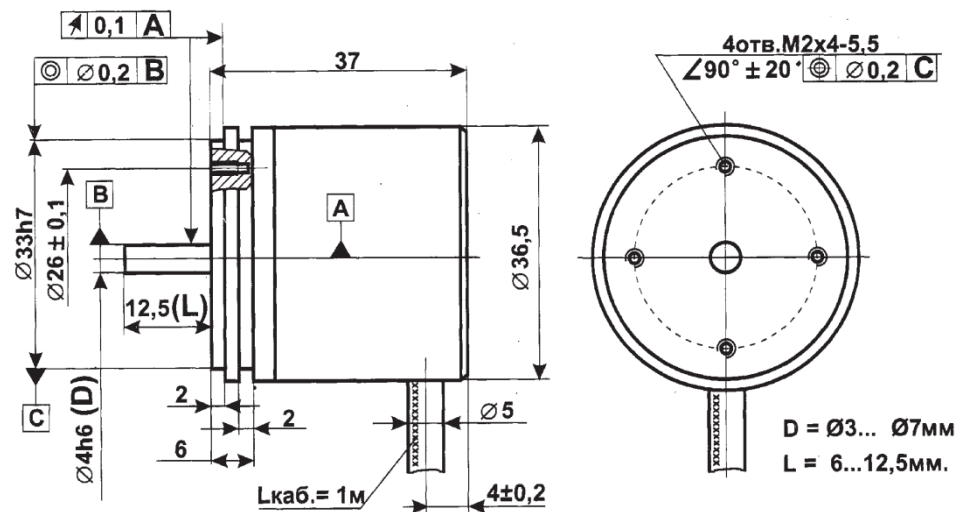


Рис. 7.15. Геометрические параметры преобразователей угловых перемещений ЛИР-137А

Таблица 7.5

Технические характеристики преобразователей угловых перемещений

Наименование характеристики	Тип преобразователя				
	ЛИР-119А	ЛИР-128А-3		ЛИР-137А	
Разрешающая способность γ , дискрет/об	до $4 \cdot 10^4$	до $2 \cdot 10^5$		до $5 \cdot 10^5$	
Напряжение питания U, В	+5	+5		+5	
Потребляемый ток I, мА	≤ 150	< 100	≤ 150	< 100	≤ 150
Выходной сигнал	ПИ	СТ, СН	ПИ	СТ, СН	ПИ
Класс точности i	8	7, 8		7, 8	
Максимальная частота вращения вала n , об/мин	10^4	10^4		10^4	
Масса (без кабеля) m , кг	0,02	0,06		0,09	

Для приема и обработки электрических сигналов, поступающих от оптоэлектронных преобразователей линейных и угловых перемещений, и осуществления визуализации на цифровом табло полученной информации применяют устройства цифровой индикации (УЦИ).

УЦИ могут быть использованы в качестве специализированных комплектующих изделий в составе информационно-измерительных систем различных машин и приборов при измерении и контроле механических перемещений.

Применение цифрового отсчета вместо визуального съема показаний со шкал лимбов предотвращает субъективные ошибки считывания, значительно уменьшает утомляемость, позволяет производить контроль без остановки технологического процесса и без периодического измерения размеров обрабатываемых деталей с помощью универсальных измерительных средств.

В основе схемотехники УЦИ, выпускаемых СКБ ИС, использован широко распространенный микроконтроллер с ядром 8051, позволяющий создавать как универсальное, так и специализированное программное обеспечение. Светодиодные индикаторы фирмы *HewlettPackard* обеспечивают хорошую яркость и разборчивость вывода информации.

Управление цифровых образовательных технологий

Возможность встраивания в УЦИ последовательного канала RS- 232 и различных элементов ввода/вывода позволяют взаимодействовать УЦИ с другими устройствами.

УЦИ выпускают нескольких типов, рассчитанных на работу с одним, двумя или тремя преобразователями, способных одновременно контролировать перемещение по одной, двум или трем осям соответственно.

СКБ ИС выпускает простейшие по своим функциональным возможностям УЦИ серий ЛИР-510, ЛИР-520, ЛИР-530. Базовый набор функций этой серии УЦИ включает:

- обнуление текущего значения в любом месте контролируемого перемещения;
- осуществление контроля текущего положения рабочего органа относительно положения референтной метки преобразователя;
- работу в приращениях.

Дальнейшим развитием УЦИ в плане их функциональных возможностей является серия ЛИР-511, ЛИР-521, ЛИР-531. Они имеют на передней панели цифровую клавиатуру и ряд функциональных кнопок, что позволяет наряду с универсальностью приборов этой серии ввести в них ряд специфических функций, связанных с особенностями эксплуатации.

В базовый набор функций этой серии УЦИ кроме возможностей, присущих простейшим моделям, включены:

- ❖ предустановка текущего значения показателей индикатора;
- ❖ предустановка положения референтной метки;
- ❖ задание и изменение направления отсчета;
- ❖ удвоение показателей отсчета (функция удобна при измерениях, связанных с телами вращения);
- ❖ компенсация люфта;
- ❖ компенсация систематической погрешности;
- ❖ компенсация размера инструмента;
- ❖ сохранение всех параметров в энергонезависимой памяти.

Кроме индикационных устройств СКБ ИС выпускают серию приборов ЛИР-512, ЛИР-522, ЛИР-532.

Включая в себя весь вышеперечисленный набор функций, эти устройства обладают способностью вырабатывать в соответствии с заданием управляющие сигналы, выполняя тем самым не только индикационные функции, но и функции управления.

Для приема внешних сигналов от различного рода путевых выключателей или дополнительных органов управления в УЦИ предусмотрена установка шестнадцати приемников внешнего сигнала.

Отдельно выделяется ряд УЦИ, использующих в качестве датчиков квазиабсолютные и абсолютные преобразователи угла и положения. Такие приборы образуют серию УЦИ ЛИР-515, ЛИР-525, ЛИР-535.

Использование подобных систем связано с требованиями некоторых технологических процессов сразу после подачи питающего напряжения определить точное положение рабочих органов в пространстве без каких-либо перемещений.

Все УЦИ выпускают с фиксированной разрешающей способностью (дискретностью). Это означает, что разрешающая способность γ подключаемого преобразователя должна соответствовать разрешающей способности d_{HKC} для входного сигнала УЦИ и не изменяться в процессе эксплуатации.

В случае использования линейного преобразователя перемещения его разрешающая способность γ определяет минимально-возможную дискретность d_{HKC} измеряемого значения.

При использовании углового преобразователя в качестве преобразователя линейных перемещений минимально возможную дискретность d_{HKC} измеряемого значения перемещения можно рассчитать по формуле

$$d_{\text{инд}} = \frac{10^3 L}{4n_{\pi}}, \text{ мкм}, \quad (7.3)$$

где L — линейное перемещение за один оборот преобразователя, мм (например, шаг резьбы винта); n_T — число периодов выходного сигнала за один оборот преобразователя движения (паспортное значение).

Стандартный ряд дискретностей $d_{\text{инд}}$ для УЦИ при измерении линейных перемещений: 0,1 мкм, 0,5 мкм, 1 мкм, 10 мкм.

Если угловые преобразователи перемещения используют в качестве датчика угла поворота, то n_T — число периодов выходного сигнала за один оборот преобразователя (паспортное значение) — определяет дискретность индицируемого угла поворота. В зависимости от модификации УЦИ могут индицировать угол в градусах и долях градуса, либо в градусах, угловых минутах и угловых секундах. Стандартный ряд дискретностей $d_{\text{инд}}$ для измерения угла: $0,0001^\circ$, $0,0002^\circ$, $0,0005^\circ$, $0,001^\circ$, $0,002^\circ$, $0,005^\circ$, $0,01^\circ$.

УЦИ, рассчитанные на работу с преобразователями перемещений в типовом исполнении, имеют максимально допустимую частоту входного сигнала, равную $f_{\text{max}} = 0,6$ МГц, что соответствует частоте смены

фаз входного сигнала 2,4 МГц. Исходя из этого можно рассчитать максимально допустимую линейную скорость измерительной системы при использовании линейного преобразователя:

$$V_{\text{max}} = 4f_{\text{max}}d_{\text{инд}}. \quad (7.4)$$

Для углового преобразователя максимально возможную угловую рабочую скорость измерительной системы рассчитывают по формуле

$$\omega_{\text{max}} = \frac{10f_{\text{max}}}{n}. \quad (7.5)$$

Устройство цифровой индикации ЛИР-531, предназначенное для использования в системах, станках, мехатронных устройствах, где имеется необходимость визуального контроля по трем направлениям с использованием трех измерительных преобразователей, изображено на рис. 7.16. УЦИ ЛИР-531 может работать с линейными и угловыми преобразователями перемещений и индицировать значение линейного перемещения в миллиметрах и долях миллиметра или угол поворота в градусной мере, а также в различных комбинациях.

Для соединения концов валов преобразователей движения и датчиков информации, а также компенсации несоосности этих валов в ММ применяют муфты.

В ММ с преобразователями угловых перемещений ЛИР используют муфты ЛИР-800, ЛИР-801, ЛИР-803, ЛИР-805, ЛИР-807.

Конструктивное исполнение и геометрические параметры муфт ЛИР-800, ЛИР-801, ЛИР-803, ЛИР-805 и ЛИР-807 приведены на рис. 7.17—7.21, а технические характеристики — в табл. 7.6.

Вращающиеся трансформаторы (ВТ) представляют собой электрические индукционные машины переменного тока, выходное напряжение которых зависит от угла поворота ротора. Характер этой зависимости определяется конструкцией и схемой включения обмоток ВТ.

Вращающиеся трансформаторы (см. рис. 7.22) имеют по две одинаковые взаимно перпендикулярные первичные обмотки (возбуждения и квадратурную) и вторичные (синусную и косинусную). Существуют синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ) с компенсационными обмотками обратной связи, которые предназначены для компенсации основных и дополнительных погрешностей.

Основные погрешности возникают в нормальных условиях и обусловлены принципом работы ВТ, конструктивными и технологическими причинами. Дополнительные погрешности возникают при изменении температуры окружающей среды, амплитуды и частоты питающего напряжения.

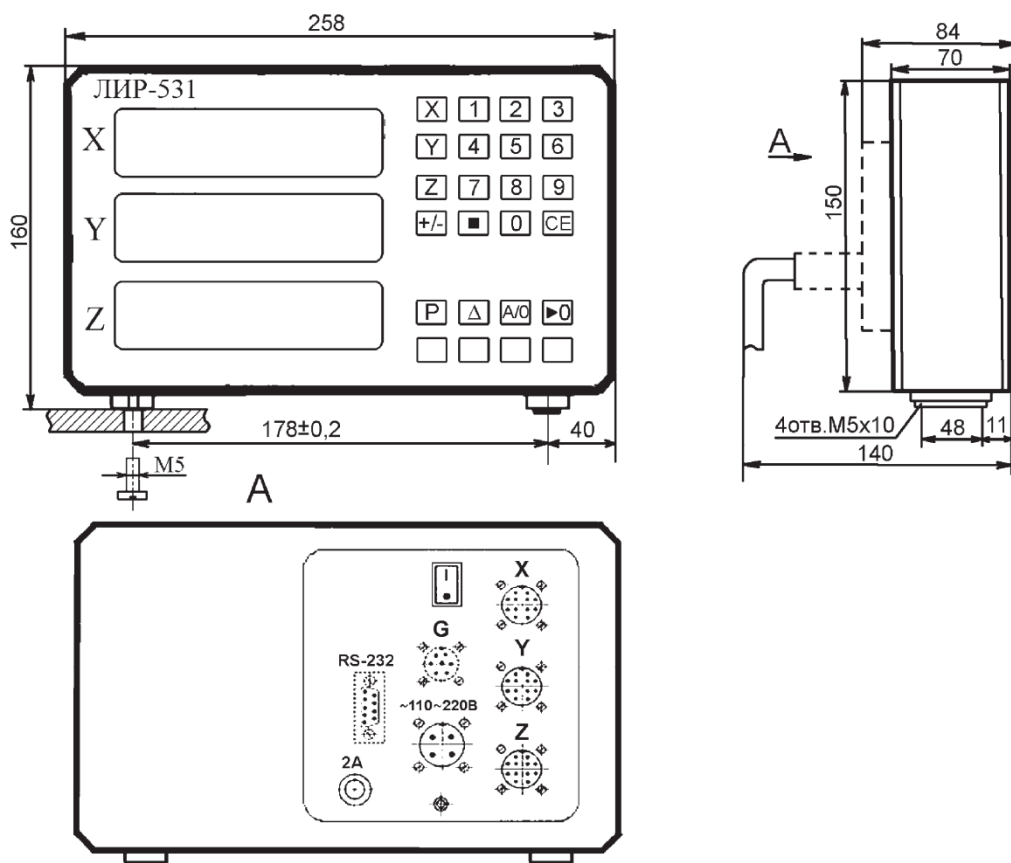


Рис. 7.16. Устройство цифровой индикации ЛИР-531

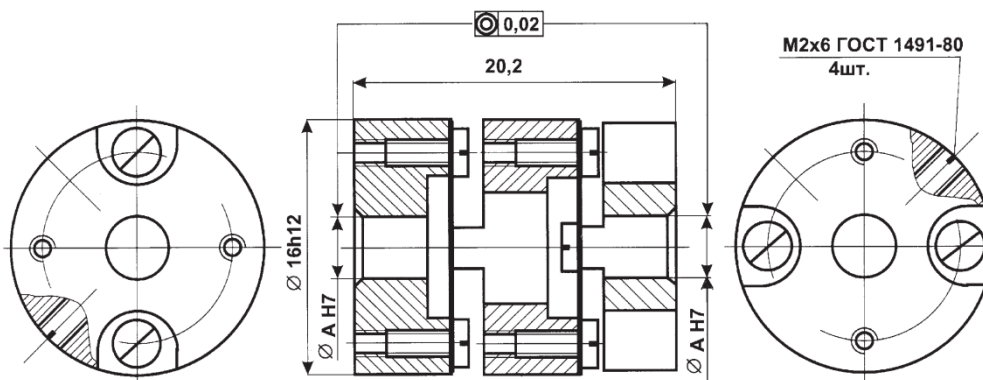


Рис. 7.17. Муфта ЛИР-800

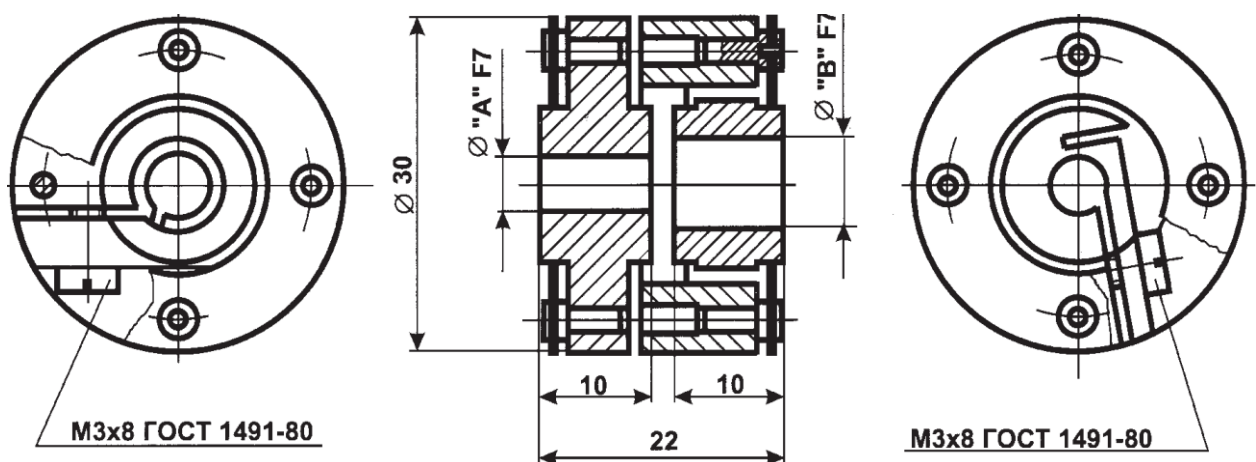


Рис. 7.18. Муфта ЛИР-801

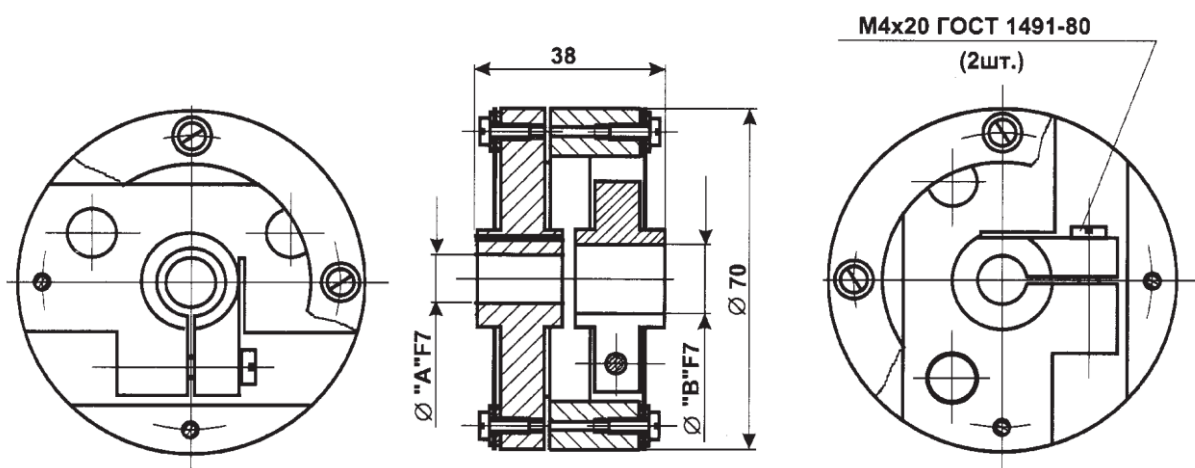


Рис. 7.19. Муфта ЛИР-803

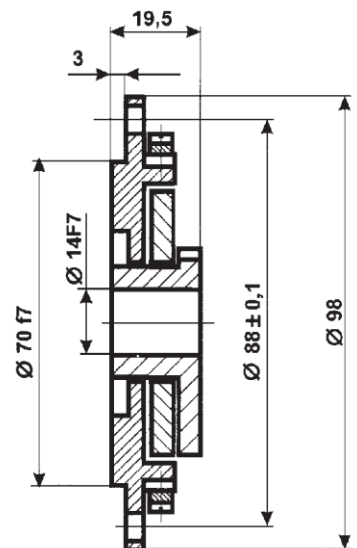
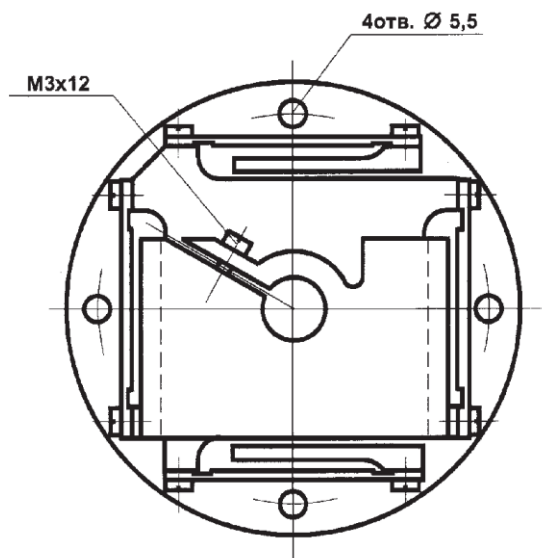


Рис. 7.20. Муфта ЛИР-805

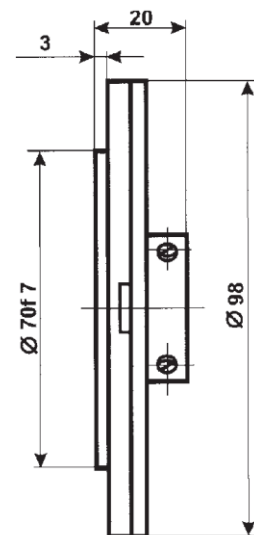
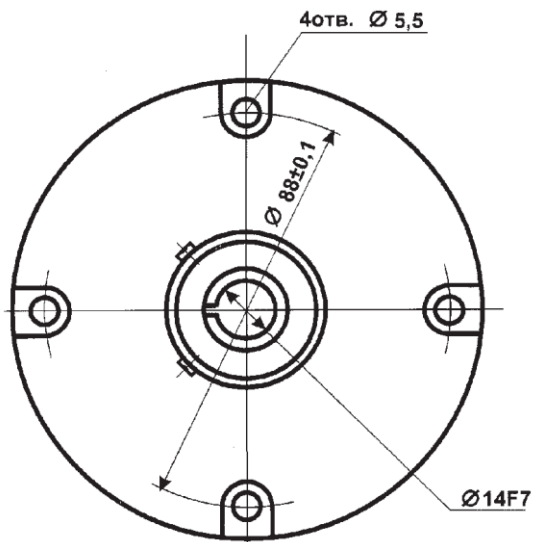


Рис. 7.21. Муфта ЛИР-807

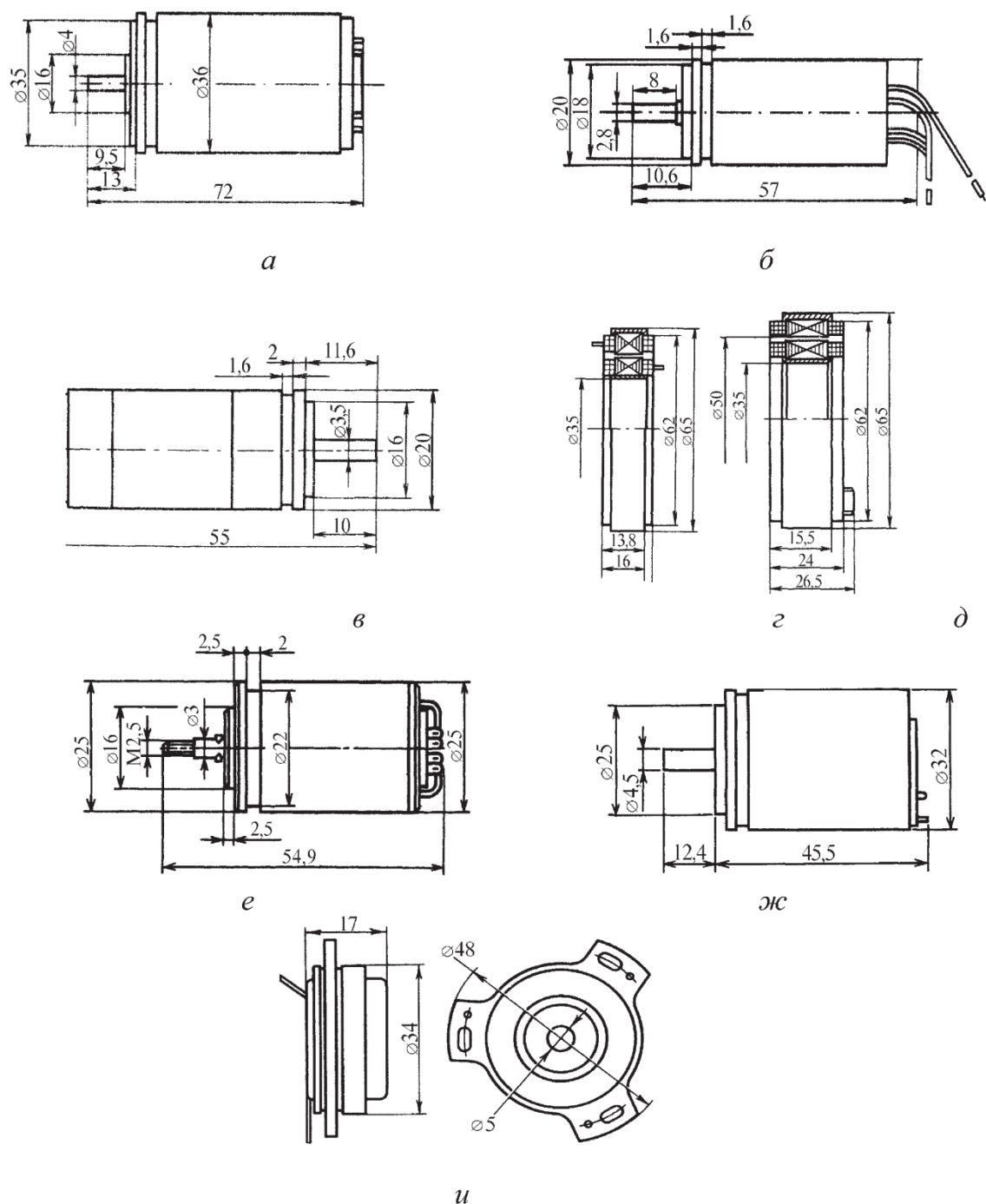


Рис. 7.22. Приборы для измерения угла поворота:
 а — вращающийся трансформатор МВТ-2;
 б — вращающийся трансформатор ВТ-20-Д29;
 в — вращающийся трансформатор БСКТ-220—1;
 г — вращающийся трансформатор СКТ-6465;
 д — вращающийся трансформатор СКТД-6465;
 е — фазовращатель БИФ-019; ж — датчик угла 50ДС-32—1;
 и — датчик угла ДУ-34—1

Таблица 7.6

Технические характеристики муфт ЛИР

Наименование характеристики	Типы муфт				
	ЛИР-800	ЛИР-801	ЛИР-803	ЛИР-805	ЛИР-807
Ошибка передачи вращения, (...")	± 30	± 10	± 2	$\pm 0,5$	± 1
при радиальном сме- щении осей, мм	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$
и угловом наклоне осей, град	$\leq 0,09$	$\leq 0,09$	$\leq 0,09$	$\leq 0,03$	$\leq 0,09$
Жесткость на круче- ние, Нм/рад	50	150	4000	6000	4000
Допустимый момент вращения, Н·м	0,04	0,1	0,5	1,0	1,0
Допустимое радиаль- ное смещение осей, мм	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$
Допустимый наклон осей, град	$\leq 0,5$	$\leq 1,0$	$\leq 0,5$	$\leq 1,0$	$\leq 0,2$
Допустимое осевое смещение, мм	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$	$\leq 0,1$	$\leq 0,5$
Момент инерции, кг·м ²	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Максимальная ско- рость вращения, об/мин	10000	16000	3000	1000	1000
Масса муфты (не бо- лее), кг	0,007	0,027	0,22	0,25	0,21
Посадочные диамет- ры А и В, мм	3 и 4	3...10	10 и 14	—	—

В зависимости от расположения обмоток возбуждения ВТ могут быть с пита-
нием со стороны статора или ротора и с напряжением возбуждения постоянной или
переменной амплитуды.

По характеру токосъема ВТ могут быть контактными и бесконтактными. Глав-
ным техническим показателем ВТ является точность выполнения им функциональ-
ных преобразований.

В ММ применяют двухполюсные и многополюсные вращающиеся трансформаторы, работающие в режимах: синусно-косинусном, линейном, фазовращателя, дистанционной передачи угла.

На основе синусно-косинусных ВТ в качестве датчиков углового положения используют фазовращатели (рис. 7.22, е), которые обеспечивают линейное изменение фазы выходного напряжения как функции угла поворота ротора. Как следует из принципа действия ВТ, за один оборот ротора с его выходной обмотки снимается один период напряжения, что не всегда обеспечивает требуемую дискретность. Для ее обеспечения необходимо определенная редукция. Эту редукцию обеспечивают электрическим делением фазы на сто или двести и включением ВТ через повышающую механическую передачу (мультипликатор). Однако применение в цепи обратной связи механического преобразователя движения, имеющего собственную кинематическую погрешность, снижает ее точность и уменьшает надежность.

В этой связи интерес представляют многополюсные вращающиеся трансформаторы, которые имеют большое число пар P полюсов. В зависимости от конструктивных особенностей их подразделяют на редуктосины и индуктосины.

При работе редуктосина (рис. 7.23) в режиме фазовращателя фаза его выходного сигнала зависит от угла поворота ротора. За один период изменения напряжения питания магнитное поле повернется на угол $2\pi/P$ (а не на 2π , как у ВТ). Следовательно, при повороте ротора на угол $2\pi/P$ фаза выходного сигнала повернется на угол 2π .

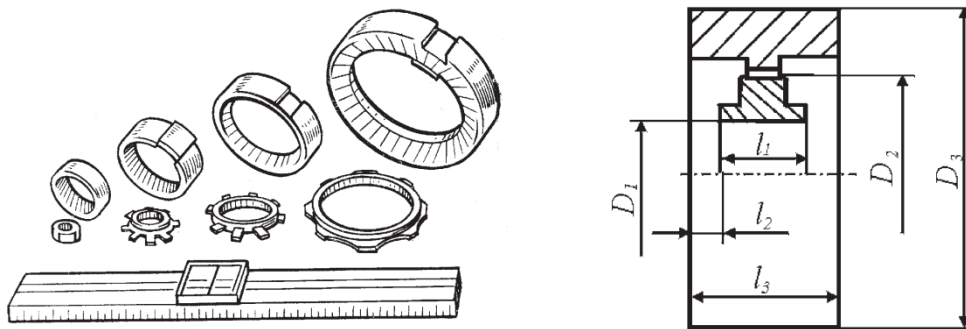


Рис. 7.23. Типоряд редуктосинов ВТ

Использование редуктосинов с большим числом пар P полюсов позволяет во многих случаях применять их без повышающего механического преобразователя.

Редуктосин имеет встраиваемую конструкцию, обычно его устанавливают на валу, напрямую соединенным с валом двигателя.

Геометрические параметры и технические характеристики некоторых редуктосинов приведены соответственно в табл. 7.7, 7.8.

Таблица 7.7

Геометрические параметры редуктосинов, мм

Тип редуктосина	D_1	D_2	D_3	l_1	l_2	l_3
BT 40	10	21,6	40	8,5	2,2	16
BT 60	20	39,4	60	9,5	0,7	20
BT 80	35	54,2	80	10	1,2	16
BT 120	66	84	120	12	0,7	22

Угловая погрешность некоторых редуктосинов, работающих в режиме фазовращателя, достигает 1'.

Индуктосины — многополюсные ВТ с печатными обмотками, выполненными на неферромагнитном сердечнике.

Для контроля высокоточных угловых и линейных перемещений в ММ применяют круговые и линейные индуктосины.

Круговые индуктосины представляют собой электрическую микромашину плоской конструкции с двумя изолированными дисками, на которых расположены печатные обмотки. Один из дисков соединен с валом исполнительного механизма (ротор), а второй неподвижен (статор). Обмотки выполняют однослойными и многослойными. Чаще всего применяют индуктосины с многополюсной однофазной обмоткой на статоре и двухфазной секционной обмоткой на роторе.

В режиме фазовращателя питание обмоток индуктосина осуществляют переменным напряжением с частотой 10 — 100 кГц, сдвинутым по фазе на 90°.

Погрешность преобразования кругового индуктосина не превышает 5".

Линейный индуктосин по принципу действия аналогичен круговому. Он состоит из длинной линейки, установленной на неподвижной части ММ и имеющей однофазную многополюсную обмотку, и короткой головки считывания (сканирующей головки), устанавливаемой на подвижном элементе модуля. Обмотка короткой линейки — двухфазная, со сдвигом фазы на 90°. Один полюс составляет обычно 2 мм, длина головки 100 мм, а длина линейки 250 мм. Для перемещений более 250 мм линейки стыкуют по торцам, образуя наборную шкалу.

Погрешность линейного индуктосина составляет 0,001.. 0,002 мм. Индуктосины изготавливают в открытом исполнении и встраивают прямым монтажом в конструкцию мехатронного модуля.

Технические характеристики вращающихся трансформаторов типов МВТ-2, ВТ-20-Д29, БСКТ-220—1, СКТ-6465, СКТД-6465, фазовращателя БИФ-019, датчиков угла 50ДС-32—1 и ДУ-34—1 приведены в табл. 7.8.

Таблица 7.8

Технические характеристики вращающихся трансформаторов

Тип датчика		Наименование характеристики						
		Номинальное напряжение, В	Частота напряжения возбуждения, Гц	Погрешность отображения, %	Частота вращения вала, об/мин	Момент статического трения, Н·м	Гарантийная наработка, ч	Масса, кг
МВТ-2 (СКВТ)		30 28	400	±0,02 ±0,04 ±0,06 ±0,1	60	0,0015	2000	0,35
ВТ20-Д29 (СКВТ)		27 12	400	±0,05 ±0,1 ±0,2	5 120	0,001	2000	0,065
БСКТ-220—1 (СКВТ)		36	400	±0,2 ±0,35 ±0,5	125	0,0004	3000	0,07
СКТ-6465 (СКВТ)		36	400	±1' ±2'	—	—	2200	0,18
СКТД-6465 (СКТВ)		36	400	±2'	—	—	2200	0,3
БИФ-019 (фазовращатель)		15	150·10 ³	±30'	150	0,0005	5000	—
50ДС-32—1 (датчик угла)		36	400	±0,05... ±1,5	Рабочий угол поворота ротора ±50°		2200	0,17
ДУ-34—1 (датчик угла)		40	1000	15'	Рабочий угол поворота ротора 360°		2000	0,055
Редуктоины	ВТ40	≤13,2	2000	10'	5000	—	2000	0,1
	ВТ60	≤13,2	2000	5'; 10'	5000	—	2000	0,16
	ВТ80	≤13,2	2000	3'; 5'; 10'	5000	—	2000	0,3
	ВТ120	≤13,2	2000	5'; 10'	2000	—	2000	0,5

Крепление вращающихся трансформаторов — фланцевое с упорным буртиком. Режим работы продолжительный.

Датчики скорости

Датчики скорости предназначены для получения в ММ сигнала обратной связи по скорости, которая является корректирующей обратной связью, обеспечивающей устойчивость работы ММ. Поэтому к датчикам скорости не предъявляют таких жестких требований по линейности и точности, как к датчикам положения. Они должны иметь хорошую чувствительность, особенно при малых скоростях.

Для получения сигнала по скорости в мехатронном модуле могут быть использованы импульсные датчики, рассмотренные выше. В этом случае ММ должен дополнительно содержать преобразователь частоты импульсов в скоростной сиг-

нал. Точность получения скоростного сигнала таким способом зависит от числа импульсов на оборот вала. Таким образом, использование в силовом модуле импульсного датчика позволяет выделить два сигнала: по положению и по скорости, что упрощает конструкцию ММ.

Для получения сигнала только по скорости используют специальные датчики скорости — тахогенераторы и фотоимпульсные датчики скорости.

Тахогенераторы представляют собой электрические микромашины, выходное напряжение которых пропорционально угловой скорости вращения ротора. В зависимости от принципа действия тахогенераторы делят на три группы: тахогенераторы постоянного тока, асинхронные и синхронные. Тип тахогенератора выбирают в зависимости от требований точности, линейности скоростной характеристики, диапазона изменения частоты вращения двигателя, условий эксплуатации, надежности, габаритных размеров, массы.

В ММ с коллекторными двигателями постоянного тока, как правило, применяют коллекторные тахогенераторы постоянного тока. В модулях с бесконтактными асинхронными и синхронными двигателями, применяемыми во взрыво- и пожароопасных средах, используют бесконтактные асинхронные и синхронные тахогенераторы.

В качестве тахогенераторов постоянного тока (ТГП) применяют двухполюсные микромашины постоянного тока с электромагнитным и магнитоэлектрическим (от постоянных магнитов) возбуждение

Коллекторные генераторы постоянного тока ТГП-1 и ТГП-1А с зубцовым ротором изображены на рис. 7.24, встраиваемый тахогенератор ТП-80—20—02 — на рис. 7.25. Их технические характеристики приведены в [15].

Асинхронные тахогенераторы (ТГА) представляют собой двухфазную электрическую микромашину с полым немагнитным ротором. На статоре расположены две обмотки: возбуждения и генераторная.

Асинхронный однофазный тахогенератор ТГ-5А с полым немагнитным ротором и термокомпенсатором температурной погрешности выходного напряжения представлен на рис. 7.26, его технические характеристики приведены в [15].

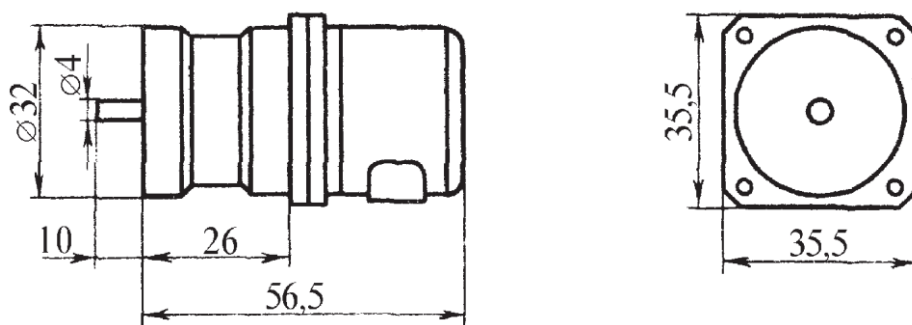


Рис. 7.24. Тахогенератор ТГП-1 (ТГП-1А)

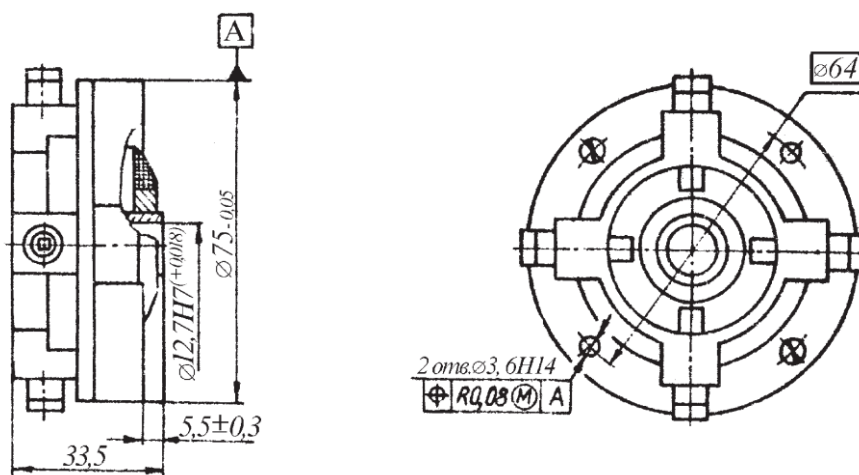


Рис. 7.25. Тахогенератор ТП-80-20-02

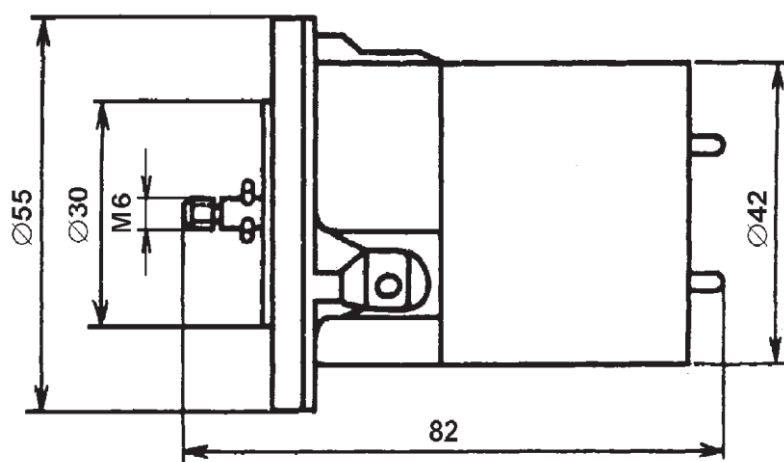


Рис. 7.26. Тахогенератор ТГ-5А

Синхронные тахогенераторы (ТГ) представляют собой информационную электрическую микромашину с возбуждением от постоянных магнитов, расположенных на роторе. Амплитуда и частота выходного сигнала являются функциями частоты вращения ротора.

Синхронные двухполюсные трехфазные тахогенераторы СГ-024 и СГ-025 показаны на рис. 7.27, а их технические характеристики даны в [15].

Электрический сигнал тахогенератора находится в прямой зависимости от частоты вращения вала. Поэтому его устанавливают на быстроходном валу ММ: либо непосредственно на валу двигателя, либо соединяют с ним при помощи кинематического преобразователя движения. При согласовании частот вращения валов тахогенератора и двигателя необходимо наиболее полно использовать рабочий диапазон частот вращения тахогенератора, не превышая при этом его наибольшей частоты вращения. Соединение валов двигателя и тахогенератора должно быть безлюфтовым, так как люфт приводит к искажению скоростного сигнала.

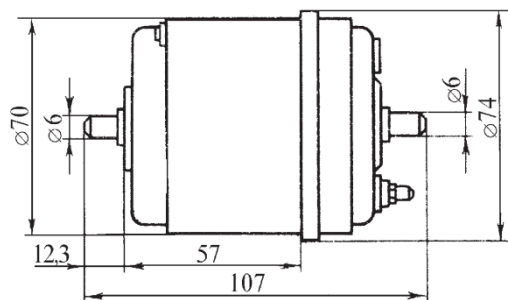


Рис. 7.27. Тахогенератор СГ-024 (СГ-025)

Как правило, все тахогенераторы представляют собой электрические микромашины, выполненные в виде законченных конструктивных узлов, но также могут иметь встраиваемое исполнение. Встраиваемый тахогенератор устанавливают непосредственно на валу, а его корпус скрепляют с корпусом двигателя. Кроме того, двигатели некоторых серий имеют в своем составе встроенный тахогенератор, например, двигатели серий ДПМ, ДП, ДПУ, ПЯ.

Фотоимпульсный датчик скорости представляет собой устройство, состоящее из источника излучения (светодиода), фотоприемника (фотодиода) и подвижного элемента — диска или линейки — с равномерно распределенными на них отверстиями или прорезями. Диск или линейку крепят на неподвижном элементе ММ.

В фотоимпульсном датчике угловой скорости (рис. 7.28) световой поток от источника излучения 1, проходя через отверстия или прорези в диске 2, попадает на чувствительную поверхность фотоприемника 3, генерируя в нем электрические импульсы с частотой

$$f = \frac{a}{t}, \text{ Гц}, \quad (7.6)$$

где a — число импульсов; t — время перемещения подвижного элемента — диска (при линейном перемещении — линейки), с.

Угловую скорость диска, а соответственно и вала на котором он закреплен, определяют в виде:

$$\omega = \alpha f = \frac{2\pi f}{N}, \text{ рад/с}, \quad (7.7)$$

где α — значение одного импульса, рад; N — число отверстий или прорезей вдоль окружности диска.

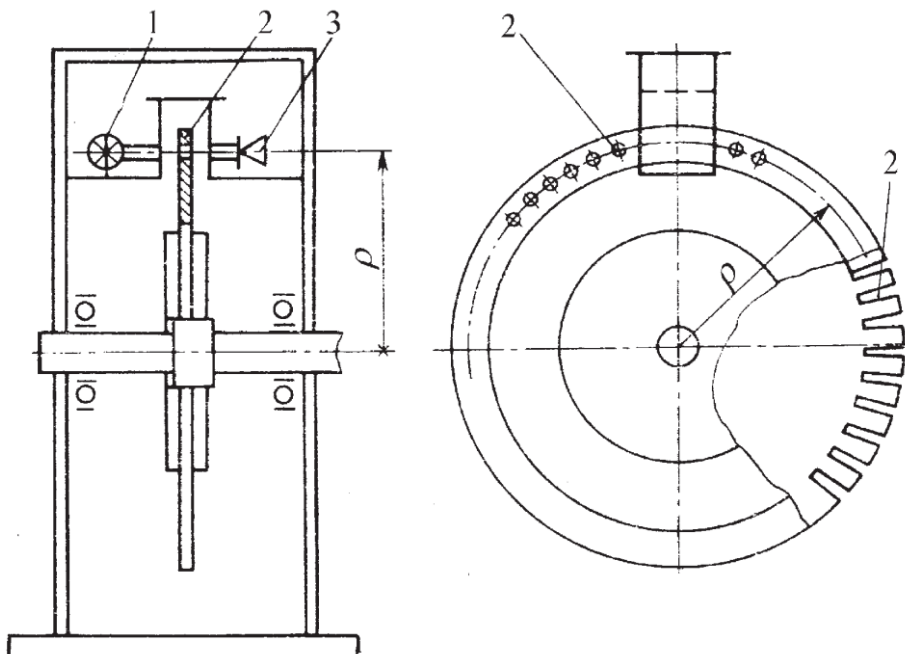


Рис. 7.28. Фотоимпульсный датчик угловой скорости

В фотоимпульсном датчике линейной скорости, содержащем линейку с равномерно распределенными на ней отверстиями или прорезями, частоту генерируемых в фотоприемнике электрических импульсов определяют по приведенной выше формуле.

Линейную скорость линейки, а соответственно и поступательно перемещающегося элемента ММ, с которым она скреплена, определяют в виде:

$$v = Bf = \frac{Lf}{N}, \quad (7.8)$$

где B — значение одного импульса, м; L — длина линейки, м.

Рассмотренные фотоимпульсные датчики скорости можно использовать и для определения перемещений подвижного звена.

При вращательном (формула 7.9) и поступательном (формула 7.10) движении звена перемещение можно определить так:

$$\varphi = \frac{2\pi a}{N}, \text{ рад;} \quad (7.9)$$

$$S = \frac{La}{N}, \text{ м.} \quad (7.10)$$

Реле давления и манометры

Реле давления автоматически контролирует величину давления жидкости в гидросистеме гидроприводного ММ, подавая электрический сигнал при повышении или понижении давления по сравнению с величиной, на которую настроено реле.

Типичным случаем применения реле давления является подключение его к напорной линии перед гидродвигателем модуля. Реле регулируют на давление, на 0,3–0,5 МПа меньше максимально допустимого. При наличии перегрузки гидродвигателя реле включает сигнальную лампу на пульте управления. Возможна подача электрического сигнала от реле в цепь управления гидрораспределителя, что позволит оперативно реагировать на перегрузку остановкой или реверсированием гидродвигателя.

Основные элементы реле: золотник (как, например, в реле ПГ62—11) или мембрана (в реле Г62—21М), на которые непосредственно воздействует рабочая жидкость; пружина, затяжкой или ослаблением которой задают контролируемое давление; микропереключатель, под воздействием золотника или мембраны подающий электрический сигнал.

Основные параметры реле давления ПГ62—11 и Г62—21М приведены в табл. 7.9 [7].

Таблица 7.9

Основные параметры реле давления ПГ62—11 и Г62—21М

Параметр	ПГ62— 11	БПГ-62— 11	ВПГ-62— 11	ГПГ-62— 11	Г62— 21М
Контролируемое давление, МПа	0,6...5	0,8...10	1...20	5...32	0,5...6,4
Нечувствитель- ность, МПа	0,5	1,0	1,5		0,3
Утечка, дм ³ /мин, не более	0,01	0,02	0,05		—
Масса, кг	3,0				1,5

В качестве чувствительного элемента в большинстве типов манометров (датчиков давления жидкости в гидроприводных ММ) используется тонкостенная изогнутая трубка (так называемая трубка Бурдона). Под действием давления подаваемой в нее жидкости трубка распрямляется, передвигая связанное с ней входное звено преобразователя перемещения в пропорциональный электрический сигнал, проградуированный в единицах давления.

Манометры имеют следующие классы точности: 0,4; 0,6; 1; 1,5; 2,5; 4. Под классом точности понимают отношение наибольшей допустимой ошибки измерения к верхнему пределу измерения манометра, выраженное в процентах. Например, для манометра класса точности 2,5 с верхним пределом измерений 40 МПа наибольшая допустимая ошибка при измерении по верхнему пределу равна 1 МПа.

В табл. 7.10 приведены параметры стандартных манометров на давления от 2,5 МПа до 100 МПа.

Таблица 7.10

[illegible]

Лекция

**Тема 1.2.1. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДУЛИ
МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ. ОСОБЕННОСТИ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

ВОПРОСЫ

1. Общие положения, обобщенная функциональная схема и технические средства управления электромеханического модуля (ЭММ).
2. Особенности построения одноканального и многоканального ЭММ.
3. ЭММ в структурной схеме технологической машины и как объект проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические модули мехатронных систем. Основы расчета и проектирования. Учеб. пособие. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2001. - 173 с. (гл.1).

1.1. Общие положения

Технический прогресс невозможен без широкого применения управляемых мехатронных систем, основой которых является электропривод постоянного или переменного тока. Понятие системы следует рассматривать как совокупность некоторого числа подсистем с указанием связей между ними и цели функционирования. Для описания систем используют информационные модели, где каждый элемент (узел) системы представлен в виде блока (модуля), имеющего входной и выходной сигналы. Различают системы простые и сложные. При изучении простых систем используют физический подход к определению вещественно-энергетических свойств объекта исследования с разбивкой его на отдельные части. Закономерность поведения объекта в целом в дальнейшем реализуется путем обобщения результатов экспериментального исследования отдельных частей. Сложная система характеризуется большим числом взаимодействующих элементов и значительным числом связей. Для изучения сложных систем целесообразен целостный подход к объекту исследования на всех этапах реализации процедур, как представление

объекта в виде системы, математическое моделирование, оценка качества системы. Указанные процедуры формируют методологию системного подхода, отличающуюся от методологии физических исследований: отказ от изучения целого по частям, переход к математическому моделированию из-за трудности реализации физического эксперимента, введение понятия целевой функции для оценки качества системы.

Если рассматривать последовательность действий, характерную для системного подхода, в приложении к процессу проектирования ЭММ, то основная проектная процедура, выполняемая при поиске проектного решения, может быть представлена в виде: синтез – анализ – принятие решения. Под синтезом понимают процесс генерирования схмотехнических решений проектируемого ЭММ и выбор согласно значениям целевой функции одного или нескольких наиболее предпочтительных вариантов. Окончательная оценка конкурирующих вариантов возможна на стадии анализа и только после вычисления показателей качества ЭММ, непосредственно заложенных в техническом задании на проектирование. Окончательный выбор проектного варианта осуществляется проектировщиком по результатам анализа в процессе принятия решения при выполнении основной проектной процедуры (рис 1.1).

Различают структурный и параметрический анализ и синтез. Сначала производится выбор структуры схмотехнического (конструктивного) варианта, решения, а затем выбор его параметров. В общем случае процесс проектирования многошаговый (многокритериальный), регламентирован обычно соответствующей нормативно-технической документации (НТД) и начинается с формулирования технического задания (исходных данных). Основные требования к проектируемому ЭММ записываются в виде сложного функционала, отражающего основные технико-экономические требования к ЭММ. Исходные данные для проектирования ЭММ нижнего уровня управления (исполнительного) формируются в результате системного анализа на более

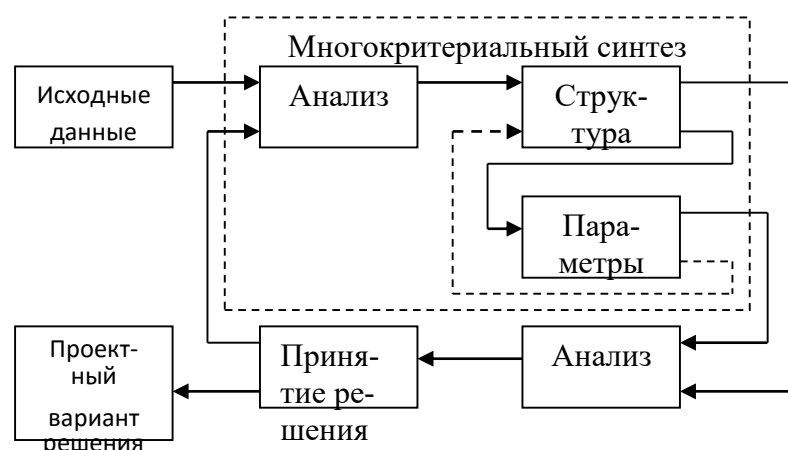


Рис. 1.1. Основная проектная процедура

высоком уровне (тактическом, стратегическом) управления полным автоматизированным комплексом мехатронной системы.

Синтез структуры системы управления ЭММ является наиболее ответственным и наименее формализованным этапом проектирования. Несмотря на многообразие возможных принципов управления, разработанных современной теорией автоматического управления (СТАУ), в настоящее время наибольшее распространение находит проектирование решения с использованием принципа последовательной коррекции (принципа подчиненного регулирования) с каскадным включением регуляторов. При переходе от использования аналоговой элементной базы в системах управления к включению микропроцессорных устройств значительно расширились функциональные возможности ЭММ, повысилась точность, надежность их работы, структурная гибкость и быстрота перенастраиваемости. Специфика проектирования микропроцессорных систем управления ЭММ, их исследование представляют собой, как правило, более сложный и трудоемкий процесс по сравнению с проектированием аналогичных систем непрерывного действия, что обусловлено квантованием сигналов в цифровых системах по времени и по уровню. Комплексный подход к вопросам проектирования цифровых автоматических систем с микропроцессорным управлением ЭММ, выбор структуры системы управления и программного обеспечения получили всестороннее освещение в литературе [1].

1.2. Обобщённая функциональная схема

электромеханического модуля

Электромеханический модуль (ЭММ) мехатронной системы представляет собой совокупность электродвигательного (ЭДУ) и преобразовательного (УПУ) устройств, системы автоматического управления (САУ), механической передачи исполнительного механизма (ИМ), объекта управления (ОУ). ЭММ предназначен для приведения рабочего органа ОУ в движение и управление этим движением по

заданному закону. Поскольку ЭММ является основным структурным узлом любой современной технологической машины автоматизированного производства, то можно констатировать, что повышение качества и производительности технологического оборудования сопряжено с преимущественным развитием и совершенствованием ЭММ и системы управления им [1, 2]. В то же время свойства электромеханического модуля (рис.1.2) определяются взаимосвязанными характеристиками элементов, образующих его подсистемы (механическую, электрическую и магнитную).

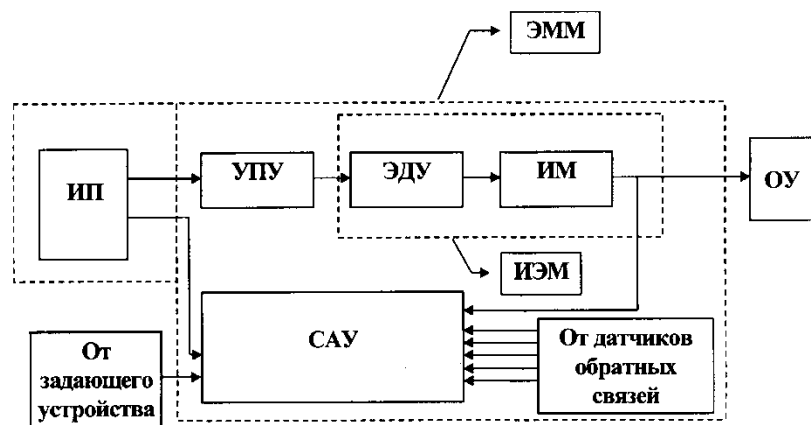


Рис. 1.2. Обобщённая функциональная схема электромеханического модуля

Источник питания (ИП) представляет собой систему электроснабжения (СЭС), обеспечивающую производство, распределение и передачу электрической энергии необходимого количества и заданного качества к ЭММ. Система электроснабжения может быть выполнена на постоянном, переменном или комбинированном токе. Независимо от используемого рода тока СЭС включает в себя следующие исходные элементы: непосредственно источник электроэнергии, регулирующие и согласующие устройства, аккумуляторные батареи или другие альтернативные источники. Выбор ИП осуществляется в зависимости от назначения ЭММ в целом, решаемых задач в технологическом процессе автоматизированного производства, технико-экономического обоснования выбора вида ИП на стадии технического предложения при проектировании ЭММ.

Усилительно-преобразовательное устройство (УПУ) является неотъемлемой частью структуры любого ЭММ [3]. Такие устройства создаются на базе полупроводниковых преобразователей: транзисторных для ЭММ с двигателями малой и средней мощности (от единиц микроватт до нескольких киловатт), тиристорных,

симисторных для двигателей мощностью от 10 до 2000 кВт. УПУ служат для преобразования электрического тока и напряжения: переменного тока в постоянный, постоянного тока в переменный; переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты; низкого постоянного напряжения в высокое постоянное напряжение. Основными характеристиками УПУ являются коэффициент полезного действия (КПД), коэффициент преобразования мощности. Особую значимость для УПУ имеет схемотехническое решение, позволяющее обеспечить усиление входных и широкий диапазон регулирования выходных параметров, малые габариты и массу собственно преобразовательного узла УПУ.

Электродвигательное устройство (ЭДУ) служит для преобразования электрической энергии в механическую в целях механического воздействия на объект управления (ОУ). Иными словами, ЭДУ должно развивать движущие усилия: движущий момент или механическое усилие, передаваемое ИМ, т.е. выполнять функции исполнительного устройства (ИУ) по перемещению рабочего органа в соответствии с заданным законом управления. В настоящее время в качестве электродвигательного устройства (ЭДУ) широко применяют коллекторные и бесконтактные двигатели постоянного тока, двух- и трехфазные асинхронные двигатели (АД), синхронные двигатели с постоянными магнитами, реактивные и гистерезисные, синхронные шаговые двигатели, различные модификации линейных двигателей постоянного и переменного тока. В автоматизированном производстве используют также электромагнитные ИУ (ЭИУ): электромагнитные муфты и преобразователи, ходовые электромагниты.

Под объектом управления (ОУ) следует понимать единицу технологического оборудования, в результате функционирования которой изменяется форма исходной заготовки, ее положение или физические свойства. В автоматизированном производстве используют сложные технологические комплексы, обеспечивающие обработку заготовки, размерный контроль, транспортирование и хранение изделия. При этом могут быть задействованы различные станки, автоматические устройства смены инструмента и изделия, автоматические накопители и специализированные системы манипулирования (включая промышленные роботы ПР). Каждый ОУ, в свою очередь, представляет конструктивный модуль, обеспечивающий возможность необходимого координатного перемещения (например, режущего инструмента) относительно изготавливаемого изделия в упругой системе (УС) ОУ. Под

УС ОУ подразумевают совокупность всех узлов и механизмов, составляющих корпусную неподвижную часть (несущую систему НС) и исполнительные механизмы (ИМ) приводов. Исполнительные механизмы непосредственно обеспечивают относительные перемещения рабочих органов, а их динамические свойства существенно влияют на выходные характеристики ЭММ [4].

1.3. Технические средства управления ЭММ

Преимущественное развитие и применение в настоящее время получают электромеханические модули управления МС, в которых в качестве исполнительного двигателя используется электродвигатель, а вся система управления режимами работы электродвигателя выполнена на силовых полупроводниковых приборах (СПП), электротехнических элементах, электронных и микроэлектронных устройствах. С точки зрения функционального назначения все составляющие ЭММ элементы, устройства можно разделить на элементы, устройства, обеспечивающие процессы получения, переработки и потребления электрической энергии, а другие – процессы получения, переработки и потребления информации. Первые формируют энергетический канал управления, вторые – информационный, т.е. электромеханический модуль всегда может быть представлен физической системой, осуществляющей управляемое электромеханическое преобразование энергии. Поэтому входящие в силовой (энергетический) канал управления электрический, электромеханический, механический преобразователи и рабочий орган называют объектом управления. Процесс формирования управляющих воздействий на объект управления для реализации требуемого закона изменения входных регулируемых параметров (координат) называют процессом управления. Процесс управления обеспечивается совокупностью технических средств – устройством управления. В тоже время, совокупность всех элементов информационного канала, участвующих в процессе управления, называют системой управления (СУ). Последняя обычно содержит: устройство управления, устройство ввода команд оператора, устройство вывода информации о состоянии преобразователей и контролируемого процесса для принятия оператором управленческого решения, информационно-измерительной системы (ИИС) и схем сопряжения (интерфейса) устройства управления. Преобразование контролируемых физических величин (переменных) в элек-

трический сигнал в СУ обеспечивают датчики ИИС. Для контроля изменения режимов преобразования энергии ИИС может включать в себя: датчики входных параметров питающего напряжения, частоты, мощности потребителя; датчики электрических поэлементных переменных как внутри электрического преобразовательного модуля, так и на выходных зажимах; датчики электрических и электромагнитных величин, датчики механических переменных на валу двигателя или рабочего органа. В общем случае под управлением ЭММ следует понимать такую организацию преобразования электрической энергии в механическую для движения МС, при которой обеспечивается необходимый закон изменения во времени регулируемых координат, т.е. реализуется требуемая последовательность действий ЭММ, приводящих к достижению поставленной (заданной) цели в функционировании МС. При этом различают управление одномерное, если регулирование осуществляется по основной координате; по нескольким координатам – многомерное. В действительности деление ЭММ на подсистемы энергетического канала и канала информационного является условным, поскольку степень взаимной интеграции этих подсистем при функционировании всех элементов в едином ЭММ слишком велика и обусловлена прямыми и обратными связями взаимовлияния названных каналов. Всё изложенное позволяет изучать и анализировать ЭММ только целиком, не разделяя на части. Обычно все электрические элементы, аппараты и устройства объединяют в один узел (модуль), называемый комплектным электроприводом. В настоящее время с целью приближения источника движения к исполнительному органу, упрощения конструкции механической части привода, увеличения жёсткости, улучшения динамических качеств и повышения кинематической точности промежуточных механизмов передачи развивается тенденция к объединению устройств в одном электромеханическом модуле (ЭММ) МС. Особую значимость модульное построение приводной системы представляет при проектировании следящего электропривода наиболее точного для воспроизведения входного управляющего сигнала. В зависимости от функционального назначения МС находят применение как одноканальные ЭММ, так и многоканальные. Существующие следящие ЭММ являются многоканальным исполнительным звеном в автоматических и автоматизированных системах управления и комплексах различного назначения. Примером таких систем являются управляющие комплексы гибких автоматизированных производств, системы управления промышленными манипуляторами и роботами, системы наведения радиотехнических и оптико-электронных антенных астрономических установок и т.д. Такие системы при проектировании рассматриваются как

многосвязные системы автоматического управления с обратными связями [5] по каждой регулируемой координате объекта управления.

2. Особенности построения одноканального

и многоканального ЭММ

В качестве примера построения одноканального электромеханического модуля рассмотрим укрупненную функциональную схему следящего электропривода с одним исполнительным электродвигателем ИД (рис.1.3). В систему управления входят управляющее устройство УУ, корректирующие устройства КУ1, КУ2, усилитель мощности УМ, исполнительный двигатель ИД, редуктор Р, рабочий орган РО объекта управления, тахогенератор ТГ. В следящих системах дополнительно устанавливается датчик перемещения или положения рабочего органа ДП. Сигнал управления U_z сравнивается с сигналом U_0 и U_n , в результате формируется так называемый сигнал ε рассогласования (или сигнал ошибки), который характеризует отклонение системы от заданного положения рабочего органа.

Системы автоматического управления ЭММ подразделяют на замкнутые и разомкнутые. В замкнутых системах реализуется принцип управления по отклонению ε от заданного сигнала за счет главной обратной связи (отрицательная обратная связь по регулируемому параметру). В разомкнутых САУ главная обратная связь отсутствует. Задача обеспечения заданного качества управления может быть решена измерением возмущающих воздействий $F_1, F_2, \dots, F_i$ и введением соответствующей коррекции в САУ.

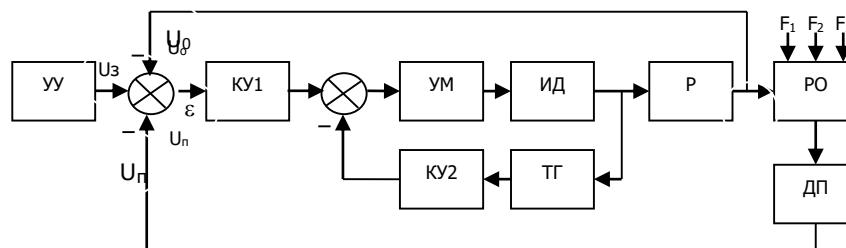


Рис. 1.3. Функциональная схема одноканального электромеханического модуля

Рассмотрим примеры построения замкнутой и разомкнутой систем регулирования по скорости вращения электродвигателя МС. В силовую часть привода (рис.1.4) для регулирования частоты вращения Ω (перемещения рабочего органа РО), входит тиристорный преобразователь (ТП) и двигатель постоянного тока

(ДПТ), который через редуктор Р вращает (перемещает) РО. На якорную обмотку двигателя с магнитоэлектрическим (электромагнитным) возбуждением подается постоянное напряжение $U_{\text{я}}$. Рабочий орган нагружен моментом M . Главная отрицательная обратная связь реализуется за счет тахогенератора, якорь которого соединен с валом ДПТ. Напряжение $U_{\text{тг}}$ на якорной обмотке тахогенератора будет пропорционально частоте вращения вала ДПТ. Сигнал рассогласования $U_{\text{э}}$ формируется на входе усилителя постоянного тока (УПТ).

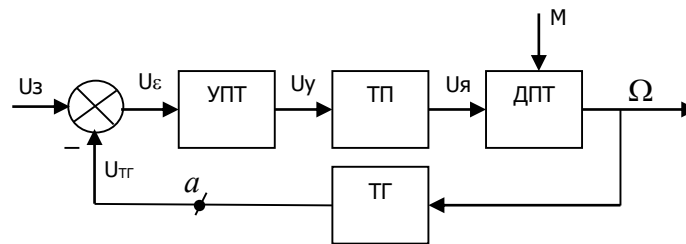


Рис. 1.4. Замкнутая система одноканального ЭММ

Построим математическую модель для оценки статической точности регулирования первой и второй систем управления. Для разомкнутой системы управления (когда связь от тахогенератора ТГ разорвана в точке а, рис.1.4) точность регулирования будет определяться уравнением механической характеристики двигателя постоянного тока (рис.1.5):

$$\Omega = K_1 \cdot U_{\text{я}} - K_2 \cdot M, \quad (1.1)$$

где K_1 – коэффициент передачи двигателя

$$K_1 = \Delta\Omega / \Delta U ;$$

K_2 – коэффициент жесткости механической характеристики,

$$K_2 = \operatorname{tg} \alpha , \quad M = \operatorname{const} .$$

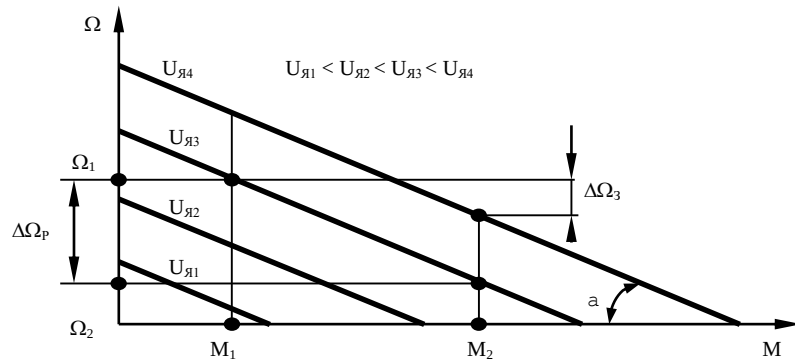


Рис. 1.5. Механические характеристики ДПТ

Пусть $U_{я} = \operatorname{const}$, тогда изменение частоты вращения (перемещения) РО произойдет при изменении момента нагрузки от M_1 до M_2 . Соответственно частота вращения (перемещения) РО будет изменяться от Ω_1 до Ω_2 :

$$\Omega_1 = K_1 U_{я} - K_2 M_1 ; \quad (1.2)$$

$$\Omega_2 = K_1 U_{я} - K_2 M_2 . \quad 1.3)$$

Вычитая нижнее уравнение из верхнего, получаем погрешность регулирования разомкнутой САУ:

$$\Delta\Omega_p = \Omega_1 - \Omega_2 = K_2 (M_2 - M_1) = K_2 \Delta M. \quad (1.4)$$

Для повышения точности регулирования разомкнутой САУ необходимо либо уменьшать нестабильность нагрузки ΔM , либо подбирать электродвигатели с более жесткой характеристикой (с меньшим значением K_2).

Замкнутую систему регулирования описывают следующие соотношения:

$$U_{\varepsilon} = U_3 - U_{тг} ; \quad U_{тг} = K_{тг} \Omega ;$$

$$U_y = K_y U_{\varepsilon} ; \quad U_{я} = U_y K_{тп} ; \quad (1.5)$$

$$\Omega = K_1 U_{я} - K_2 M ,$$

где $K_{тг}$, K_y , $K_{тп}$ - соответственно коэффициенты передачи тахогенератора, усилителя постоянного тока и тиристорного преобразователя.

Для замкнутой системы управления погрешность регулирования скорости составит:

$$\Delta\Omega_3 = \Omega_1 - \Omega_2 = \frac{\Delta M \cdot K_2}{1 + K_{тг} \cdot K_y \cdot K_{тп} \cdot K_1} \quad (1.6)$$

В этом случае, подбирая коэффициент передачи K_y усилителя постоянного тока, теоретически можно обеспечить любую точность регулирования скорости ЭММ.

Многоканальная система следящих приводов (СП) МС может иметь в своем составе несколько взаимосвязанных электромеханических модулей. Каждый следящий ЭММ является достаточно сложной технической системой и в совокупности с другими ЭММ может быть представлен многоканальным ЭММ в обобщенном виде (рис.1.6).

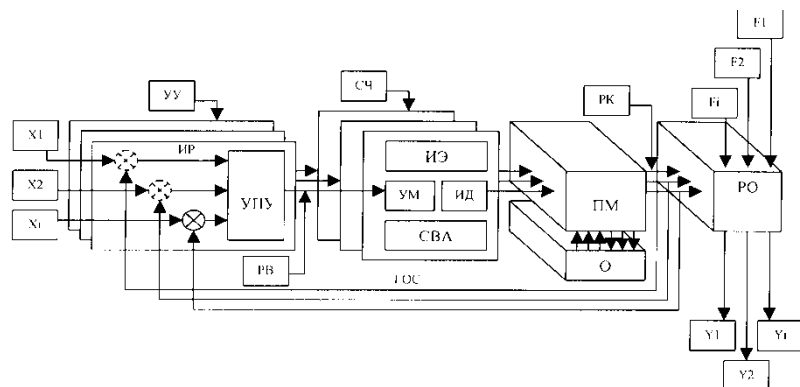


Рис. 1.6. Обобщенный вид многоканального электромеханического модуля

Источник энергии (ИЭ) вместе с усилителем мощности (УМ), исполнительным двигателем (ИД), передаточным механизмом (ПМ) составляют силовую часть (СЧ) (энергетический канал) ЭММ. Усилительно-преобразующие устройства (УПУ) и измерители рассогласования (ИР) объединены в управляющее устройство (УУ) и формируют регулирующие воздействия (РВ) при наличии сигналов управления на входе $x_1, x_2 \dots x_i$. В составе силовой части СП могут быть использованы электрические, гидравлические усилительные и исполнительные устройства (звенья).

Устройства системы вспомогательной автоматики (СВА) и главных обратных связей (ГОС), отбираемых с выходов ПМ (или с выходных координат собственно объекта управления, рабочего органа, включены в информационный канал управления. В общем случае многоканальный ЭММ включает в себя комплект силовых и управляющих частей нескольких СП, обеспечивающих планируемое изменение положения рабочего органа (РО) и ПМ с некоторым числом регулируемых координат (РК). Изменения выходных координат $y_1, y_2 \dots y_i$ рабочего органа (РО) МС обуславливаются изменениями пространственного положения основания (опоры) О, на котором закреплен ПМ, и планируемыми изменениями выходных координат комплекса силовых частей многоканального ЭММ. Под комплексом силовых частей многоканального ЭММ подразумевается совокупность ИД и УМ, связи между которыми неизменны для одного и того же ЭММ, общего источника энергии (ИЭ). Силовая часть, состоящая из ИЭ, УМ и ИД, обеспечивает регулирование по нескольким каналам формирования силовых воздействий на ПМ и РО при наличии единичных главных обратных связей (ГОС) [5].

При проектировании отдельных ЭММ без учета их взаимосвязей с другими СП в составе технической системы обычно решают задачи обоснования выбора элементов ЭММ по заданным требованиям к скорости и ускорению, с учетом ограниченной мощности ИЭ автономных установок, анализ и синтез корректирующих устройств ЭММ при заданной точности слежения. Характерной особенностью проектирования ЭММ, предназначенных для управления движением сложных объектов управления, является значительное число регулируемых координат. Примерами сложных ОУ являются многозвенные рабочие органы манипуляционных роботов, опорно-поворотное устройство (ОПУ) антенных установок радиотелескопов, подъемно-транспортных и землеройных машин и т.п. В этих случаях передаточный механизм (ПМ) в ЭММ является уже механическим многоканальным звеном, передающим силовые регулируемые воздействия ИД системы СП к РО в процессе его управляемого движения. Особенностью многоканальных ЭММ является взаимосвязь различных каналов ПМ, без рассмотрения которой проектирование, исследование ЭММ в принципе невозможно. Регулирование любой координаты в многоканальном ЭММ рассматриваемого типа осуществляется за счет согласованного управления одновременно отдельными ЭММ. Взаимодействие отдельных ЭММ различных каналов управления ОУ может быть обусловлено и связями через энергетическую установку по источнику энергии (ИЭ). При этом проектирование много-

канального ЭММ ведется методами автоматизированного проектирования с использованием ЭВМ, а многомерная техническая система рассматривается как сложная автоматическая система.

3. Электромеханический модуль в структурной схеме технологической машины

В зависимости от целей и решаемых задач в мехатронных системах исполнительные устройства различаются по принципу действия, исполнению и часто используются как предконечные или конечные звенья системы автоматического управления средств автоматизации. Если силовые исполнительные устройства преобразуют сигнал управления в механическое перемещение рабочего органа (РО) технологического оборудования или совершение какого-то воздействия, то устройства управления решают задачи измерения, контроля и управления движением РО (инструмента) по заданному закону (относительно обрабатываемой поверхности во времени и пространстве). Закон движения во времени при этом должен удовлетворять требованиям производительности, а в пространстве - требованиям качества обработанной поверхности (состояния поверхностного слоя). Для выполнения машинного технологического процесса требуется согласование движений всех передаточных и конечных механизмов, входящих в технологический комплекс, включая исполнительные, контролирующие и управляющие. Необходимое согласование работы механизмов во времени (синхронизация), взаимное перемещение исполнительных органов (ИО) обеспечивается системой управления. В общем случае любую систему механизмов и устройств, в которой наблюдаются процессы передачи, преобразования и использования энергии с контролем технологического процесса и режима работы технологического оборудования, материала и информации, можно представить в виде структуры взаимосвязанных функциональных модулей, объединенных энергетическими и информационными потоками (рис.1.7) соответствующих каналов управления.

Совокупность механизмов контроля и управления, которые функционируют также и на промежуточных стадиях технологического процесса, определяя изменения или отклонения от предписанного режима работы оборудования с последующей корректировкой (исправлением) текущих координат (скорости, расхода веще-

ства и др.), составляет систему управления (СУ) технологической машины. Система управления обеспечивает необходимую согласованность перемещений всех подвижных органов машины в соответствии с заданной программой в автоматическом режиме [6]. Точность позиционирования и работоспособность отдельного механизма и машины (МС) в целом определяются рассчитанным законом движения (управления). При этом передача потока энергии от источника для обеспечения движения механизмов и выполнения технологического процесса осуществляется через силовые элементы (модули) (рис.1.7). Информация о протекании процессов и режимах работы электротехнического, технологического оборудования и ее направление на структурной схеме представлены стрелками. В общем случае информация преобразуется чаще всего в аналоговый или цифровой сигнал, передается для управления (изменения) режимов через регулирование рабочих характеристик исполнительного двигателя, передаточных и исполнительных механизмов.

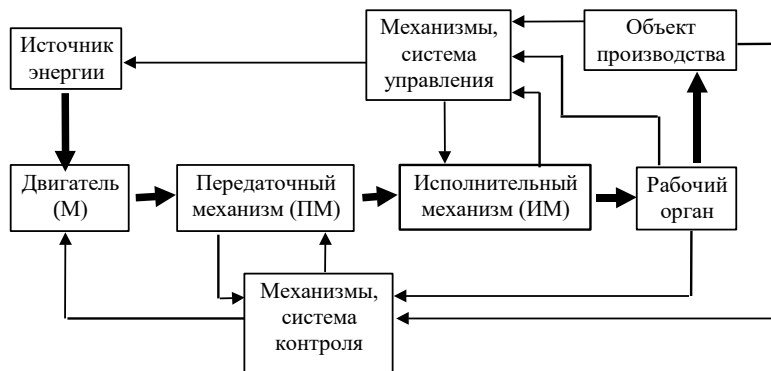


Рис. 1.7. Структурная схема технологической машины

В настоящее время разработано и применяется множество разнообразных приборов, машин и механизмов, которые за счет подводимой механической энергии и движения их исполнительных органов выполняют различные операции и технологические процессы, т.е. совершают полезную работу. Сегодня в промышленном и сельскохозяйственном производстве, на транспорте, коммунальной сфере и быту практически 100% механической энергии для работы машин и механизмов получают из электрической энергии за счет применения нерегулируемых и регулируемых электромеханических модулей.

Электромеханические модули широко используются также в наземной, воздушной, космической технике и управлении морскими объектами. Базовым элементом любого ЭММ является электрическая машина (электродвигатель), осуществляющая непосредственно электромеханическое преобразование энергии.

Электромеханический модуль

как объект проектирования

Электромеханический модуль МС является достаточно сложной технической системой и в самом общем виде может быть определён как совокупность источника питания, преобразователя и потребителя электрической энергии, распределительных и коммутирующих устройств, соединительных линий между элементами и устройствами энергетического и информационного каналов. Для целей исследования и проектирования подобные системы нуждаются в декомпозиции и допустимом упрощении. В качестве первых шагов в этом направлении используются обычно различные классификационные схемы, позволяющие выделить объект рассмотрения и тем самым сузить число возможных вариантов его реализации.

При необходимости осуществляют дальнейшую конкретизацию и декомпозицию ЭММ не только по функциональному назначению отдельных блоков, подузлов, но и по роду физических и конструктивных параметров и характеристик. Если необходима конкретизация источников питания ЭММ, то следует рассматривать автономные и неавтономные ИП. К автономным источникам электроэнергии относят химические источники тока: кислотные и щелочные аккумуляторы, гальванические, солнечные и атомные элементы. Неавтономными источниками являются трёхфазные и однофазные сети переменного тока промышленной частоты. По конструктивной схеме сети питания делятся на радиальные (структура аналогична разветвлённому дереву, в котором каждая ветвь получает питание только от одного узла), замкнутые (ветвь может получать питание от нескольких узлов, соединённых между собой) и сложно замкнутые, или разветвлённые (все ветви замкнуты, и структура сети подобна сетке). Качество электроэнергии во всех режимах работы ЭММ должно соответствовать определённым нормам и стандартам. Многообразие возможных вариантов построения сети питания ЭММ достаточно велико, и все они отвечают определённым техническим требованиям при выборе конечного варианта. В то же время конечный вариант электроснабжения ЭММ не позволяют выбрать даже приёмники электрической энергии – исполнительные электродвигатели.

Известно, что один и тот же механизм технологической машины, МС можно привести в движение исполнительными электродвигателями разного типа (постоянного тока, 2- и 3-фазными асинхронными, вентильными, шаговыми и др.) В рассматриваемых случаях вариантность в выборе приёмников – исполнительных электродвигателей, очевидно, определяет соответствующие вариации ИП по роду тока, напряжению, частоте, мощности и т.п. Таким образом, многовариантность решения в выборе приёмников и источников электроэнергии обуславливает также многовариантность выбора и других силовых элементов как энергетического, так и устройств информационного канала управления. Приведенные особенности показывают, что задача проектирования ЭММ в общей постановке относится к классу оптимизационных задач, решение которых возможно с введением критериального анализа и отбора вариантов. Причём выбор критериев при проектировании ЭММ также неоднозначен. Для сравнения различных технических решений проектирования ЭММ, а также для выбора оптимальных режимов работы каждого из них целесообразно вывести ряд критериев, позволяющих оценить достоинства указанных решений и режимов работы.

Если проектирование ЭММ предполагается выполнять с применением силовых полупроводниковых приборов (СПП), например, тиристоров, то критерии оценки проектируемого модуля можно разбить на две группы. К первой группе относятся критерии, которые являются универсальными для выбора схемы или режима работы тиристорного устройства любого типа в ЭММ. Такие критерии позволяют оценить использование тиристоров по мощности и частоте, КПД схемы, крутизне нарастания тока и напряжения тиристоров [7].

Ко второй группе относятся критерии, пригодные для ограниченного числа случаев использования тиристорных устройств со специфическими требованиями. В этом случае выбор схемы устройства или режима его работы определяется влиянием нагрузки на основные характеристики устройства. К ним в первую очередь следует отнести максимальные токи и напряжения тиристоров, а также колебательную мощность в нагрузке. Чем меньше изменяются перечисленные выше характеристики, тем устойчивее и надёжней работает схема устройства при переменной нагрузке. При разработке усилительно-преобразовательных устройств (УПУ), наряду со стоимостными показателями, принципиально важное значение имеют показатели надёжности, суммарной массы для транспортных МС и ряда других. В общем случае, если к проектируемым устройствам ЭММ предъявить ряд требований:

- минимальные массы, габариты, стоимости;
- высокая надёжность и безотказность функционирования;
- устойчивость к механическим возмущениям (вибрации, перегрузки, удары и т.п.);
- максимальный уровень унификации и стандартизации и т.д.,

то для поиска наилучшего варианта принятия решения необходимо рассмотреть случай с многокритериальной оптимизационной задачей [1]. В результате решения можно ожидать однозначный выбор элементов (устройств) ЭММ, их конструктивное оформление и целесообразное расположение в электромеханическом модуле МС.

Лекция

Тема 1.2.2. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРО-МЕХАНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

ВОПРОСЫ

1. Электродвигательные исполнительные устройства на базе коллекторной машины постоянного тока.
2. Статические характеристики и параметры двигателя постоянного тока.
3. Особенности применения электропривода МС и энергетические показатели редукторного и безредукторного ЭММ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические модули мехатронных систем. Основы расчета и проектирования. Учеб.пособие. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2001. -173 с. (гл.2).

1. Электродвигательные исполнительные устройства на базе коллекторной машины постоянного тока

Электродвигательное исполнительное устройство (ЭДУ) на базе коллекторной машины постоянного тока (МПТ) имеет существенные преимущества перед другими, например, гидравлическими и пневматическими исполнительными

устройствами. Это простота получения механических движений непосредственно из электрической энергии, удобство подведения энергии к технологическому оборудованию, повышенный коэффициент полезного действия, отсутствие фактора загрязнения окружающей среды и низкий уровень шума.

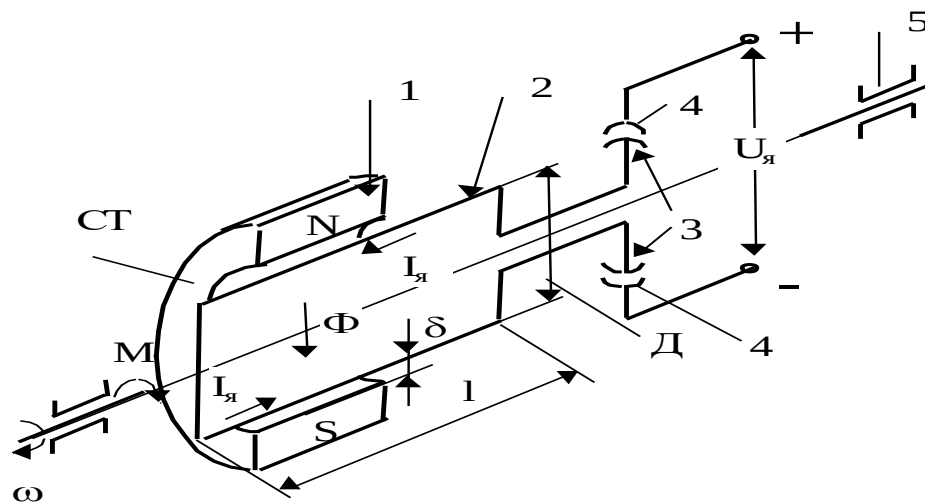


Рис. 2.1. Конструктивная схема электродвигателя: 1 - постоянный магнит главного полюса на статоре СТ; 2 - проводник тока обмотки якоря (ротора); 3 - коллекторные пластины; 4 - щетки электрографитовые; 5 - подшипниковый узел крепления вала; δ - воздушный зазор

На рис. 2.1 приведена конструктивная схема электродвигателя постоянного тока с элементом возбуждения на статоре (СТ). Работа двигателя постоянного тока (ДПТ) основана на взаимодействии проводника с током и магнитным полем возбуждения машины.

Роль проводника (витка) в двигателе выполняет обмотка якоря, расположенная на вращающемся роторе (якоре). По типу возбуждения ДПТ бывают электромагнитного (с помощью обмотки возбуждения серий МИ, ДИ, П, СЛ, СД, Д) и магнетозлектрического возбуждения (с помощью постоянного магнита серий ДПР, ДПМ, ДП, МИГ, МРМ, ПЯ).

Развиваемый электромагнитный момент на валу электродвигателя может быть описан выражением:

$$M = C \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} \cdot \sin \varphi, \quad (2.1)$$

где C - конструктивный коэффициент; Φ - магнитный поток электродвигателя; $I_{\text{я}}$ - ток обмотки якоря; φ - пространственный электрический угол между векторами потока $\vec{\Phi}$ и тока $\vec{I}_{\text{я}}$.

Значение механической мощности на выходном валу электродвигателя определяется как:

$$P_{\text{мех}} \approx M \cdot \Omega, \quad (2.2)$$

где Ω - угловая скорость вращения якоря двигателя.

Если выполнение каких-то механических операций требует затрат мощности до единиц киловатт, то целесообразно приводную систему создавать на базе ЭММ, при больших мощностях - электрогидроприводов. Последние более сложны в изготовлении, их стоимость существенно выше, чем у ЭММ, ресурс работы меньше. Однако они более компактны, а разница в массогабаритных показателях тем больше, чем выше мощность приводной системы.

Для приводных систем подвижных объектов уменьшение массы и габаритов ЭДУ имеет существенную значимость и реализуется за счет применения высокоскоростных электродвигателей с редуктором. Существуют ориентировочные соотношения между геометрическими размерами и номинальной мощностью ЭДУ, определяемые выражением:

$$P_H = k \cdot D^2 \cdot l \cdot \Omega_H, \quad (2.3)$$

где k - коэффициент пропорциональности; D и l - диаметр и длина якоря соответственно; Ω - номинальная угловая скорость.

Если через l обозначить линейные размеры ЭДУ, то $P_H = k' l^3 \cdot \Omega_H$, тогда:

$$l = \sqrt[3]{\frac{P_H}{k' \cdot \Omega_H}} = N \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{\Omega_H}}, \quad (2.4)$$

где k' и N - коэффициенты пересчета.

Анализ (2.4) позволяет констатировать, что при постоянной мощности линейные размеры двигателя уменьшаются обратно пропорционально корню кубическому из величины номинальной скорости. При этом наблюдается и снижение

массы ЭДУ G , которая пропорциональна P^3 . С учетом (2.4) масса ЭДУ может быть определена как

$$G = \frac{P_H}{k \cdot \Omega_H} = \frac{N^3}{\Omega_H} \quad (2.5)$$

и уменьшается обратно пропорционально Ω .

Если при проектировании МС окажется, что требования к силовым и кинематическим характеристикам исполнительных механизмов оборудования (или рабочего органа) не совпадают с характеристиками электродвигательного устройства (например, по номинальной скорости, моменту), то в схему передающего механизма вводят редуктор. Известно также, что массогабаритные характеристики высокоскоростного ЭДУ с редуктором с повышением скорости несколько ухудшаются. Однако при увеличении скорости в 5-6 раз масса редуктора возрастает не более чем на 10-20% [4,8]. В настоящее время исполнительные приводные устройства МС выпускаются промышленностью в виде электромеханических модулей, включающих собственно исполнительный электродвигатель, силовой редуктор и датчики угла поворота, скорости и момента. В этом случае с повышением кратности скорости электродвигателя существенно уменьшается его масса и, тогда, массогабаритные показатели электромеханического модуля улучшаются, что важно при проектировании МС. Широкое применение в практике роботостроения, автоматизации процессов управления различными объектами (как всевозможные летательные аппараты (ЛА), радиолокационные станции автоматического сопровождения и т.п.) находят различные коллекторные электродвигатели.

По конструкции якоря ДПТ подразделяются на двигатели с «обычным» (зубцовым) якорем, с гладким (беззубцовым) якорем, с печатным дисковым и цилиндрическим якорем и двигатели с полым ротором.

Якорь двигателя с зубцовым исполнением является механически прочной конструкцией. К недостаткам такой конструкции относится возможность насыщения зубцов шихтованного железа якоря при больших токах якоря i_a , ведущая к ограничению вращающего момента M . Примерами такого исполнения могут быть двигатели серий МИ, Д, ДИ, ДПМ, СЛ.

Двигатели с гладким якорем характеризуются более высокой электромагнитной индукцией в воздушном зазоре δ (рис.2.1), что позволяет уменьшить диаметр якоря (момент инерции ротора) в сравнении с ДПТ с зубцовым якорем. Обмотка якоря в таких двигателях наклеивается на тело якоря снаружи, что существенно

уменьшает электромагнитную постоянную времени $T_{\text{я}}$ двигателя. Примерами двигателей с гладким беззубцовым якорем являются двигатели серий МИГ, ПГТ.

К исполнительным двигателям (ИД) с уменьшенным моментом инерции якоря и электромагнитной постоянной времени следует отнести двигатели с дисковым печатным якорем (серий ПЯ, МРМ) и полым немагнитным ротором (серии ДПР). Особенностью таких двигателей является нецилиндрический, а плоский воздушный зазор δ .

Управление ИД постоянного тока осуществляется подачей регулируемого напряжения на обмотку якоря - якорное управление или на обмотку возбуждения - полюсное управление.

Регулируемый электропривод переменного тока, использующий синхронные и асинхронные электродвигатели, также начинает все более широко внедряться в оборудование различных технологических комплексов, бытовую технику с микропроцессорным управлением. Несмотря на более сложные принципы управления, электропривод переменного тока по большинству основных показателей превосходит электропривод постоянного тока из-за простоты конструкции и изготовления электродвигателя, а также его надежности и долговечности. Применение нерегулируемых электродвигателей переменного тока в качестве исполнительных устройств возможно в сочетании с управляемыми электромагнитными муфтами.

В последние 5-10 лет в регулируемых бесколлекторных электроприводах применяют реактивные индукторные электродвигатели. В зарубежной литературе их называют SRM (Switched Reluctance Motors), а в отечественных разработках ЭММ МС такой двигатель именуется реактивным индукторным двигателем (РИД), управляемым реактивным двигателем (УРД) или переключаемым реактивным двигателем (ПРД). Вентильно-индукторный привод (ВИП), построенный на базе РИД, в перспективе следует рассматривать как основу построения ЭММ МС широкого назначения.

2.1. Статические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения

К статическим характеристикам двигателя постоянного тока (ДПТ) обычно относят механические и регулировочные характеристики. Механической характери-

стикой называют зависимость угловой скорости Ω от вращающего момента M двигателя при постоянном значении напряжения на его обмотке якоря $U_{\text{я}}$, т.е. зависимость $\Omega=f(M)$ при $U_{\text{я}}=\text{const}$.

Регулировочной характеристикой называют зависимость угловой скорости Ω от уровня напряжения на обмотке якоря ДПТ при постоянном значении вращающего момента M (или статического момента сопротивления нагрузки M).

Поскольку машина постоянного тока (МПТ) может работать в двигательном и тормозном режимах, то важно знать свойства, которые проявляет МПТ во всех режимах. Эти свойства достаточно полно определяются названными характеристиками.

Для статического режима уравнение равновесия напряжения $U_{\text{я}}$ для идеализированного двигателя, когда не учитывается влияние реакции якоря, насыщение магнитопровода якоря, непостоянство переходного сопротивления участка цепи протекания тока якоря “щетка – пластина” коллектора, можно записать в виде:

$$U_{\text{я}}=C_e \cdot \Omega + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (2.6)$$

где C_e – коэффициент противо-ЭДС двигателя, зависящий от конструктивных параметров двигателя и магнитного потока возбуждения $\Phi_{\text{в}}$; $I_{\text{я}}, R_{\text{я}}$ – ток, активное сопротивление якоря соответственно.

Если значение магнитного потока $\Phi_{\text{в}}=\text{const}$, то и $C_e=\text{const}$. Вращающий момент двигателя определяется по соотношению:

$$M=C_m \cdot I_{\text{я}}, \quad (2.7)$$

где C_m – коэффициент момента двигателя, численно равный C_e в системе СИ.

Выражение для механической характеристики можно получить, если из выражения (2.7) определить значение $I_{\text{я}}$ и подставить его в (2.6), тогда:

$$\Omega = \Omega_{\text{хх}} - \frac{M}{K_2}, \quad (2.8)$$

где $\Omega_{\text{хх}} = \frac{U_{\text{я}}}{N_{\text{я}}}$ – угловая скорость двигателя в режиме идеального холостого хода, когда $I_{\text{я}}=0$; K_2 – жесткость механической характеристики:

$$K_2 = \frac{C_e \cdot C_m}{R_{\text{я}}}. \quad (2.9)$$

Для построения механической характеристики необходимо определить значение пускового момента, развиваемого двигателем при $\Omega=0$, по выражению:

$$M_{\Pi} = \frac{U_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} \cdot C_M \quad (2.10)$$

Тогда зависимость для механической характеристики (рис. 2.2) можно представить в виде:

$$M = M_{\Pi} - \kappa_2 \cdot \Omega, \quad (2.11)$$

или при определении жесткости для нелинейных механических характеристик других двигателей (при линеаризации) искомая жесткость характеристики может быть определена по формуле [9]:

$$\kappa_2 = \frac{M_{\Pi}}{\Omega_{\text{хх}}} = \text{tg} \alpha \quad (2.12)$$

Механические характеристики исполнительного двигателя при напряжении на якоре $0 < U_{\text{я1}} < U_{\text{яном}}$ представляют семейство параллельных прямых 1, 2, 3, 4, построенных по (2.8) и (2.12).

Если регулирование скорости двигателя осуществляется изменением добавочного сопротивления $R_{\text{доб1}}$ в цепи якоря, то полученные реостатные механические характеристики для разных значений $R_{\text{доб1}}$ можно изобразить в виде ряда пунктирных характеристик А, Б, В, пересекающихся в точке $\Omega_{\text{хх}}$ при $M=0$. При этом введенные добавочные сопротивления находятся в соотношении: $R_{\text{доб А}} > R_{\text{доб Б}} > R_{\text{доб В}} > R_{\text{я}}$.

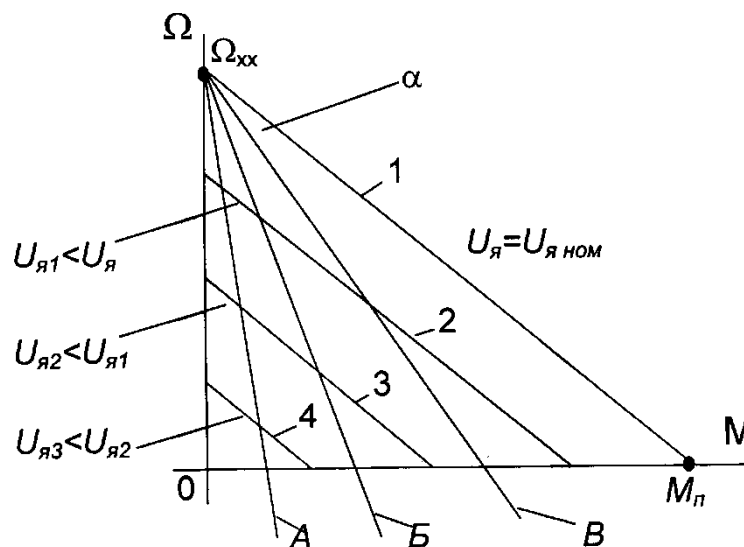


Рис 2.2. Механические характеристики исполнительного двигателя

постоянного тока с независимым возбуждением

Уравнение регулировочных характеристик $\Omega = f(U_{\text{я}})$ при $M = \text{const}$ можно записать из уравнения (2.8), заменив $\Omega_{\text{хх}}$ соответственно соотношением $\Omega_{\text{хх}} = U_{\text{я}} / C_e$. Регулировочные характеристики приведены на рис.2.3. Зависимостям 1,2,...,5 соответствуют статические моменты M_c нагружения двигателя с соотношением $M_{c5} > M_{c4} > M_{c3} > M_{c2} > M_{c1} = 0$.

Здесь же приведены продолжения регулировочных характеристик в область отрицательных значений Ω при активном моменте нагрузки.

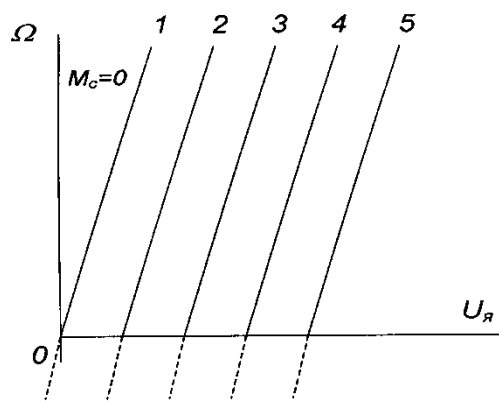


Рис. 2.3. Регулировочные характеристики двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

Линейность механических и регулировочных характеристик ДПТ независимого возбуждения является основным достоинством этих двигателей с точки зрения удобства управления ими.

2.2. Определение параметров структурной схемы

двигателя постоянного тока

Основные уравнения для исполнительного двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 2.4) при управлении по цепи якоря в переходном процессе могут быть записаны в следующем виде:

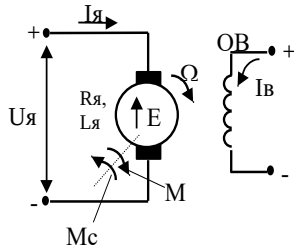


Рис. 2.4. Электросхема коллекторного электродвигателя

$$\begin{aligned} U_{я} &= R_{я} \cdot I_{я} + E + L_{я} \cdot \frac{dI_{я}}{dt}, \\ M_{\partial} &= M_c + J \frac{d\Omega}{dt}, \\ E &= C_e \Phi \Omega, \\ M_{\partial} &= C_M I_{я} \Phi. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Здесь $U_{я}$ - напряжение, приложенное к цепи якоря (входная величина); $I_{я}$ - ток в цепи якоря; C_e - конструктивный коэффициент ЭДС двигателя и C_M - конструктивный коэффициент момента двигателя, определяемые как

$$C_e = \frac{p_{\partial} \cdot N}{60 \cdot a}, \quad C_M = \frac{p_{\partial} \cdot N}{2\pi \cdot a},$$

где p_{∂} - число пар полюсов двигателя, N - число активных проводников обмотки якоря, a - число пар параллельных ветвей обмотки якоря; $L_{я}$ - индуктивность якорной цепи двигателя, $L_{я} = c \cdot U / (2p_{\partial} \cdot n_n \cdot I_{я.н.})$, $c = 6-8$ - расчетный коэффициент соответственно для двигателей малой и большой мощности, n_n - номинальное число оборотов двигателя; Ω - угловая скорость вращения якоря двигателя (выходная величина); M - вращающий момент двигателя; $R_{я}$ - сопротивление якорной цепи двигателя, $R_{я} \approx 0,5(1-\eta_{ном})U_{я.н.}/I_{я.н.}$; M_c - статический момент сопротивления; J - момент инерции вращающихся частей.

Рассматривая небольшие отклонения Δ переменных относительно их установившихся значений, обозначенных индексом o , уравнения (2.13) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} U_{яo} + \Delta U_{я} &= R_{я}(I_{яo} + \Delta I_{я}) + L_{я} \cdot \frac{d(I_{яo} + \Delta I_{я})}{dt} + E_o + \Delta E, \\ M_o + \Delta M - M_{co} - \Delta M_c &= J \frac{d(\Omega_o + \Delta \Omega)}{dt}, \\ E_o + \Delta E &= C_e \cdot \Phi(\Omega_o + \Delta \Omega), \\ M_o + \Delta M &= C_M \cdot \Phi(I_{яo} + \Delta I_{я}). \end{aligned} \quad (2.14)$$

Если отклонения переменных равны нулю, уравнение статики для установившегося режима:

$$\begin{aligned} U_{яo} &= R_{я} I_{яo} + E_o; \\ M_o - M &= 0; \\ E_o &= C_e \cdot \Phi \cdot \Omega_o; \\ M_o &= C_M \cdot \Phi \cdot I_{яo}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Из уравнений (2.15) параметры установившегося режима двигателя:

$$\begin{aligned} M_o &= M_{co}; \\ I &= M_o / (C_m \cdot \Phi); \\ E_o &= U_{яo} - R_{я} \cdot I_{яo}; \\ \Omega_o &= E_o / (C_e \cdot \Phi). \end{aligned}$$

Номинальные данные двигателя характеризуются коэффициентами:

$$K_e = C_e \cdot \Phi_{и} \quad K_m = C_m \cdot \Phi,$$

где

$$\begin{aligned} K_e &= (U_{ян} - R_{я} I_{ян}) \Omega_n = 30(U_{ян} - R_{я} I_{ян}) / \pi n_n; \\ K_m &= M_n / I_{ян} = 1000 P_n / (\Omega_n * I_{ян}) = 9550 P_n (n_n * I_{ян}). \end{aligned}$$

В соответствии с (2.14) можно записать уравнения динамики ДПТ в операторной форме при нулевых начальных условиях:

$$\begin{aligned} \Delta U_{я}(p) &= R_{я} \cdot \Delta I_{я}(p) + L_{я} \cdot p \cdot \Delta I_{я}(p) + \Delta E(p); \\ \Delta E(p) &= K_e * \Delta \Omega(p); \\ \Delta M(p) - \Delta M_c(p) &= J p \Delta \Omega(p); \\ \Delta M(p) &= K_m * \Delta I_{я}(p). \end{aligned} \quad (2.16)$$

Совместное решение уравнений (2.16) позволяет записать:

$$\begin{aligned} \frac{L_{я}}{R_{я}} \frac{J_{я}}{K_e K_m} p^2 \Delta \Omega(p) + \frac{J R_{я}}{K_e K_m} p \Delta \Omega(p) + \Delta \Omega(p) &= \\ = \frac{1}{K_e} \Delta U_{я}(p) - \frac{R_{я}}{K_e K_m} \left(1 + \frac{L_{я}}{R_{я}} p\right) \Delta M_c(p) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Введем обозначения: $T_{я} = L_{я} / R_{я}$ и $T_m = J * R_{я} / (K_e K_m)$ - соответственно электромагнитная и электромеханическая постоянные времени двигателя, с; $K_d = 1 / K_e$ - коэффициент усиления двигателя, $1 / (B \cdot C)$.

При неизменной нагрузке на валу двигателя $M_c = \text{const}$ значение $\Delta M_c = 0$. Тогда уравнение двигателя можно записать в виде:

$$(T_{я} T_m p^2 + T_m p + 1) \Delta \Omega(p) = K_d \Delta U_{я}(p). \quad (2.18)$$

Из (2.18) можно представить передаточную функцию ДПТ независимого возбуждения при якорном управлении:

$$W_1(p) = \Delta \Omega(p) / \Delta U_{я}(p) = K_d / (T_{я} T_m p^2 + T_m p + 1). \quad (2.19)$$

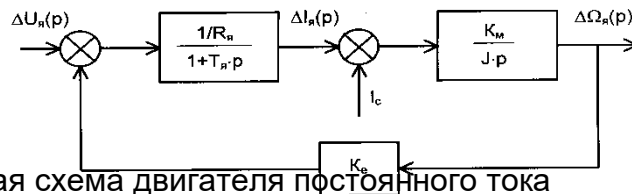


Рис. 2.5. Структурная схема двигателя постоянного тока

На рис. 2.5 представлена структурная схема ДПТ при якорном управлении.

Если в качестве выходной координаты ДПТ рассматривается угол поворота вала θ , то значение $\Delta\Omega(p)$ можно получить как $\Delta\Omega(p) = p\Delta\theta(p)$. Тогда передаточная функция ДПТ запишется в виде:

$$W_2(p) = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta U_{\text{я}}(p)} = \frac{K_{\text{Д}}}{(T_{\text{я}}T_{\text{м}}p^2 + T_{\text{м}}p + 1)p} \quad (2.20)$$

Анализ выражений (2.19) и (2.20) для различных соотношений постоянных времени $T_{\text{я}}$ и $T_{\text{м}}$ двигателя позволяет представить последний различными типовыми звеньями (рис. 2.6).

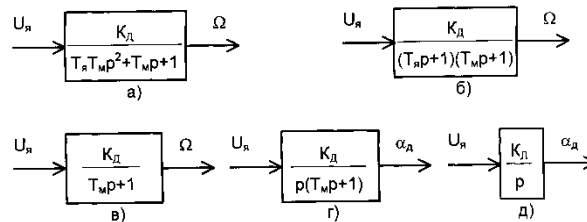


Рис. 2.6. Представление двигателя постоянного тока типовыми звеньями

В системах электроприводов МС момент инерции J , а, следовательно, и механическая постоянная времени $T_{\text{м}} = \text{var}$. При $T_{\text{м}} < 4T_{\text{я}}$ обычно корни характеристического уравнения комплексно-сопряженные и переходные процессы носят колебательный характер. При $T_{\text{м}} > 4T_{\text{я}}$ корни действительные, что соответствует апериодическим переходным процессам. При $T_{\text{м}} > 10T_{\text{я}}$ влиянием $T_{\text{я}}$ можно пренебречь (рис. 2.6 в), переходные процессы близки к экспоненциальным. При $T_{\text{м}} < T_{\text{я}}$ в системе наблюдаются колебания, зависящие от коэффициента затухания ξ , определяемого из соотношения:

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{T_{\text{м}}/T_{\text{я}}} \quad (2.21)$$

На рис. 2.7 приведена зависимость коэффициента затухания от соотношения постоянных времени $T_{\text{я}}$ и $T_{\text{м}}$, рассчитанного по (2.21).

В области значений ξ [0; 1] и $T_m/T_{я}$ [0; 4] со значениями $T_m/T_{я} < 4$ переходные процессы носят колебательный характер. При проектировании ЭММ МС параметры схемы должны выбираться такими, чтобы при минимальном моменте инерции обеспечивалось соотношение $T_m > 2T_{я}$.

По данным заводов-изготовителей значения параметра T_m для ДПТ ориентировочно принимаются при проектировании ЭММ в пределах:

- 0,03 ... 0,4 с - с обычным зубцовым якорем,
- 0,015 ... 0,02 с - с полевым немагнитным якорем,
- 0,005 ... 0,01 с - с цилиндрическим гладким и печатным якорем.

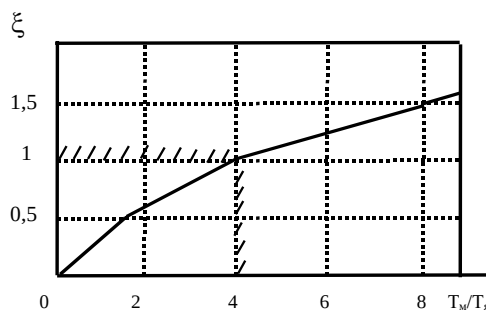


Рис. 2.7. Зависимость коэффициента затухания от соотношения постоянных времени

На рис. 2.6,г двигатель представлен последовательным соединением интегрирующего и апериодического звеньев, а при незначительных нагрузках, когда падением напряжения на двигателе можно пренебречь, ДПТ можно представить как интегрирующее звено (рис. 2.6, д).

3.1. Особенности применения электропривода МС

При проектировании МС широко применяют принцип «встроенности» безредукторного электропривода (электродвигателя) в узел исполнительного механизма. Перспективность такого решения обусловлена тем, что суммарная масса, габаритные размеры и стоимость электродвигателя с редуктором для большого класса ЭММ существенно превышают соответствующие параметры самого электродвигателя. Решение поставленной задачи возможно с применением безредук-

торного электропривода на базе многополюсных машин с питанием от промышленной сети или источника пониженной частоты, машин с катящимся ротором или с питанием ротора и статора от источников с разной частотой; редукторного двигателя ; машины работающей на субгармониках магнитного поля ; линейных и дуговых электродвигателях [10]. Приближение электродвигателя к исполнительному механизму является характерной особенностью современных МС.

Особое значение в успешной реализации такого направления является применение безредукторного привода целевого назначения – низкоскоростных электродвигателей вращательного, поступательного и возвратно-поступательного типов специальных конструкций.

Влияние редуктора на качество переходных процессов в электроприводах МС имеет место и исследовано в ряде работ [11]. Люфты в редукторе, упругость элементов, звеньев и сочленений, фактор трения в механической системе оказывают существенное влияние на ее динамику. Динамические свойства электропривода в целом определяются электромеханической T_m и электромагнитной T_ω постоянными времени. Включение редуктора в механизм ухудшает условия переходного процесса и изменяет электромеханическую постоянную времени T_m .

Сравнительное быстродействие электропривода с высокоскоростным электродвигателем, соединенным с механизмом через редуктор с передаточным числом i , и привода с низкоскоростным электродвигателем, вал которого непосредственно связан с механизмом, исследовано и приведено в [10].

Для определения ожидаемых показателей применения в ЭММ высокоскоростного (индекс 'В') электродвигателя с передаточным числом i редуктора и низкоскоростного (индекс 'Н'), вал которого непосредственно соединен с механизмом, примем для сравнения: диаметры якорей соответственно D_B и D_H , рабочие длины якорей $l_{B\pi}$ и $l_{H\pi}$, удельные плотности касательного усилия $F'_\pi = F'_{B\pi} = F'_{H\pi}$; $D_B = D_H = D$; $l_{B\pi} = l_{H\pi} = l$ где D -диаметр, а l - рабочая длина якоря. Соотношение мощностей можно записать как $P_H = P_B \eta$, где P_B - мощность высокоскоростного двигателя, η - КПД редуктора. Значение мощности низкоскоростного двигателя можно выразить через конструктивные параметры двигателя

$$P_H = F'_\pi \cdot \pi \cdot D_H \cdot l_{H\pi} \cdot V, \quad (2.22)$$

где V -линейная скорость на поверхности якоря, равна $\Omega D_H/2$, а Ω - угловая скорость якоря.

Если принять отношение $l/D = a$, $\Omega_B = i\Omega_H$, то выражение (2.22) можно представить в виде

$$P_H = F' \cdot \pi \cdot a \cdot D_H^2 \cdot \Omega_H \cdot D_H / 2 = F' \cdot \pi \cdot a \cdot D_H^3 \cdot \Omega_B / 2i = F' \cdot \pi \cdot a \cdot D_B^3 \cdot \eta \cdot \Omega_B / 2. \quad (2.23)$$

Значение D_H после преобразования (2.23) можно записать:

$$D_H = D_B \cdot \sqrt[3]{\eta i}. \quad (2.24)$$

Известно также [10,11], что момент инерции цилиндра якоря $J_{я}$ определяется выражением $J_{я} = C_{п} \cdot a \cdot D^5$, где $C_{п}$ - коэффициент пропорциональности.

Тогда для рассматриваемых двигателей можно вывести соотношение

$$J_{яH} = C_{п} \cdot a \cdot D_H^5 = C_{п} \cdot a \cdot D_B^5 \cdot \eta \cdot i \cdot \sqrt[3]{(\eta i)^2} = J_{яB} \cdot \eta \cdot i \cdot \sqrt[3]{(\eta i)^2}. \quad (2.25)$$

Если электромеханическую постоянную времени T_m подставить в выражение $T_m = \Omega \cdot J_{я} / M_{п}$, где $M_{п}$ - пусковой момент двигателя, то равенство электромеханических постоянных определится соотношением

$$T_{mH} = \frac{\Omega_H \cdot J_{яH}}{M_{пH}} = \frac{\Omega \cdot J_B \cdot \sqrt[3]{(\eta i)^2}}{i \cdot M_{пB}} = \frac{T_{mB} \sqrt[3]{\eta^2}}{\sqrt[3]{i}}. \quad (2.26)$$

Анализ выражения (2.26) показывает на значительное снижение T_{mH} в сравнении с T_{mB} , т.е. $T_{mH} \ll T_{mB}$. Поскольку $\eta < 1$, $i > 1$, то применение безредукторного привода связано с уменьшением в 3-4 раза расчетного значения T_m ЭММ. Снижение линейной скорости на поверхности якоря при безредукторном приводе составит

$$\Lambda^H = \Omega^H \cdot \pi \cdot D_H = \Omega \cdot \sqrt[3]{\eta i} \cdot \pi \cdot D_B = \Lambda^B \cdot \sqrt[3]{\eta i}. \quad (2.27)$$

Пониженное значение линейной скорости вращения якоря повышает надежность безредукторного электропривода, позволяет осуществлять форсировку тока якоря без снижения коммутационной способности щеточного аппарата исполнительного двигателя МС.

3.2. Энергетические показатели редукторного и безредукторного электромеханического модуля

В процессе проектирования ЭММ необходимо учитывать и сравнивать энергетические показатели редукторного и безредукторного электроисполнительного механизма передачи движения. Известно [10], что низкоскоростные двигатели малой и средней мощности имеют КПД порядка 0,1-0,15 и 0,4-0,5 соответственно, а высокоскоростные электродвигатели тех же порядков мощности имеют КПД соответственно 0,25-0,4 и 0,8-0,9 при безредукторном исполнении.

При проектировании ЭММ с редуктором приведенные соотношения необходимо корректировать с учетом КПД редуктора. Существенное снижение КПД от 0,85 до 0,64 наблюдается у червячных редукторов типоразмеров РЧУ-40, РЧУ-63, РЧУ-80 при возрастании передаточного числа с 10 до 65. При решении минимизации массы ЭММ МС, включающего в себя исполнительный двигатель и редуктор, обычно используют понятие удельного номинального момента двигателя $M_{уд} = M_{ном} / m_д$ и редуктора $M_{удр} = M_p / m_p$, где $M_{ном}$ и $m_д$ номинальный момент и масса двигателя; M_p и m_p то же для редуктора. Для существующих исполнительных двигателей и редукторов $M_{удр} > 10 M_{удд}$. Исходя из результатов исследований [11] в качестве условия рациональности передаточное число редуктора i принимается в

соотношении $i > (2.5 - 5) \frac{M_{удр}}{M_{уд}}$. Известны также необходимые условия нормального функционирования ЭММ, когда средние значения мощности $P_{ср}$ и момента $M_{ср}$ меньше номинальных значений исполнительного двигателя:

$$P_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt < P_{ном}, \quad (2.28)$$

$$M_{ср} = \frac{1}{T} \int_0^T M(t) dt < M_{ном}, \quad (2.29)$$

где T – общая продолжительность времени, когда нагрузка потребляет мощность, т.е. $P(t) > 0$.

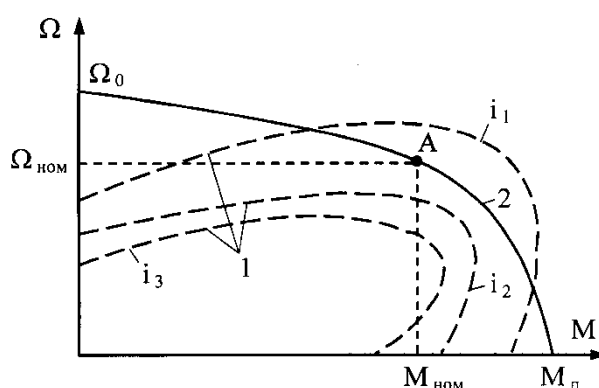


Рис. 2.8. Нагрузочные характеристики проектируемого модуля (1) и механическая характеристика исполнительного устройства (2)

Условие (2.28) в приведенных уравнениях является основным, а условие (2.29) можно выполнить выбором соответствующего передаточного числа редуктора.

В этом случае, подбирая различные значения редукции i , можно всегда найти такие значения i , когда нагрузочная характеристика (1) проектируемого модуля полностью располагается внутри механической характеристики (2) исполнительного устройства (рис 2.8), а значения i выбираются из соотношения $i_1 < i_2 < i_3$.

Возможность применения исполнительного двигателя в ЭММ окончательно определяется по выполнению условия (2.28). В процессе функционирования модуля допустимы кратковременные перегрузки двигателя как по моменту, так и по скорости. Обычно коэффициентами форсировки по скорости $K_{ск.ф}$ момента $K_{м.ф}$ задаются и принимают из соотношений по паспортным данным ИД:

$$K_{ск.ф} < \Omega_0 / \Omega_H, K_{м.ф} < M_{п} / M_{ном}. \quad (2.30)$$

Для определения области изменения допустимых значений коэффициента редукции i с энергетической точки зрения всегда должны выполняться ограничения

$$\frac{M_{пвх}}{M_{ном}} \leq K_{м.ф} < \frac{M_{п}}{M_{ном}};$$
$$\frac{P_{пвх}}{P_{ном}} \leq K_{ск.ф} \cdot K_{м.ф} < \frac{M_{п} \cdot \Omega_0}{M_{ном} \cdot \Omega_{ном}}. \quad (2.31)$$

В общем случае применение редуктора при проектировании ЭММ всегда связано с решением достаточно сложной задачи по минимизации массы объема редуктора, влияния люфтов и упругости сочленений всего передаточного механизма, в целом конструкции модуля.

Наилучшие показатели имеют место при проектировании ЭММ на базе реактивных индукционных двигателей с электронной коммутацией обмоток.

Лекция

Тема 1.2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КИНЕМАТИКИ И ПРЕОБРАЗУЮЩИХ МЕХАНИЗМОВ ЭММ

ВОПРОСЫ

1. Приведение движущихся масс ЭММ к оси вала ИД.
2. Энергетический анализ и синтез параметров исполнительного механизма ЭММ.
3. Динамическая модель исполнительного устройства технологической машины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические модули мехатронных систем. Основы расчета и проектирования. Учеб. пособие. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2001. - 173 с. (гл.3 п.3.1,3.2, 3.4, 3.5).

3.1. Приведение движущихся масс

электромеханического модуля к оси вала ИД

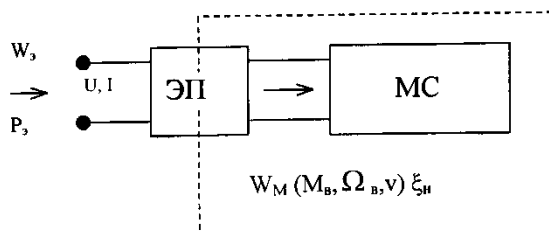


Рис. 3.1. Обобщенный электромеханический преобразователь

Электрический двигатель, приводящий в движение исполнительное устройство (ИУ) механической части системы, в совокупности с перемещающимися, вращающимися частями передаточного устройства можно представить как обобщенный электромеханический преобразователь (ЭП), имеющий две стороны – электрическую и механическую части $МС$. Из рис. 3.1 можно записать, что $W_э > W_M$ на величину ΔW потерь в контуре передачи энергии.

Рассмотрим конкретную кинематическую схему $МС$ и попытаемся сделать об-

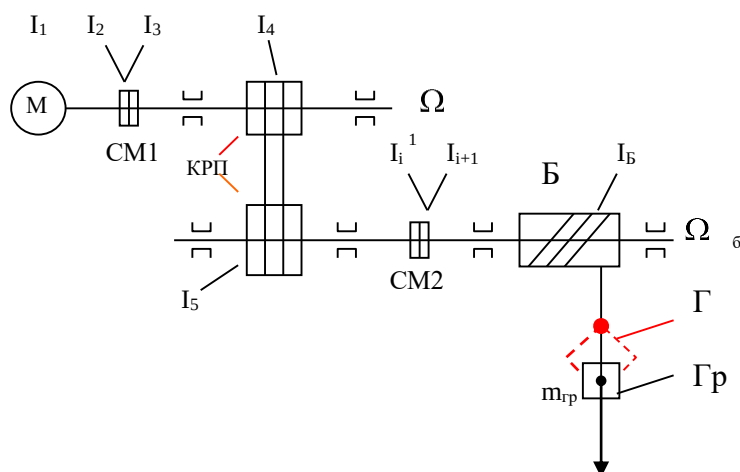


Рис. 3.2. Кинематическая цепь электромеханического модуля:
 $СМ1, СМ2$ -соединительные муфты; $КРП$ -клиноременная передача;
 $Б$ -барабан; $Гр$ – груз; $Г$ – грузозахватное устройство

щие выводы для ряда кинематических схем.

В результате работы двигателя M (рис. 3.2) вращающий момент M_B передаётся по кинематической цепи:

$M \rightarrow СМ1 \rightarrow КРП \rightarrow СМ2 \rightarrow Б \rightarrow Г$.

При этом вращательное движение барабана преобразуется в поступательное движение грузозахватного устройства и связанных с ним масс.

С учетом различных коэффициентов передачи механическая часть МС представляет собой систему связанных масс, движущихся с различными скоростями вращательно или поступательно. Естественно, при нагружении элементы системы (валы, опоры, КРП, канаты ... и т.д.) деформируются, так как механические связи не являются абсолютно жесткими, т.е. взаимное перемещение масс элементов под нагрузкой определяется жесткостью связей.

Итак, каждый вращательно движущийся элемент обладает моментом инерции I_i и связан с $(i+1)$ -м элементом механической связью, обладающей жесткостью C_i . Также каждый поступательно движущийся элемент имеет массу m_j и связан с последующим элементом связью с жесткостью C_j .

Известно, что в пределах упругих деформаций, согласно закону Гука, соответствующие жесткости можно определить:

$C_i = M_{\text{вы}i} / \Delta\varphi_i$, $\rightarrow$ где $M_{\text{вы}i}$ – и F_{yj} соответственно момент вращения и усилие упругой механической части; $\Delta\varphi_i$, ΔS_j – деформации соответственно упругих элементов при вращательном и поступательном движениях.

При проектировании и исследованиях МС важным фактором является возможность приведения всех параметров кинематической цепи к одному параметру – к скорости вращения вала двигателя Ω_v .

Основным условием приведения является соответствие расчетной схемы реальной механической системе с соблюдением закона сохранения энергии. При приведении вращательных $\Delta\varphi_i$ и поступательных ΔS_j перемещений учитывают, что передаточное число и радиус приведения определяются соотношением скоростей:

$$I_{\text{пр}i} = I_i / i_{1i}^2; \quad I_{\text{пр}j} = m_j * r_{1j}^2, \quad (3.1)$$

где $i_{1i} = \Omega_v / \Omega_i$ – передаточное число (отношение) от вала приведения до i -го вала;

$r_{1j} = v / \Omega_v$ – радиус приведения к валу со скоростью Ω_v .

При приведении жесткостей механической связи формулы приведения:

$$C_{\text{пр}i} = C_i / i_{1i}^2; \quad C_{\text{пр}j} = C_j r_{1j}^2. \quad (3.2)$$

Приведение моментов и сил нагрузки элементов кинематической цепи:

$$M_{\text{пр}i} = M_i / i_{1i}; \quad M_{\text{пр}j} = F_j r_{1j}. \quad (3.3)$$

Тогда расчетная схема механической части электропривода МС может быть представлена в виде (рис.3.3):

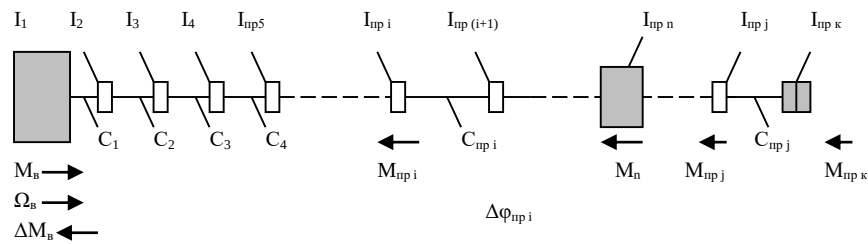


Рис. 3.3. Расчетная схема электромеханического модуля мехатронной системы:
 ΔM_b – момент механических потерь

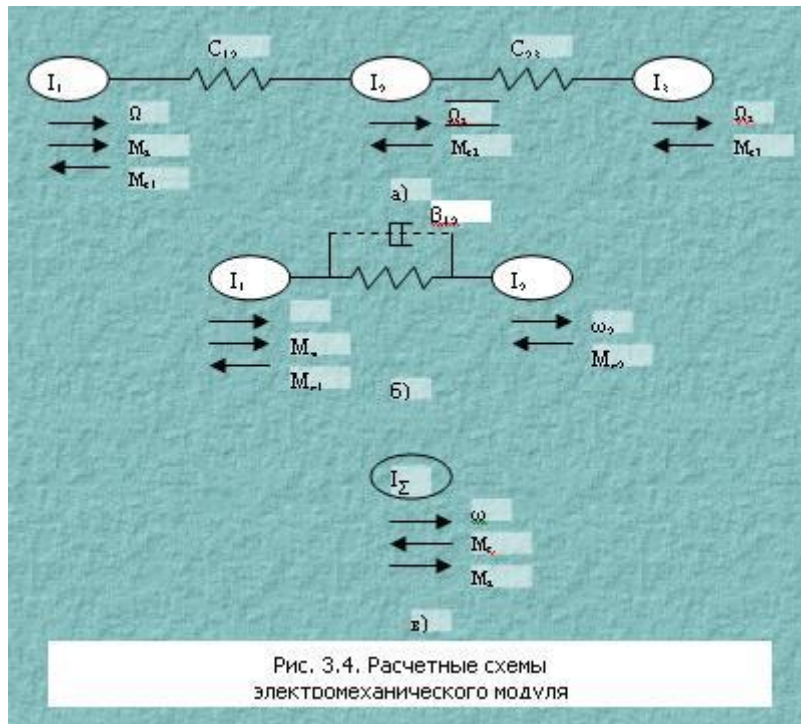


Рис. 3.4. Расчетные схемы электромеханического модуля

Наиболее значительные массы – ротор двигателя с моментом инерции I_1 , барабан с приведенным моментом инерции $I_{пр\ n}$ и груз $I_{пр\ к}$. Вследствие малости остальных моментов инерции схему можно упростить: малые моменты I прибавить к большим (близлежащим), а эквивалентные жесткости связей определить по выражению:

$$\frac{1}{c_{э\kappa\beta}} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_3} + \dots \quad (3.4)$$

Исследования динамики электроприводов МС показывают, что неразветвленные механические схемы в большинстве случаев можно свести к трехмассовой, двухмассовой расчетным схемам или к жесткому приведенному механическому звену (как показано на рис. 3.4). Обобщенными параметрами являются:

- Суммарные приведенные моменты инерции масс I_1 , I_2 и I_3 , образованные приведенными массами.

- Приведенные жесткости механических упругих связей между I_1 и $I_2 \rightarrow C_{12}$, I_2 и $I_3 \rightarrow C_{23}$.

Первая масса, вращающаяся с одной скоростью, испытывает M_v и момент статической нагрузки M_{c1} (M_{c1} – момент потерь).

К промежуточной массе механизма (I_2) приложен момент сопротивления M_{c2} , к третьей (I_3) – момент внешней нагрузки этой массы M_{c3} . Трехмассовая упругая система обычно применяется при детальном исследовании процессов в МС.

Упрощенной моделью трехмассовой расчетной схемы является двухмассовая (рис. 3.4, б): I_1 – суммарный приведенный момент инерции элементов, жестко связанных с двигателем; I_2 – суммарный приведенный момент инерции, жестко связанный с рабочим органом механизма (машины); β_{12} – коэффициент пропорциональности; M_{c1} и M_{c2} – суммарные моменты нагрузок на валу двигателя механизма соответственно. Двухмассовая модель электропривода обычно является основной расчетной схемой МС.

Если влияние упругих связей незначительно, ими можно пренебречь, то МС можно представить жестким приведенным звеном (рис. 3.4, в). Тогда суммарный приведенный момент инерции МС к валу двигателя можно представить:

$$I_{\Sigma} = I_{дв} + \sum_{i=1}^n \frac{I_i}{i_{1i}^2} + \sum_{j=1}^k m_j p_{1j}^2, \quad (3.5)$$

где n и k – число масс отдельных частей технологической установки, совершающих соответственно вращательное и поступательное движение.

Суммарный приведенный к валу двигателя момент статической нагрузки M_c можно определить:

$$M_c = \sum_{i=1}^q \left(\frac{M_i}{i_{1i}} \right) + \sum_{j=1}^p F_j p_{1j}, \quad (3.6)$$

где q , p – число внешних моментов M_i и сил F_j , приложенных к системе, кроме электромагнитного момента двигателя.

2.1. Энергетический анализ исполнительного устройства ЭММ

Передача движения от двигателя к функциональному звену исполнительного механизма МС может быть обеспечена посредством различных передаточных механизмов (ПМ), структура и конструктивные особенности которых зависят от типа двигателя, вида перемещения функционального звена и способа их расположения.

Передаточные механизмы предназначены для согласования скоростей, вращающих моментов двигателя и функционального звена, преобразование одного вида движения в другое. Модульную совокупность исполнительного электродвигателя (ИЭ) и передаточного механизма (ПМ) в робототехнике называют исполнительным электромеханизмом (ИЭМ), имеющим ряд особенностей при проектировании. В частности, промышленный робот является достаточно сложной МС, получение механической конструкции которой осуществляется последовательным соединением ряда кинематических звеньев. При этом каждое звено манипулятора ПР перемещает общую массу механической конструкции последующих звеньев. Поэтому проектирование ИЭМ ПР требует особого подхода, а расчет отдельных звеньев ПР с ИЭМ следует производить поочередно, начиная с выходного звена РО.

Для преобразования движения используют винтовые, реечные, цепные и тросовые передачи, а также передачи зубчатым ремнем, мальтийские механизмы. Поскольку при проектировании ПР применяют в основном высокоскоростные электродвигатели при невысоких скоростях перемещения исполнительного устройства (ИУ), то для согласования скоростей широко применяют передаточные механизмы: зубчатые цилиндрические и конические, червячные волновые и планетарные.

Зубчатые цилиндрические редукторы имеют хорошие показатели по КПД, жесткости, долговечности. Хороший КПД позволяет без больших потерь применять специальные методы устранения люфта, который в зубчатых передачах может достигать значительных величин, что влияет на устойчивость и точность работы привода. Распространенным методом устранения люфта является введение предварительного натяга в замкнутой передаче. Уровень шума зубчатых редукторов снижается с повышением точности изготовления передачи. В качестве слабых сторон зубчатых передач (цилиндрических) следует отметить высокую инерционность из-за больших диаметров колес, сложность и большие габаритные размеры.

Конические зубчатые передачи имеют те же недостатки, а также сложность их регулирования при сборке и повышенный шум при работе. Планетарные зубчатые передачи (цилиндрические и конические) при вышеперечисленных положительных и отрицательных качествах характеризуются компактностью.

Червячные редукторы отличаются хорошей жесткостью, малой инерционностью благодаря малому диаметру червяка и большому передаточному числу, малым уровнем шума, относительно простой конструкцией (передаточные числа достигают до 80...100 на одну ступень), возможностью самоторможения. К недостаткам следует отнести низкий КПД, который у однозаходных редукторов достигает до 0,4...0,5, и связанную с этим сложность устранения люфта.

Волновые редукторы характеризуются возможностью получения больших передаточных чисел на одну ступень, малыми габаритными размерами, практически не имеют люфта за счет многопарного зацепления при малых модулях зубьев, высокий КПД (не ниже 0,8). Относительным недостатком этих передач является пониженная жесткость, а также сложность изготовления и достижения приемлемой долговечности. Следует отметить, что волновые редукторы являются наиболее перспективными с точки зрения использования их в промышленных роботах.

В общем случае при проектировании МС передаточные механизмы выбирают, исходя из конструктивной сложности ПМ и его характеристик, компоновки, технологичности, стоимости и т.п.

Расчет ИЭМ и выбор массогабаритных соотношений ИЭ и ПМ состоит из следующих этапов:

1. Определение требуемой мощности ИЭ.
2. Выбор требуемого по мощности ИЭ с минимальными массо-габаритными показателями.
3. Определение передаточного отношения ПМ.
4. Проверка энергетических показателей.
5. Проверка ИЭ на нагрев.

Габариты и масса ИЭ определяются развиваемым моментом. В то же время мощность ИЭ пропорциональна скорости перемещения или частоте вращения ротора ИЭ. Поэтому при стремлении получить максимальную мощность при малых массе и габаритах ИЭМ следует использовать ИЭ с большой частотой вращения ротора. Однако большая частота вращения ротора ИЭ и необходимость согласования большого момента инерции нагрузки и инерции ротора высокооборотного ИЭ требуют применения редуктора.

В механическом редукторе используются цилиндрические, планетарные, червячные, винтовые и другие виды передач. Тип редуктора ПМ и его передаточные отношения выбирают исходя из требуемых технических характеристик ИЭМ, условий эксплуатации, надежности и других факторов. В то же время потери в механическом редукторе, эксплуатационные затраты и значительная его масса требуют по возможности уменьшения величины механической редукции.

Величину передаточного отношения ПМ выбирают после выбора электродвигателя, учитывая условия и режим работы МС.

При выборе передаточного числа ПМ исходят из двух основных условий:

- достижение заданного максимального ускорения выходного вала при небольших углах перемещения нагрузки, когда график изменения скорости треугольный;

- достижения заданного минимума времени переходного процесса является основным для режима позиционирования с трапецеидальным графиком изменения скорости.

Дифференциальное уравнение движения выходного вала ИЭМ с учетом передаточного числа редуктора можно представить в виде:

$$(I_{\Sigma} i^2 + I_H) \dot{\Omega} = M_{\Sigma} i \eta - M_c, \quad (3.7)$$

где i - передаточное число редуктора; η - КПД редуктора; M_{Σ}, M_c - момент, развиваемый ИЭ, и момент, необходимый для перемещения неуравновешенных масс, включая переносимый груз; I_{Σ}, I_H - момент инерции ротора ИЭ с приведенным к нему моментом инерции редуктора и момента инерции нагрузки; $\dot{\Omega}$ - угловое ускорение выходного вала ИЭМ.

Значение ускорения выходного вала ИЭМ

$$\dot{\Omega} = \frac{i \eta M_{\Sigma} - M_c}{i^2 I_{\Sigma} + I_H}. \quad (3.8)$$

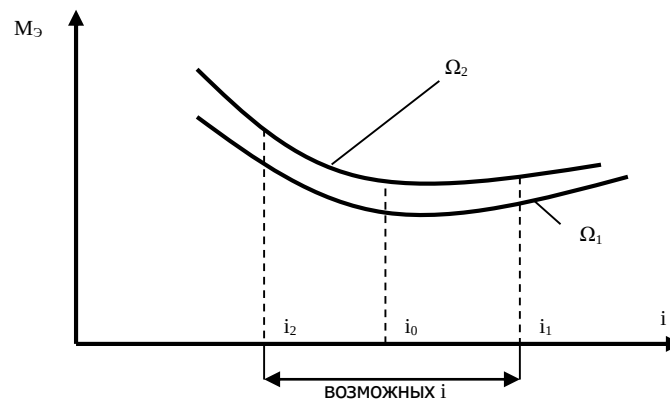


Рис. 3.5. График зависимости требуемого момента $M_{\text{Э}}$ от величины передаточного числа редуктора i при $M_c=0$, $I_3=\text{const}$, $I_4=\text{const}$ и принятых значениях Ω_1, Ω_2

Соответственно этому выражению на рис. 3.5 представлены графики, которые показывают влияние изменения передаточного числа редуктора на величины момента $M_{\text{Э}}$ при принятых значениях Ω_1 и Ω_2 и $M_c=0$, а $I_3=\text{const}$, $I_4=\text{const}$.

2.2. Синтез параметров исполнительного механизма

Элементы энергетического канала управления ЭМС выбирают из условий возможности воспроизведения приводом требуемого закона движения. Параметры элементов (мощность, передаточное число силового редуктора, электромагнитная и механическая постоянные привода) должны обеспечить возможности движения ОУ, (РО) с требуемыми значениями угловых скоростей, ускорений при фактических моментах сопротивления нагрузки.

При синтезе параметров ИЭМ кроме расчета требуемой мощности ИД, выбора типа ИД особое внимание уделяют определению граничных значений диапазона передаточных чисел силового редуктора. При этом исходят из соотношений, связывающих момент-кинематические характеристики ИД и ОУ:

$$\Omega_X \geq \Omega_H \cdot i_1; \quad M_{\text{max}} \geq (I_H \varepsilon_H + M_H + i_2^2 I_3 \varepsilon_H) / i_2, \quad (3.15)$$

где $\Omega_H, M_H, \varepsilon_H$ - заданные скорости движения ОУ, момент нагрузки, ускорение соответственно; I_H, I_3 - моменты инерции нагрузки и исполнительного двигателя; i_1 и i_2 - передаточные числа редуктора, при которых удовлетворяются неравенства (3.15) соответственно для скоростей и моментов.

Известны также [5, 8] необходимые условия воспроизведения электродвигателем требуемого закона движения следящего вала (ε_H, Ω_H) при наличии момента нагрузки M_H :

$$P_{MAX} \geq P_{B,П} = P_H = (I_H \varepsilon_H + M_H) \Omega_H; P_{MAX} = \frac{1}{4} M_{П}^* \Omega_X, \quad (3.16)$$

где P_{MAX} - максимальная мощность двигателя; P_H - требуемая мощность, с учетом собственного момента инерции двигателя определяется так:

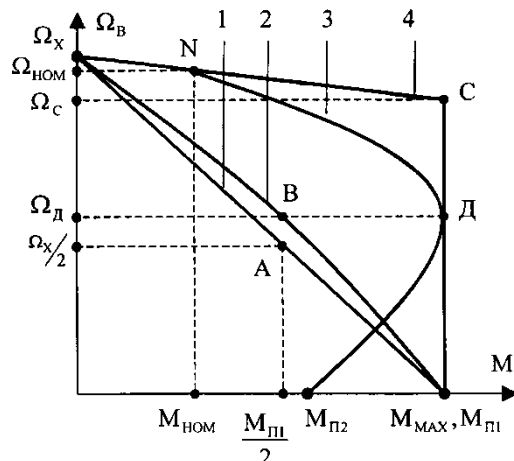
$$P_H = (I_{\varepsilon}^* \varepsilon_H + M_H) \Omega_H. \quad (3.17)$$

Для обеспечения приемлемых динамических характеристик ЭММ особое значение придается при проектировании такому параметру ИД, как механическая приемистость Π_{MAX} . Численные значения указанных величин P_{MAX}, Π_{MAX} определяются по паспортным данным и параметрам механических характеристик ИД. В зависимости от вида механической характеристики (рис. 3.7) значения Π_{MAX} и P_{MAX} рассчитываются по формулам:

$$P_{MAX} = \frac{1}{4} M_{П} \Omega_X; P_{MAX} = M_{MAX} \Omega_C; P_{MAX} = M_{MAX} \Omega_D;$$

$$\Pi_{MAX} = \frac{M_{П}^2}{4I_{\varepsilon}}; \Pi_{MAX} = \frac{M_{MAX}^2}{4I_{\varepsilon}}; \Pi_{MAX} = \frac{M_{MAX}^2}{8I_M}. \quad (3.18)$$

Здесь $\Omega_X, M_{П}$ - скорость холостого хода и пусковой момент ДПТ с механической характеристикой 1 соответственно; M_{MAX}, Ω_C - максимальный момент и скорость приводов с механической характеристикой 4 соответственно; I_{ε}, I_M - момент инерции соответственно двигателя и муфты муфтового привода; Ω_D - скорость трехфазного асинхронного двигателя при критическом скольжении. Максимальная мощность электродвигателей серии ДКИ указана в паспортных данных, она соответствует режиму в точке В на механической характеристике



2. Значения P_{MAX} ДПТ серии 2П приняты равными $2P_{НОМ}$, где $P_{НОМ}$ - номинальная мощность соответствующего двигателя, а трехфазных асинхронных двигателей – $1,5P_{НОМ}$.

Рис.3.7. Механические характеристики ИЭ: 1 – ДПТ с постоянными магнитами;

2 – двухфазных асинхронных двигателей;

3 – трехфазных асинхронных двигателей; 4 – ДПТ серии 2П и муфтовых приводов

Исходные данные и результаты расчета по формулам (3.18) приведены в табл. 3.1. Для составления табличных данных в качестве критериев сравнения исполнительных двигателей приняты: максимальные мощность P_{MAX} и приемистость Π_{MAX} ИД, удельная масса двигателя (m_{∂} / P_{MAX}) и КПД при максимальной мощности на валу ИД.

Таблица 3.1

Технические характеристики исполнительных электродвигателей

[illegible]

Окончание табл.3.1

Ха- рак- тери- стика	Двигатель											
	ПВ					ДКИ						
Ω_X, c^{-1}	165					900		1000		1050		
$M_{II}, M_{MAX},$ $H \cdot M$	86, 5	126	186	273	497	682	28*1 0 ⁻⁴	65*1 0 ⁻⁴	0,01 3	0,03	0,03 8	0,05 5
$I_3 \cdot 10^{-5},$ $I_{II} \cdot 10^{-5},$ $кг \cdot м^2$	110 0	160 0	370 0	540 0	16*1 0 ³	22*1 0 ³	0,00 6	0,018	0,07	0,2	0,5	1,5
$P_{MAX}, кВт$	4,5	8,3 5	9,7	14, 3	26	46,5	10 ⁻³	2,5*1 0 ⁻³	0,00 6	0,01 6	0,02 5	0,04
$\Pi_{MAX},$ $кВт / с$	170	204	240	345	388	530	0,03 3	0,059	0,06	0,11 3	0,07 2	0,05
$m_d, кг$	30	40	46	64	92	125	0,1	0,18	0,35	0,75	1,3	2,36

Анализ характеристик (рис. 3.7) и табличных значений Π_{MAX} позволяют отметить, что при равных значениях Π_{MAX} время разгона двигателей с механической характеристикой 4 приблизительно в три раза меньше, чем двигателей с механической характеристикой 1 (см. рис.3.7)

Из двух двигателей с равными значениями P_{MAX} и Π_{MAX} более высокие динамические характеристики имеет тот, у которого больше собственный момент инерции, так как на его динамические свойства меньшее влияние оказывает присоединенный момент инерции.

Из соотношения (3.15) для моментов можно записать:

$$i_2^2 - \frac{M_{MAX}}{I_3 \varepsilon_H} i_2 + \frac{I_H \varepsilon_H + M_H}{I_3 \varepsilon_H} = 0 \quad (3.19)$$

Решение уравнения (3.19) позволяет определить корни

$$i_{2MIN}, i_{2MAX} = \frac{1}{i_{OPT}} \left(\frac{M_{MAX}}{2I_3} \pm \sqrt{\frac{\Pi_{MAX} - \Pi_H}{I_3}} \right), \quad (3.20)$$

действительные значения которых имеют место при

$$\Pi_{MAX} \geq \Pi_H, \quad \Pi_{MAX} = M_{MAX}^2 / 4I_{\vartheta}, \quad \Pi_H = (I_H \varepsilon_H + M_H) \varepsilon_H, \quad (3.21)$$

где Π_{MAX}, Π_H - максимальная приемистость электродвигателя и приемистость при номинальной нагрузке. Максимальное ускорение ОУ достигается при оптимальном значении $i_{OPT} = M_{MAX} / 2I_{\vartheta} \varepsilon_H$, что возможно при $\Pi_{MAX} = \Pi_H$.

Неравенства (3.21) и (3.16) являются необходимыми условиями воспроизведения ИД заданного закона движения исполнительного механизма $(\varepsilon_H, \Omega_H)$ при наличии момента нагрузки M_H . Достаточное условие обеспечивается при выборе передаточного отношения редуктора из соотношения

$$i_{2MIN} < i < i_1. \quad (3.22)$$

Выполнение соотношения $P_{MAX} = P_{HMAX}$ и $\Pi_{MAX} = \Pi_H$ требует согласования ИД с нагрузкой по мощности и приемистости одновременно, что трудновыполнимо [8, 11]. Если $\varepsilon_H I_H \ll M_H$, то для исполнительных низкоскоростных систем ИД выбирается только по мощности $P_{MAX} > P_H = M_H \Omega_H$, а передаточное отношение редуктора определяется из соотношения (3.15). Для быстродействующих электромеханических систем, когда $\varepsilon_H I_H \gg M_H$, приемистость двигателя имеет решающее значение. При возведении в квадрат левой и правой частей уравнения (3.15) можно записать:

$$\Pi_{MAX} \geq \frac{1}{4} \left(\Pi + \frac{1}{\Pi} \right)^2 \Pi_H, \quad (3.23)$$

где $\Pi_H = \varepsilon_H^2 I_H$ - приемистость ОУ при $M_H = 0$; $\Pi = \sqrt{i^2 I_{\vartheta} / I_H}$.

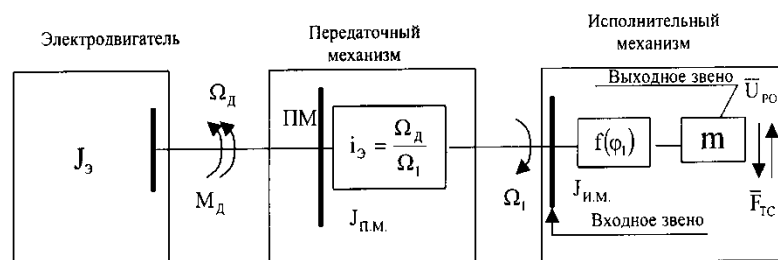
Анализ (3.19) показывает, что при значении $\Pi = 1$ оптимальное передаточное от-

ношение редуктора $i_{OPT} = \sqrt{I_H / I_{\vartheta}}$, требуемая приемистость электродвигателя минимальна и равна Π_H .

Отношение моментов инерции двигателя и ОУ влияет на динамические свойства ЭМС. Поэтому при проектировании по уравнениям (3.16) и (3.21) определяются необходимая и максимальная приемистость Π_{HMAX} и мощность P_{HMAX} ОУ. По полученным расчетным значениям выбирают электродвигатель, P_{HMAX} и Π_{HMAX} которого не ниже рассчитанных. Если в результате расчета по уравнениям (3.15) и (3.20) передаточные отношение редуктора находятся в соотношении $i_1 > i_{2MIN}$, то выбранный ИД обеспечивает требуемый закон движения выходного вала. Окончательное значение передаточного отношения редуктора выбирается из соотношения (3.22). Если соотношение $i_1 < i_{2MIN}$, то предварительно выбранный электродвигатель следует заменить на ИД с большей мощностью и приемистостью, произвести перерасчет передаточных отношений редуктора с новыми данными.

3. Динамическая модель исполнительного устройства технологической машины

Электромеханическую систему, исполнительную часть силового канала можно представить структурной схемой, отображающей основные этапы преобразования и использования электроэнергии, передаваемой от электродвигателя к рабочему органу МС (машины) при выполнении конкретной технологической операции (рис. 3.8). При этом основной целью функционирования технологического оборудования является качественное выполнение технологического процесса с учетом заданной производительности. Для современных МС (машин) характерны тенденции к повышению их производительности (увеличению быстроходности, сокращению времени переходных процессов), росту рабочих нагрузок, точности, экономичности и надежности. Столь противоречивые требования можно удовлетворить наилучшим образом только при тщательном анализе движений в МС (машине) с учетом всех основных силовых факторов. Выбрать рациональную схему,



оценить точностные и выявить прочностные, энергетические характеристики позволяют решения задач динамики проектируемой МС (машины). Одновременно с анализом динамических процессов ведутся поиски по уменьшению материалоемкости и габаритов МС (машины).

Рис. 3.8. Динамическая модель ЭММ технологической машины

Исследования движения МС (машины) проводят с использованием известных уравнений механики, в качестве ее динамической модели выбирают некоторую точку вращающегося звена или звено, реально совпадающее с выбранным звеном исполнительного механизма (ИМ). В качестве такого звена обычно выбирают приводной вал [4, 12, 13] исполнительного механизма машины (рис.3.9). Угол φ поворота такого звена, совпадающего с выбранным приводным валом машины, принимают за обобщенную координату, а скорость Ω и ускорение ε - обобщенными скоростью и ускорением вращения вала машины. Звенья, совершающие возвратно-поступательные движения, представлены в виде точек с массой m .

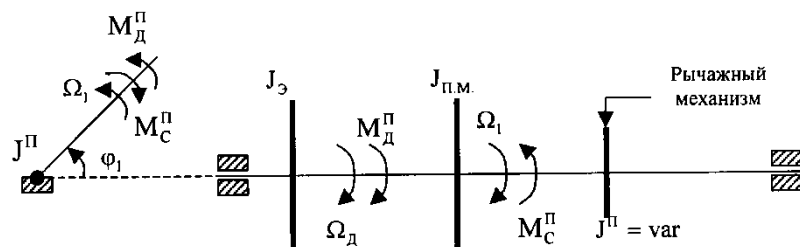


Рис. 3.9. Упрощенная динамическая модель электромеханического модуля

Рабочий орган (РО), выполняющий основную технологическую функцию, располагается на выходном звене исполнительного механизма. Входное звено ИМ приводится в движение электродвигателем через передаточный механизм (ПМ), представляющий собой набор зубчатых передач с подвижными или неподвижными осями вращения. В общем случае вращающиеся звенья машин, влияющие на значение скорости выходного звена, представлены дисками с осевыми моментами инерции $J_э$, $J_{п.м}$ и $J_{и.м}$, соответственно ротора электродвигателя передаточного и исполнительного механизмов. Входное звено кинематически связано с рабочим органом (РО), а связь обозначена через $f(\varphi_1)$, что соответствует перемещению РО в зависимости от угла поворота входного звена. На рис. 3.9,а приведена упрощенная динамическая модель машины, где звено приведения совпадает с входным звеном

ИМ, вращается с угловой скоростью Ω_1 и обладает приведенным моментом инерции $J^П$. Значение $J^П$ определяется из условия равенства кинетических энергий звена приведения и всех движущихся звеньев машины от электродвигателя до рабочего органа.

Разность приведенных моментов сил движущих $M^П_Д$ и сил сопротивления $M^П_С$ составляет приведенный момент $M^П$, приложенный к звену приведения. С учетом введенных обозначений для упрощенной динамической модели можно записать выражения для:

- приведенной мощности $P_П = M^П \cdot \Omega_1$;

- приводимой мощности движущих сил $P_Д = M_Д \cdot \Omega_Д$;

- приводимой мощности сил технологического сопротивления $F_{ТС}$, определяемой зависимостью $P_С = F_{ТС} \cdot V_{РО}$ или $P_С = M_{ТС} \cdot \Omega_{РО}$;

где $V_{РО}$ – линейная скорость точки приложения сил сопротивления, $M_{ТС}$ – момент технологических сил, $\Omega_{РО}$ – угловая скорость рабочего органа;

- приведенный момент движущих сил $M^П_Д = M_Д \cdot \frac{\Omega_Д}{\Omega_1}$.

Из условия равенства кинематических энергий звена приведения и рабочего органа для механизма, на основании теоремы об изменении кинетической энергии механизма в дифференциальной форме для динамической модели можно представить уравнение движения в виде

$$\frac{j^П \Omega_1^2}{2} = \frac{m V_{po}^2}{2}, \quad j^П = m \left(\frac{V_{po}}{\Omega_1} \right)^2, \quad (3.24)$$

$$dT = dA = M^П d\varphi, \quad M^П = M^П_Д - M^П_С. \quad (3.25)$$

Для поступательно движущегося звена приведения

$$dT = dA = F_n \cdot ds, \quad (3.26)$$

где $F_n = F^П_Д - F^П_С$, $F^П_Д$ и $F^П_С$ – приведенные силы (движущая и сопротивления); S – общая координата прямолинейного движения звена.

С учетом выражений (3.24) и (3.25) приведенный момент при вращающемся звене составит

$$\frac{d}{d\varphi} \left(\frac{J^П \cdot \Omega^2}{2} \right) = M^П, \quad (3.27)$$

а приведенная сила

$$\frac{d}{dS} \left(\frac{m^{\Pi} \cdot V^2}{2} \right) = F^{\Pi}, \quad (3.28)$$

где m^{Π} – приведенная масса материальных точек системы, определяется по формуле:

$$m^{\Pi} = \sum_{i=1}^{\Pi} \left[m_i \left(\frac{V_{si}}{V} \right)^2 + J_{si} \left(\frac{\Omega_i}{V} \right)^2 \right], \quad (3.29)$$

где m_i – масса i -го звена, V_{si} – модуль скорости центра масс звена i ; V – модуль скорости прямолинейно движущегося начального звена для механизма с плоскопараллельным движением; J_{si} – момент инерции звена i относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости движения.

Преобразование уравнений (3.27) и (3.28) приведено в [12] и может быть представлено в виде:

$$\frac{dJ^{\Pi}}{d\varphi} \cdot \frac{\Omega^2}{2} + J^{\Pi} \cdot \varepsilon = M_{\mathcal{D}}^{\Pi} - M_C^{\Pi}, \quad (3.30)$$

$$\frac{dm^{\Pi}}{dS} \cdot \frac{V^2}{2} - m^{\Pi} \cdot \ddot{S} = F_{\mathcal{D}}^{\Pi} - F_C^{\Pi}. \quad (3.31)$$

Уравнения (3.30) и (3.31) позволяют определить законы изменения приведенного движущего момента

$$M_{\mathcal{D}}^{\Pi} = M_C^{\Pi} + J^{\Pi} \cdot \varepsilon + \frac{\Omega^2}{2} \cdot \frac{dJ^{\Pi}}{d\varphi}, \quad (3.32)$$

приведенной движущей силы

$$F_{\mathcal{D}}^{\Pi} = F_C^G + m^{\Pi} \cdot S + \frac{V^2}{2} \frac{dm^{\Pi}}{dS}. \quad (3.33)$$

Уравнение (3.32) представляет собой закон изменения крутящего момента на приводном валу при заданном законе регулирования $\Omega = f(\varphi)$. Значение обобщенного ускорения определяется как:

$$\varepsilon = \frac{d\Omega}{dt} \frac{d\varphi}{dS} = \Omega' \cdot \Omega.$$

Приведенный момент инерции J^{Π} звена приведения определяется постоянной составляющей приведенного момента инерции J^{Π_I} , обусловленной моментами инерции ротора электродвигателя, главного приводного вала машины, звеньями редуктора с постоянным передаточным отношением. Переменную составляющую же приведенного момента инерции $J^{\Pi_{II}}$ создают звенья механизмов машины, совершающих плоскопараллельное, возвратно-вращательное, возвратно-поступательное движения, для которых передаточные кинематические функции являются переменными.

Если положить, что $J^{\Pi} = J^{\Pi_I} + J^{\Pi_{II}}$, то уравнение (3.32) можно преобразовать к виду

$$M_{\Pi}^{\Pi} = M_C^{\Pi} + J_I^{\Pi} \cdot \Omega' \cdot \Omega + J_{II}^{\Pi} \cdot \Omega' \cdot \Omega + \frac{\Omega^2}{2} \frac{dJ^{\Pi}}{d\varphi}. \quad (3.34)$$

Анализ уравнения (3.34) позволяет учесть влияние каждой составляющей J^{Π} на закон изменения динамического крутящего момента на приводном валу электродвигателя. При этом можно рассматривать также влияние момента сопротивления M_c на M_{Π}^{Π} , если $M_c = f(S)$, $M_c = f(\Omega)$, $M_c = f(t)$. Характер зависимостей будет изменяться, если машина выполняет некоторые технологические операции или разгоняется вхолостую, когда $M_{\Pi}^{\Pi} = 0$. Второй член уравнения (3.34) зависит только от $\Omega' \cdot \Omega = \varepsilon$, поскольку $J^{\Pi_I} = \text{const}$. Третий член уравнения определяется произведением двух функций и носит более сложный характер. В зависимости от постановки задачи исследования влияния сил технологического сопротивления, сил тяжести отдельных подвижных звеньев, их совместного влияния на закон движения звена приведения машин могут быть получены различные соотношения скорости и масс подвижных звеньев передаточных и исполнительных механизмов, а также соотношения сил движущих и сил технологического сопротивления. Результаты исследования позволяют предопределить и учесть соотношения взаимодействующих сил и скоростей вращения (перемещения) отдельных звеньев исполнительного механизма (с одной степенью свободы) в процессе передачи энергии от электродвигателя к рабочему органу машины.

Лекция

**Тема 1.2.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТИРИСТОР-
НОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭММ**

ВОПРОСЫ

1. Выбор схемы и характеристики элементов энергетического канала ТП.
2. Обеспечение требований качества формирования напряжения и режима работы ТП.
3. Требования к устройствам управления ТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические модули мехатронных систем. Основы расчета и проектирования. Учеб. пособие. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2001. - 173 с. (гл.4 п.4.2, 4.5, 4.8).

1. Характеристики элементов энергетического канала ТП

1.1. Выбор схемы тиристорного преобразователя

В электромеханическом модуле (ЭММ) тиристоре усилительно-преобразовательные устройства (УПУ) применяют в качестве управляемых усилителей-преобразователей напряжения, мощности постоянного и переменного тока. Принцип действия тиристорных управляемых выпрямителей отличается от неуправляемых только тем, что переключение фаз выпрямления происходит не в момент равенства фазных ЭДС, а позже, с некоторым углом запаздывания или управления α . Для регулирования среднего значения выходного напряжения используют однофазные и многофазные схемы.

Однофазные схемы часто применяют для возбуждения электрических машин и регулирования напряжения на якоре ДПТ маломощных систем (до 10 кВт). Простейшие примеры организации однофазных двухполупериодных схем УПУ постоянного тока для работы на активно-реактивную нагрузку приведены на рис. 4.1, а-б.

Двухполупериодную схему (рис. 4.1,а) также называют двухтактной или двухфазной, поскольку она выпрямляет оба полупериода. В этой схеме вторичные полуобмотки силового трансформатора ТС относительно его средней точки (нулевого вывода) создают систему напряжений, сдвинутых друг относительно друга на угол π . Следует отметить значимость функционирования нулевого вентиля VD_0 в схеме. Работа нулевого вентиля VD_0 приводит к тому, что основная гармоника тока первичной обмотки трансформатора ТС оказывается смещенной относительно напряжения на угол равный $\frac{\alpha}{2}$ [14] при индуктивном характере нагрузки. Сдвиг фаз между током и напряжением увеличивается при отсутствии VD_0 и может составить угол α . Поэтому и вводят в схему нулевой вентиль VD_0 (обратный диод), обеспечивая повышенный коэффициент мощности преобразователя.

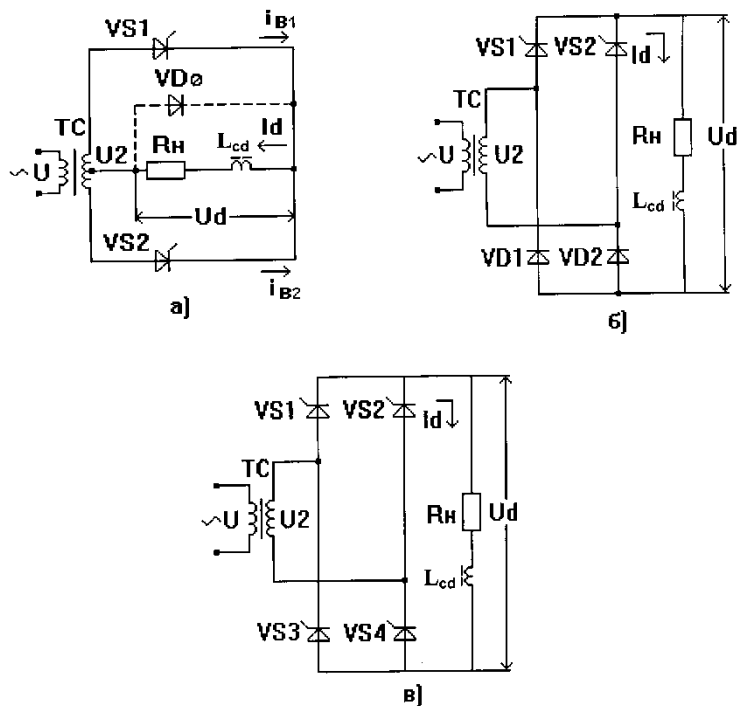


Рис. 4.1. Схемы однофазных регулируемых выпрямителей

На рис. 4.1,б,в изображены мостовые двухтактные несимметричная и симметричная схемы управляемых тиристорных преобразователей (ТП) соответственно. Применение двух тиристоров вместо четырех дает возможность для упрощения схемы управления и удешевления стоимости в целом ТП. Однако схемы отличаются и режимами нагружения вентиля, поскольку время протекания тока по неуправляемому вентилю составляет $(\pi + \alpha)$, а по тиристору $(\pi - \alpha)$ [15].

Схемы управляемых выпрямителей трехфазного напряжения применяются для питания потребителей средней и большой мощности (свыше 10 кВт). Первичная обмотка силовых трансформаторов Т таких ТП состоит из трех фаз, соединенных либо в звезду, либо в треугольник. В общем случае простейшие схемы управляемых ТП для питания цепи двигателя постоянного тока приведены на рис. 4.2, а, б.

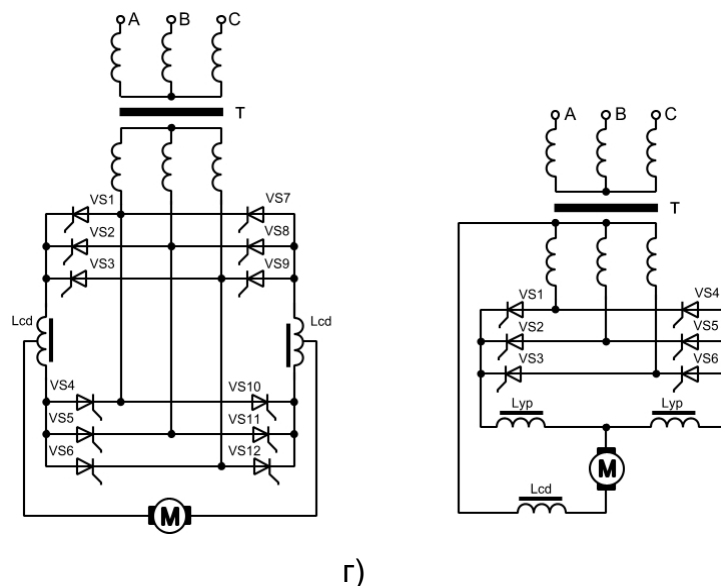
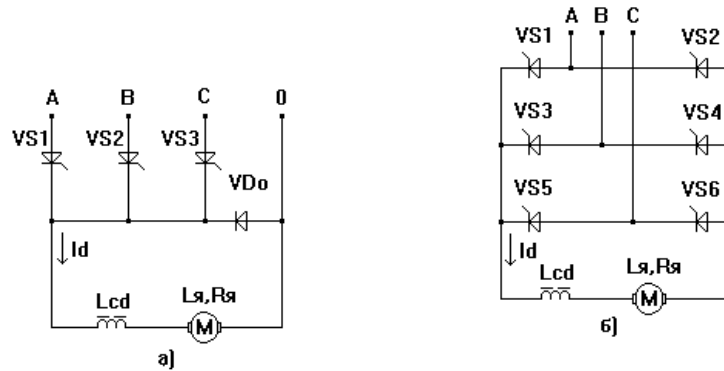


Рис. 4.2. Схемы трехфазных регулируемых выпрямителей

В табл.4.1 приведены основные данные, характеризующие наиболее часто применяемые выпрямительные схемы ТП при $\alpha=0$ и активно-индуктивной нагрузке.

Таблица 4.1

**Расчетные соотношения схем выпрямления
при активно-индуктивной нагрузке**

Управление цифровых образовательных технологий

Схема преобразователя	K_e	K_o	K_{ic}	$K_{Tэ}$	K_T	K_{i1}	K_{mp}	K_{i2}	m	λ гр.эл
Однофазная двухполупериодная с нулевой точкой трансформатора	1,11	3,14	0,5	0,71	1,48	1,11	1,57	1,48	2	180
Однофазная мостовая	1,11	1,57	0,5	0,71	1,23	1,11	1,11	1,23	2	180
Трехфазная нулевая, трансформатор $Y/\lambda (m=3)$	0,85	2,09	0,33	0,58	1,35	0,47	0,58	1,35	3	120
Трехфазная мостовая, схема Y/λ	0,42	1,04	0,33	0,58	1,05	0,81	0,81	1,05	6	60
Трехфазная нулевая, трансформатор $Y/\lambda - Y (m=6)$ с УР	0,85	2,1	0,17	0,29	1,26	0,4	0,29	1,36	6	60
Трехфазная нулевая с соединением трансформатора «звезда-зигзаг»	0,85	2,09	0,33	0,58	1,46	0,47	0,58	1,46	3	120

Примечания: $K_e = U_2 / E_{do}$ - отношение действующего значения напряжения вторичной обмотки трансформатора к наибольшему значению средней выпрямленной ЭДС; $K_o = U_{с. макс} / E_{do}$ - отношение максимального обратного напряжения на тиристоре к выпрямленной ЭДС; $K_{ic} = I_T / I_d$ - отношение среднего значения тока тиристора к среднему значению выпрямленного тока; $K_{Tэ} = I_{Tэ} / I_d$ - отношение действующего значения тока тиристора к среднему значению выпрямленного тока; $K_T = P_T / P_d$ - отношение типовой мощности трансформатора к мощности на стороне выпрямленного тока; $K_{i1} = I_1 / (I_d K_{mp})$ - отношение действующего значения

тока фазы первичной обмотки трансформатора, приведенного к числу витков вторичной обмотки, к среднему значению выпрямленного тока (схемный коэффициент первичного тока); $K_{TP} = E_1 / E_2$ - коэффициент трансформации трансформатора; $K_{i2} = I_2 / I_d$ - отношение действующего значения тока фазы вторичной обмотки трансформатора к среднему выпрямленному току; $\lambda = 360 / m$ - предельный угол проводимости тиристора; m - число фаз (для нулевых схем $m=3$, мостовых $m=6$).

В нулевых схемах нагрузка подключается между нулевым проводом трансформатора и общей точкой тиристоров. Мостовые схемы можно рассматривать как последовательное соединение двух нулевых, нагрузка в которых подключается между двумя общими точками тиристоров. Одна общая точка образована объединением анодов, а другая – катодов тиристоров. Выбор схемы преобразователя определяется мощностью двигателя и требованиями к качеству выходного напряжения ЭММ.

Так, однофазные преобразователи находят применение преимущественно в ПР малой грузоподъемности с невысокими требованиями к качеству движения. Наиболее широко используются трехфазные нулевые схемы. В ПР большой грузоподъемности с высокими требованиями к качеству движения, особенно при пониженных скоростях, находят применение мостовые трехфазные схемы.

В зависимости от принципа управления нереверсивного привода при параллельном соединении схем применяют уравнительные реакторы, служащие для выравнивания мгновенных значений напряжений двух сдвинутых по фазе систем.

В основу построения реверсивных преобразователей и схем управления ими положен принцип совместного или раздельного управления двухкомплектным преобразователем [16]. Совместное управление выполняется согласованным и несогласованным. При согласованном управлении средние значения напряжений тиристорных групп равны друг другу, т.е. выполняется соотношение:

$$\alpha_B + \alpha_N = 180 \text{ град. эл.}, \quad (4.1)$$

где α_B, α_N - углы управления выпрямительной и инверторной групп. В этом случае между тиристорными группами протекает уравнительный ток, минуя нагрузку. Для ограничения величины уравнительного тока в схеме преобразователя

устанавливают уравнивающие реакторы $L_{ур}$. Для сглаживания тока якоря применяются сглаживающие дроссели $L_{сд}$.

При раздельном управлении тиристорными группами уравнивающие реакторы отсутствуют. Управляющие импульсы подаются только на ту группу, которая в данный момент должна работать. На неработающую группу управляющие импульсы не подаются. Блокирование управляющих импульсов производится логическим переключающим устройством (ЛПУ), которое определяет момент равенства нулю тока преобразователя и снимает импульсы управления с ранее работавшей анодной группы тиристоров, и после некоторой паузы разрешает подачу импульсов на тиристора катодной группы. Пауза обычно не превышает 5-10 мс и необходима для снижения тока якоря до нуля в выключаемой группе тиристоров.

Выбор схем тиристорных управляемых выпрямителей при проектировании ЭММ зависит от режима работы ДПТ, потребляемой мощности, степени использования ДПТ по мощности, допускаемой пульсации тока якоря и требований, предъявляемых к электроприводу.

1.2. Характеристики элементов энергетического канала

Тиристорные преобразователи (ТП) являются одним из основных регулируемых источников напряжения для питания двигателей постоянного тока (ЭММ) как по цепи якоря (якорное управление), так и по цепи обмотки возбуждения (полюсное управление).

Обычно однофазные схемы преобразователей используются для ЭММ малой мощности (0,5 – 2,5 кВт), а также для питания обмоток возбуждения двигателей. Для этих же целей могут использоваться трехпульсные схемы преобразователей ($m=3$) (рис. 4.2, а, г).

Шестипульсные схемы преобразователей ($m=6$) (рис. 4.2, б, в) применяются для приводов большой мощности, а также в случаях, когда необходим большой диапазон регулирования скорости двигателя.

Реверсивные преобразователи выполняются чаще всего по встречно-параллельной схеме (рис. 4.2. в) соединения тиристорных групп, имеющей ряд достоинств. Она содержит простой двухобмоточный силовой согласующий трансформатор, который может быть применен как в реверсивном, так и в нереверсивном электроприводе, и имеет меньшую типовую мощность. Схема такого ЭММ может пи-

таться непосредственно от трехфазной сети переменного тока через анодные токоограничивающие реакторы, что позволяет унифицировать конструкции модулей реверсивного и нереверсивного электроприводов.

При проектировании ЭММ необходимо учитывать характеристики, массогабаритные показатели и других узлов, по которым протекают нагрузочные токи ТП. К таким узлам следует отнести автоматические выключатели на стороне переменного и постоянного тока, линейные контакторы, нагрузочные сопротивления цепи динамического торможения, измерительные шунты и др. Система управления электроприводом МС включает в себя и систему импульсно-фазового управления (СИФУ), формирующую последовательность отпирающих импульсов тиристоров с требуемыми электрическими параметрами.

Напряжение управления (СИФУ) формируется на основании информации о требуемом значении основной регулируемой координаты с учетом некоторой дополнительной информации, получаемой от датчиков и устройств контроля параметров энергетического канала.

Тиристорный преобразователь (ТП) управляется СИФУ синхронно частоте питающей сети. Для надежного запуска ТП необходимо, чтобы при подаче управляющих импульсов на тиристоры за время их существования через тиристоры протекал ток больше тока удержания. Нарастание тока в силовой цепи определяется постоянной времени цепи нагрузки и уровнем мгновенного напряжения на включаемых тиристорах. Наиболее неблагоприятные условия для надежного отпирания тиристоров имеют место при работе ТП на активно-индуктивную нагрузку (обмотку возбуждения электрической машины, на якорь машины постоянного тока с насыщающимся сглаживающим дросселем в режиме малых токов). Поэтому при расчете устройств запуска тиристоров длительность управляющего импульса, выбранная из условий надежного отпирания тиристора, является важнейшим расчетным параметром для проектирования ЭММ. При этом должны учитываться параметры электропитания тиристорного агрегата и индуктивность питающей сети, приведенная к входу ТП. Методы расчета многоуровневых схем электропитания крупных объектов с несколькими ТП приведены в [17].

2. Обеспечение требований качества формирования напряжения и режима работы тиристорного преобразователя

Для уменьшения пульсаций тока и ограничения зоны прерывистых токов в якорной цепи двигателя устанавливается при необходимости сглаживающий дроссель (см.рис 4.1, 4.2).

Если сглаживающий дроссель отсутствует и индуктивность обмотки якоря $L_{я}$ недостаточна, то на ДПТ от ТП поступает пульсирующее напряжение при изменении угла управления α тиристорами от 10 до 90 град. эл. Вследствие значительных пульсаций тока якоря увеличивается коэффициент формы кривой K_f , т.е. отношение его среднеквадратического значения к среднему. При этом расчетная мощность электродвигателя по требуемому статическому моменту нагружения, обусловленного гладкой составляющей тока $I_{я}$, должна быть увеличена в K_f раз. При протекании тока $I_{я}$ коэффициент K_f изменяется от значения 1,11 для непрерывного тока до 2,72 при прерывистом токе и уменьшении относительной величины угла проводимости тиристора λ^* соответственно от 1 до 1/6.

С достаточной для инженерных расчетов точностью при определении величины индуктивности сглаживающего дросселя можно пользоваться следующей приближенной формулой:

$$L_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot E_{do}}{i_e \cdot \omega \cdot I}, \quad (4.12)$$

где $L_{\Sigma} = L_{cd} + L_T + L_{yp} + L_{я}$ – суммарная индуктивность якорной цепи; L_{cd} – индуктивность сглаживающего дросселя; L_T – приведенная к цепи постоянного тока индуктивность силового трансформатора; L_{yp} – индуктивность уравнивающего дросселя; $L_{я}$ – индуктивность якоря двигателя; E_n – относительная величина эффективного значения первой гармоники выпрямленного напряжения; E_{do} – наибольшее значение средней выпрямленной ЭДС; i_e – относительная величина эффективного значения первой гармоники выпрямленного тока; I – ток нагрузки преобразователя; $\omega = 314 \cdot m$ – угловая частота первой гармоники выпрямленного напряжения; m – число фаз (тактов) преобразователя.

Необходимая индуктивность сглаживающего дросселя:

$$L_{cd} = \frac{E_n \cdot E_{do}}{i_e \cdot \omega \cdot I} - (L_T + L_{yp} + L_{я}) \quad (4.13)$$

Для нахождения относительной величины эффективного значения первой гармоники выпрямленного напряжения пользуются формулой, полученной в результате разложения кривой выпрямленного напряжения в ряд Фурье без учета влияния режима коммутации [14]:

$$E_n = E_{do} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{\sqrt{2}}{k^2 \cdot m^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot m^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (4.14)$$

где $k \cdot m \pm 1 = n$ - порядковый номер гармоники по отношению к основной ча-

стоте питающей сети при $m > 1$; $k = 1, 2, 3 \dots$; α - угол управления тиристоров.

Отношение действующего значения гармоники n -го порядка к среднему значению выпрямленного напряжения в процентах при $\alpha = 0$ составит:

$$\frac{E_n}{E_{do}} = \cos \alpha \cdot \frac{\sqrt{2}}{k^2 \cdot m^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot m^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \cdot 100 \quad (4.15)$$

Наибольшее значение амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения имеет место при угле управления $\alpha = 90^\circ$ град. эл.

Для ограничения уравнительных токов в реверсивных тиристорных преобразователях с согласованным управлением применяют уравнительные реакторы. Индуктивность уравнительных реакторов рассчитывают по формуле:

$$L_{yp} = \frac{U_{2m}}{\omega \cdot I_{yp}} \cdot K_{yp} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{2\pi \cdot f \cdot I_{yp}} \cdot K_{yp} \quad (4.16)$$

где L_{yp} - суммарная индуктивность двух реакторов; $U_{2m} = 1,41 \cdot U_2$ - амплитудное значение фазного напряжения вторичной обмотки силового трансформатора для трехфазной схемы с нулевым выводом и линейное для трехфазной мостовой схемы; $\omega = 2\pi \cdot f$ - угловая частота напряжения сети; $I_{yp} = K_{yp} \cdot I_n$

- среднее значение уравнительного тока; K_{yp} - расчетный коэффициент, определяемый током преобразователя и углом управления α , в расчетах применяется равным 0,65 для трехфазной схемы с нулевым выводом и 0,18 – для трехфазной мостовой схемы.

Для ненасыщающихся реакторов с большим воздушным зазором в сердечнике индуктивность каждого реактора выбирается равной $L'_{yp} = L_{yp}$. Обычно реакторы выбираются частично насыщающимися с индуктивностью $L'_{yp} = 0,7 \cdot L_{yp}$ и имеют наилучшие массогабаритные характеристики.

3. Требования к устройствам управления тиристорными преобразователями

В электротехнических установках, требующих изменения направления тока в нагрузке, при проектировании ЭММ широко применяют реверсивные тиристорные преобразователи. При униполярности проводимости тиристора реверсирование тока нагрузки возможно за счет установки переключателя тока – реверсора или с помощью двух противоположно включенных комплектных ТП.

При схемотехническом решении ЭММ в первом случае предусматривают один ТП и переключатель – реверсор (ключи 1К – 4К) (рис.4.3,а), втором – использование двух тиристорных преобразователей ТП₁ и ТП₂ (рис 4.3,б), каждый из которых проводит ток якоря двигателя М в определенном направлении.

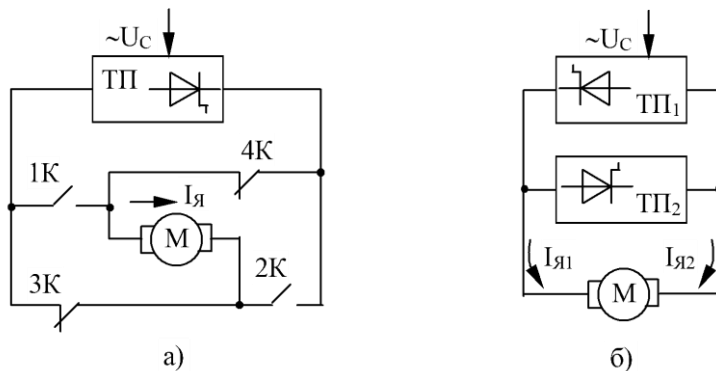


Рис. 4.3. Функциональные схемы однокомплектного (а) и двухкомплектного (б) реверсивного тиристорного преобразователя

Известно [14-16], что схемы ТП с совместным управлением предполагают включение уравнивающих реакторов между собой и исполнительным двигателем М, схемы ТП с раздельным управлением – без уравнивающих реакторов. Отсутствие токоограничивающих реакторов, использование двухобмоточных силовых трансформаторов значительно снижают габариты и массу ТП, а также стоимость всего ЭММ в целом по сравнению с аналогичным, выполненным на базе ТП с совместным согласованным управлением. Значительно также упрощается схема ТП с

раздельным управлением вследствие отсутствия датчиков и регуляторов уравнивающего тока. Снижается вероятность опрокидывания инвертора, так как инверторные группы тиристоров работают только в режиме рекуперации тока в сеть и исключается возможность появления уравнивающего динамического тока [16]. При раздельном управлении лучше используется ТП по напряжению, упрощается задача защиты силовых элементов ТП, снижается влияние помех на работу СИФУ. Однако ТП с раздельным управлением имеют недостатки:

- при переключениях с одного комплекта тиристоров (например, ТП₁) на другой (ТП₂) имеет место зона нечувствительности;
- наличие аппаратной бестоковой паузы между временем снятия импульсов управления с одного комплекта тиристоров (ТП₁) и подачей их на другой комплект (ТП₂);
- вероятность работы ТП в режиме прерывистого тока.

Для придания ТП с раздельным управлением достоинств ТП с совместным управлением в настоящее время разработаны различные схемные решения и устройства, широко используемые в системах управления ТП. Динамические характеристики ТП с раздельным управлением при наличии адаптивных регуляторов внутренних контуров тока и напряжения практически приближены к характеристикам ТП с совместным управлением. Разработки соответствующих требованиям устройств с использованием микроэлектроники позволили создать надежные быстродействующие системы управления ТП.

В основе принципа действия ТП с раздельным управлением комплектами тиристоров лежит логическое переключающее устройство (ЛПУ). На функциональной схеме (рис.4.4) показаны кроме ЛПУ и другие элементы СУ, обеспечивающие работу ТП с раздельным управлением. К ним следует отнести: системы импульсно-фазового управления (СИФУ₁ и СИФУ₂), датчики нулевого тока ДНТ₁ и ДНТ₂; устройство управления (УУ) и датчик управления (ДУ), трансформаторы тока ТТ₁ и ТТ₂. Рассматриваемая функциональная схема управления двумя комплектами ТП построена по принципу раздельного управления и называется двухкомплектной с двухканальной СИФУ. Существуют схемы управления с одной СИФУ, сигналы управления с которой посредством ключей «переброса» подаются на ТП₁ или ТП₂.

Логическое переключающее устройство, в котором включение группы тиристоров другого направления осуществляется в функции сигнала системы управления (обычно с выхода регулятора тока РТ или сигнала рассогласования другого контура регулирования), получило в настоящее время широкое распространение.

Сигналы СУ U_1 и U_2 подаются на устройство управления (УУ) и датчик управления (ДУ), что служит необходимой информацией для реализации конкретных функций ЛПУ и СИФУ_{1,2} по управлению двигателем М.

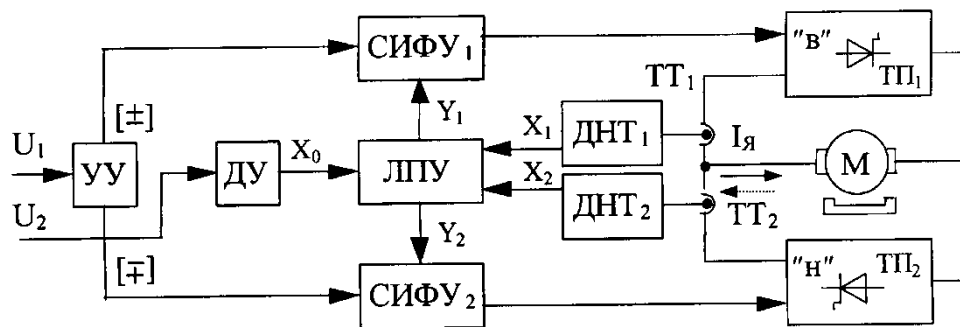


Рис. 4.4. Функциональная схема реализации раздельного управления тиристорными преобразователями

Включение ЛПУ в функциональной схеме должно обеспечивать:

- запрет появления импульсов управления от СИФУ_{1,2} в двухкомплектном тиристорном преобразователе (ТП₁ и ТП₂);
- выбор тиристорного преобразователя, на который должны быть поданы импульсы управления от СИФУ_{1,2};
- запрет включения другого ТП до тех пор, пока в контуре нагрузки протекает ток от ранее работавшего комплекта тиристоров;
- создание необходимой временной задержки между моментом снятия импульсов управления с ранее работавшего ТП и моментом подачи импульсов на вновь включаемый ТП.

Перечисленные требования определяют алгоритм работы ЛПУ и определяют формируемые характеристики системы «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока» (ТП – ДТП). Поскольку ЛПУ является устройством дискретного действия, то его выходные Y_1 и Y_2 величины являются дискретными и представляются двумя уровнями напряжений: низким $\rightarrow 0$, высоким $\rightarrow 1$. С учетом требований к функционированию ЛПУ алгоритм работы последнего можно записать в виде структурных формул:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \overline{(X_0 + X_1)} + X_2, \\ Y_2 &= \overline{(X_0 + X_2)} + X_1, \end{aligned} \quad (4.27)$$

где Y_1 и Y_2 – запрещающие сигналы на работу тиристорных групп условно «вперед» – «В», «назад» – «Н»; X_1 , X_2 – сигналы наличия тока в силовом контуре ТП₁,

ТП₂; X_0 – сигнал выбора тиристорной группы «В» или «Н». Если $U_2 > 0$, то $X_0 = 0$ и выбирается для работы тиристорный преобразователь ТП₁ (группа тиристоров «В»). При $U_2 < 0$, $X_0 = 1$ и разрешение к работе получает группа «Н» (т.е. преобразователь ТП₂).

В соответствии с выражением (4.27) запрещающий сигнал Y_1 имеет место на входе СИФУ₁, если $X_2 = 1$, т.е. $I_{\alpha} \neq 0$ или $X_2 = 0$ и $X_1 = 0$, но $X_0 = 1$.

Аналогично можно записать условие формирования запрещающего сигнала для входа Y_2 , т.е. $Y_2 = 1$, если $X_1 = 1$, $I_{\alpha} \neq 0$ или $X_1 = X_2$, но $X_0 = 0$.

Следует отметить, что схемы ЛПУ в зависимости от наличия или отсутствия зоны нечувствительности в релейном устройстве проектируются по двух- или трехпозиционной логической схеме [16]. В двухпозиционной схеме импульсы управления присутствуют на одной из групп «В» или «Н» тиристоров всегда в зависимости от знака сигнала U_2 системы управления. В трехпозиционной логической схеме, если сигнал U_2 с выхода системы управления меньше зоны нечувствительности релейного устройства, импульсы управления снимаются с силовых тиристоров обеих групп. Главным недостатком приведенных логических схем является неоднозначность внешних характеристик ЭММ, работающих в режиме прерывистых токов [20], когда при одном и том же сигнале U_1 напряжение нагрузки принимает различные значения, ухудшаются динамические свойства ТП. Системы ЛПУ оказываются чувствительны также к отклонению характеристик комплектующих их элементов и других устройств, входящих в функциональную схему управления тиристорными преобразователями. Наиболее перспективными для управления ТП в ЭММ являются ЛПУ поискового типа [16] или ЛПУ, построенные с использованием принципа сканирования [20] или самонастройки режима работы ТП.

Лекция

Тема 1.2.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭММ

ВОПРОСЫ

1. Выбор схемы и характеристики элементов энергетического канала ТП.
2. Обеспечение требований качества формирования напряжения и режима работы ТП.

3. Требования к устройствам управления ТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические модули мехатронных систем. Основы расчета и проектирования. Учеб. пособие. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2001. - 173 с. (гл.4 п.4.2, 4.5, 4.8).

1. Характеристики элементов энергетического канала ТП

1.1. Выбор схемы тиристорного преобразователя

В электромеханическом модуле (ЭММ) тиристоре усилительно-преобразовательные устройства (УПУ) применяют в качестве управляемых усилителей-преобразователей напряжения, мощности постоянного и переменного тока. Принцип действия тиристорных управляемых выпрямителей отличается от неуправляемых только тем, что переключение фаз выпрямления происходит не в момент равенства фазных ЭДС, а позже, с некоторым углом запаздывания или управления α . Для регулирования среднего значения выходного напряжения используют однофазные и многофазные схемы.

Однофазные схемы часто применяют для возбуждения электрических машин и регулирования напряжения на якоре ДПТ маломощных систем (до 10 кВт). Простейшие примеры организации однофазных двухполупериодных схем УПУ постоянного тока для работы на активно-реактивную нагрузку приведены на рис. 4.1,а-б.

Двухполупериодную схему (рис. 4.1,а) также называют двухтактной или двухфазной, поскольку она выпрямляет оба полупериода. В этой схеме вторичные обмотки силового трансформатора ТС относительно его средней точки (нулевого вывода) создают систему напряжений, сдвинутых друг относительно друга на угол π . Следует отметить значимость функционирования нулевого вентиля VDo в схеме. Работа нулевого вентиля VDo приводит к тому, что основная гармоника тока первичной обмотки трансформатора ТС оказывается смещенной относительно напряжения на угол равный $\frac{\alpha}{2}$ [14] при индуктивном характере нагрузки. Сдвиг фаз между током и напряжением увеличивается при отсутствии VDo и может составить

угол α . Поэтому и вводят в схему нулевой вентиль VD_0 (обратный диод), обеспечивая повышенный коэффициент мощности преобразователя.

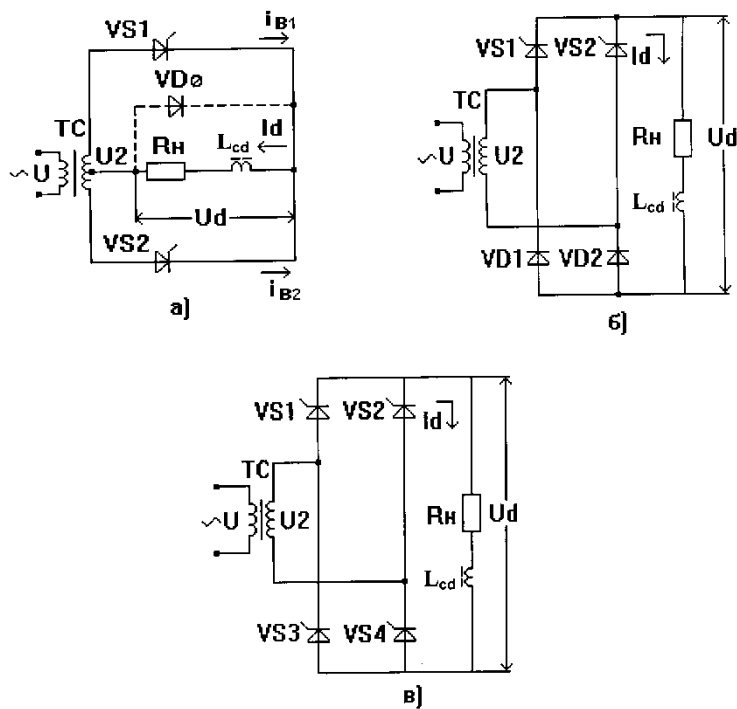


Рис. 4.1. Схемы однофазных регулируемых выпрямителей

На рис. 4.1,б,в изображены мостовые двухтактные несимметричная и симметричная схемы управляемых тиристорных преобразователей (ТП) соответственно. Применение двух тиристоров вместо четырех дает возможность для упрощения схемы управления и удешевления стоимости в целом ТП. Однако схемы отличаются и режимами нагружения вентилей, поскольку время протекания тока по неуправляемому вентилю составляет $(\pi + \alpha)$, а по тиристоры $(\pi - \alpha)$ [15].

Схемы управляемых выпрямителей трехфазного напряжения применяются для питания потребителей средней и большой мощности (свыше 10 кВт). Первичная обмотка силовых трансформаторов T таких ТП состоит из трех фаз, соединенных либо в звезду, либо в треугольник. В общем случае простейшие схемы управляемых ТП для питания цепи двигателя постоянного тока приведены на рис. 4.2, а, б.

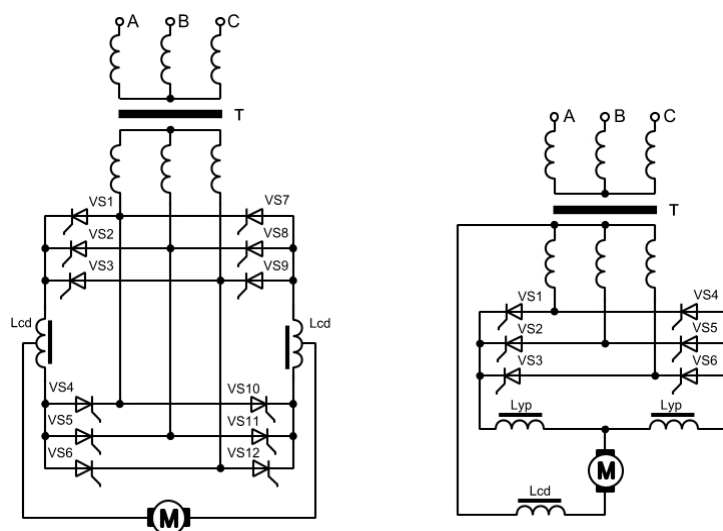
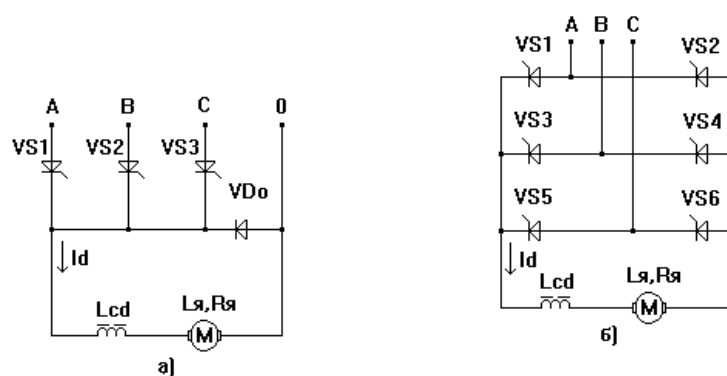


Рис. 4.2. Схемы трехфазных регулируемых выпрямителей

В табл.4.1 приведены основные данные, характеризующие наиболее часто применяемые выпрямительные схемы ТП при $\alpha=0$ и активно-индуктивной нагрузке.

Таблица 4.1

**Расчетные соотношения схем выпрямления
при активно-индуктивной нагрузке**

Схема преобразователя	K_e	K_o	K_{ic}	$K_{тэ}$	K_t	K_{i1}	K_{mp}	K_{i2}	m	λ гр.эл
Однофазная двухполупериодная с нулевой точкой трансформатора	1,11	3,14	0,5	0,71	1,48	1,11	1,57	1,48	2	180

Управление цифровых образовательных технологий

Однофазная мостовая	1,11	1,57	0,5	0,71	1,23	1,11	1,11	1,23	2	180
Трехфазная нулевая, трансформатор $Y/\lambda (m=3)$	0,85	2,09	0,33	0,58	1,35	0,47	0,58	1,35	3	120
Трехфазная мостовая, схема Y/λ	0,42	1,04	0,33	0,58	1,05	0,81	0,81	1,05	6	60
Трехфазная нулевая, трансформатор $Y/\lambda - Y (m=6)$ с УР	0,85	2,1	0,17	0,29	1,26	0,4	0,29	1,36	6	60
Трехфазная нулевая с соединением трансформатора «звезда-зигзаг»	0,85	2,09	0,33	0,58	1,46	0,47	0,58	1,46	3	120

Примечания: $K_e = U_2 / E_{d0}$ - отношение действующего значения напряжения вторичной обмотки трансформатора к наибольшему значению средней выпрямленной ЭДС; $K_0 = U_{с. макс} / E_{d0}$ - отношение максимального обратного напряжения на тиристоре к выпрямленной ЭДС; $K_{ic} = I_T / I_d$ - отношение среднего значения тока тиристора к среднему значению выпрямленного тока; $K_{TЭ} = I_{TЭ} / I_d$ - отношение действующего значения тока тиристора к среднему значению выпрямленного тока; $K_T = P_T / P_d$ - отношение типовой мощности трансформатора к мощности на стороне выпрямленного тока; $K_{i1} = I_1 / (I_d K_{mp})$ - отношение действующего значения тока фазы первичной обмотки трансформатора, приведенного к числу витков вторичной обмотки, к среднему значению выпрямленного тока (схемный коэффициент первичного тока); $K_{TP} = E_1 / E_2$ - коэффициент трансформации трансформатора; $K_{i2} = I_2 / I_d$ - отношение действующего значения тока фазы вторичной обмотки трансформатора к среднему выпрямленному току; $\lambda = 360 / m$ - предельный

угол проводимости тиристора; m - число фаз (для нулевых схем $m=3$, мостовых $m=6$).

В нулевых схемах нагрузка подключается между нулевым проводом трансформатора и общей точкой тиристорov. Мостовые схемы можно рассматривать как последовательное соединение двух нулевых, нагрузка в которых подключается между двумя общими точками тиристорov. Одна общая точка образована объединением анодов, а другая – катодов тиристорov. Выбор схемы преобразователя определяется мощностью двигателя и требованиями к качеству выходного напряжения ЭММ.

Так, однофазные преобразователи находят применение преимущественно в ПР малой грузоподъемности с невысокими требованиями к качеству движения. Наиболее широко используются трехфазные нулевые схемы. В ПР большой грузоподъемности с высокими требованиями к качеству движения, особенно при пониженных скоростях, находят применение мостовые трехфазные схемы.

В зависимости от принципа управления нереверсивного привода при параллельном соединении схем применяют уравнительные реакторы, служащие для выравнивания мгновенных значений напряжений двух сдвинутых по фазе систем.

В основу построения реверсивных преобразователей и схем управления ими положен принцип совместного или раздельного управления двухкомплектным преобразователем [16]. Совместное управление выполняется согласованным и несогласованным. При согласованном управлении средние значения напряжений тиристорных групп равны друг другу, т.е. выполняется соотношение:

$$\alpha_B + \alpha_N = 180 \text{ град. эл}, \quad (4.1)$$

где α_B, α_N - углы управления выпрямительной и инверторной групп. В этом случае между тиристорными группами протекает уравнительный ток, минуя нагрузку. Для ограничения величины уравнительного тока в схеме преобразователя устанавливают уравнительные реакторы $L_{ур}$. Для сглаживания тока якоря применяются сглаживающие дроссели L_{cd} .

При раздельном управлении тиристорными группами уравнительные реакторы отсутствуют. Управляющие импульсы подаются только на ту группу, которая в данный момент должна работать. На неработающую группу управляющие импульсы не подаются. Блокирование управляющих импульсов производится логическим переключающим устройством (ЛПУ), которое определяет момент равенства

нулю тока преобразователя и снимает импульсы управления с ранее работавшей анодной группы тиристоров, и после некоторой паузы разрешает подачу импульсов на тиристора катодной группы. Пауза обычно не превышает 5-10 мс и необходима для снижения тока якоря до нуля в выключаемой группе тиристоров.

Выбор схем тиристорных управляемых выпрямителей при проектировании ЭММ зависит от режима работы ДПТ, потребляемой мощности, степени использования ДПТ по мощности, допускаемой пульсации тока якоря и требований, предъявляемых к электроприводу.

1.2. Характеристики элементов энергетического канала

Тиристорные преобразователи (ТП) являются одним из основных регулируемых источников напряжения для питания двигателей постоянного тока (ЭММ) как по цепи якоря (якорное управление), так и по цепи обмотки возбуждения (полюсное управление).

Обычно однофазные схемы преобразователей используются для ЭММ малой мощности (0,5 – 2,5 кВт), а также для питания обмоток возбуждения двигателей. Для этих же целей могут использоваться трехпульсные схемы преобразователей ($m=3$) (рис. 4.2, а, г).

Шестипульсные схемы преобразователей ($m=6$) (рис. 4.2, б, в) применяются для приводов большой мощности, а также в случаях, когда необходим большой диапазон регулирования скорости двигателя.

Реверсивные преобразователи выполняются чаще всего по встречно-параллельной схеме (рис. 4.2. в) соединения тиристорных групп, имеющей ряд достоинств. Она содержит простой двухобмоточный силовой согласующий трансформатор, который может быть применен как в реверсивном, так и в нереверсивном электроприводе, и имеет меньшую типовую мощность. Схема такого ЭММ может питаться непосредственно от трехфазной сети переменного тока через анодные токоограничивающие реакторы, что позволяет унифицировать конструкции модулей реверсивного и нереверсивного электроприводов.

При проектировании ЭММ необходимо учитывать характеристики, массогабаритные показатели и других узлов, по которым протекают нагрузочные токи ТП. К таким узлам следует отнести автоматические выключатели на стороне переменного и постоянного тока, линейные контакторы, нагрузочные сопротивления цепи

динамического торможения, измерительные шунты и др. Система управления электроприводом МС включает в себя и систему импульсно-фазового управления (СИФУ), формирующую последовательность отпирающих импульсов тиристоров с требуемыми электрическими параметрами.

Напряжение управления (СИФУ) формируется на основании информации о требуемом значении основной регулируемой координаты с учетом некоторой дополнительной информации, получаемой от датчиков и устройств контроля параметров энергетического канала.

Тиристорный преобразователь (ТП) управляется СИФУ синхронно частоте питающей сети. Для надежного запуска ТП необходимо, чтобы при подаче управляющих импульсов на тиристоры за время их существования через тиристоры протекал ток больше тока удержания. Нарастание тока в силовой цепи определяется постоянной времени цепи нагрузки и уровнем мгновенного напряжения на включаемых тиристорах. Наиболее неблагоприятные условия для надежного отпирания тиристоров имеют место при работе ТП на активно-индуктивную нагрузку (обмотку возбуждения электрической машины, на якорь машины постоянного тока с насыщающимся сглаживающим дросселем в режиме малых токов). Поэтому при расчете устройств запуска тиристоров длительность управляющего импульса, выбранная из условий надежного отпирания тиристора, является важнейшим расчетным параметром для проектирования ЭММ. При этом должны учитываться параметры электропитания тиристорного агрегата и индуктивность питающей сети, приведенная к входу ТП. Методы расчета многоуровневых схем электропитания крупных объектов с несколькими ТП приведены в [17].

2. Обеспечение требований качества формирования напряжения и режима работы тиристорного преобразователя

Для уменьшения пульсаций тока и ограничения зоны прерывистых токов в якорной цепи двигателя устанавливается при необходимости сглаживающий дроссель (см. рис 4.1, 4.2).

Если сглаживающий дроссель отсутствует и индуктивность обмотки якоря $L_{я}$ недостаточна, то на ДПТ от ТП поступает пульсирующее напряжение при изме-

нении угла управления α тиристорами от 10 до 90 град. эл. Вследствие значительных пульсаций тока якоря увеличивается коэффициент формы кривой K_f , т.е. отношение его среднеквадратического значения к среднему. При этом расчетная мощность электродвигателя по требуемому статическому моменту нагружения, обусловленного гладкой составляющей тока $I_{я}$, должна быть увеличена в K_f раз. При протекании тока $I_{я}$ коэффициент K_f изменяется от значения 1,11 для непрерывного тока до 2,72 при прерывистом токе и уменьшении относительной величины угла проводимости тиристора λ^* соответственно от 1 до 1/6.

С достаточной для инженерных расчетов точностью при определении величины индуктивности сглаживающего дросселя можно пользоваться следующей приближенной формулой:

$$L_{\Sigma} = \frac{E_n \cdot E_{do}}{i_e \cdot \omega \cdot I}, \quad (4.12)$$

где $L_{\Sigma} = L_{cd} + L_T + L_{yp} + L_{я}$ – суммарная индуктивность якорной цепи; L_{cd} – индуктивность сглаживающего дросселя; L_T – приведенная к цепи постоянного тока индуктивность силового трансформатора; L_{yp} – индуктивность уравнивающего дросселя; $L_{я}$ – индуктивность якоря двигателя; E_n – относительная величина эффективного значения первой гармоники выпрямленного напряжения; E_{do} – наибольшее значение средней выпрямленной ЭДС; i_e – относительная величина эффективного значения первой гармоники выпрямленного тока; I – ток нагрузки преобразователя; $\omega = 314 \cdot m$ – угловая частота первой гармоники выпрямленного напряжения; m – число фаз (тактов) преобразователя.

Необходимая индуктивность сглаживающего дросселя:

$$L_{cd} = \frac{E_n \cdot E_{do}}{i_e \cdot \omega \cdot I} - (L_T + L_{yp} + L_{я}) \quad (4.13)$$

Для нахождения относительной величины эффективного значения первой гармоники выпрямленного напряжения пользуются формулой, полученной в результате разложения кривой выпрямленного напряжения в ряд Фурье без учета влияния режима коммутации [14]:

$$E_n = E_{do} \cdot \cos \alpha \cdot \frac{\sqrt{2}}{k^2 \cdot m^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot m^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (4.14)$$

где $k \cdot m \pm 1 = n$ - порядковый номер гармоники по отношению к основной частоте питающей сети при $m > 1$; $k = 1, 2, 3 \dots$; α - угол управления тиристором.

Отношение действующего значения гармоники n -го порядка к среднему значению выпрямленного напряжения в процентах при $\alpha = 0$ составит:

$$\frac{E_n}{E_{do}} = \cos \alpha \cdot \frac{\sqrt{2}}{k^2 \cdot m^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot m^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} \cdot 100 \quad (4.15)$$

Наибольшее значение амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения имеет место при угле управления $\alpha = 90^\circ$ град. эл.

Для ограничения уравнильных токов в реверсивных тиристорных преобразователях с согласованным управлением применяют уравнильные реакторы. Индуктивность уравнильных реакторов рассчитывают по формуле:

$$L_{yp} = \frac{U_{2m}}{\omega \cdot I_{yp}} \cdot K_{yp} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_2}{2\pi \cdot f \cdot I_{yp}} \cdot K_{yp}, \quad (4.16)$$

где L_{yp} - суммарная индуктивность двух реакторов; $U_{2m} = 1,41 \cdot U_2$ - амплитудное значение фазного напряжения вторичной обмотки силового трансформатора для трехфазной схемы с нулевым выводом и линейное для трехфазной мостовой схемы; $\omega = 2\pi \cdot f$ - угловая частота напряжения сети; $I_{yp} = K_{yp} \cdot I_n$

- среднее значение уравнильного тока; K_{yp} - расчетный коэффициент, определяемый током преобразователя и углом управления α , в расчетах применяется равным 0,65 для трехфазной схемы с нулевым выводом и 0,18 – для трехфазной мостовой схемы.

Для ненасыщающихся реакторов с большим воздушным зазором в сердечнике индуктивность каждого реактора выбирается равной $L'_{yp} = L_{yp}$. Обычно реакторы выбираются частично насыщающимися с индуктивностью $L'_{yp} = 0,7 \cdot L_{yp}$ и имеют наилучшие массогабаритные характеристики.

3. Требования к устройствам управления тиристорными преобразователями

В электротехнических установках, требующих изменения направления тока в нагрузке, при проектировании ЭММ широко применяют реверсивные тиристорные преобразователи. При униполярности проводимости тиристора реверсирование тока нагрузки возможно за счет установки переключателя тока – реверсора или с помощью двух противоположно включенных комплектных ТП.

При схемотехническом решении ЭММ в первом случае предусматривают один ТП и переключатель – реверсор (ключи 1К – 4К) (рис.4.3,а), втором – использование двух тиристорных преобразователей ТП₁ и ТП₂ (рис 4.3,б), каждый из которых проводит ток якоря двигателя М в определенном направлении.

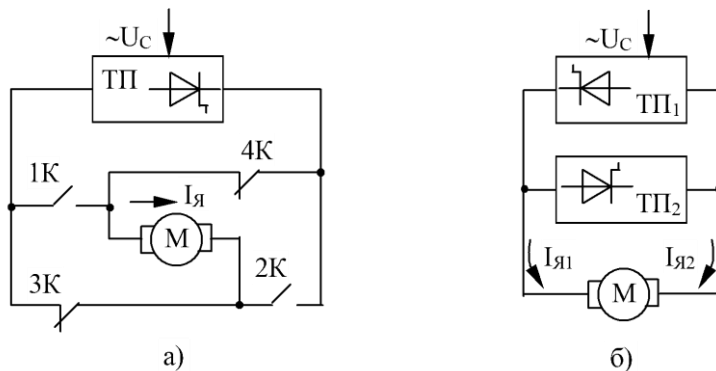


Рис. 4.3. Функциональные схемы однокомплектного (а) и двухкомплектного (б) реверсивного тиристорного преобразователя

Известно [14-16], что схемы ТП с совместным управлением предполагают включение уравнивающих реакторов между собой и исполнительным двигателем М, схемы ТП с раздельным управлением – без уравнивающих реакторов. Отсутствие токоограничивающих реакторов, использование двухобмоточных силовых трансформаторов значительно снижают габариты и массу ТП, а также стоимость всего ЭММ в целом по сравнению с аналогичным, выполненным на базе ТП с совместным согласованным управлением. Значительно также упрощается схема ТП с

раздельным управлением вследствие отсутствия датчиков и регуляторов уравнивающего тока. Снижается вероятность опрокидывания инвертора, так как инверторные группы тиристоров работают только в режиме рекуперации тока в сеть и исключается возможность появления уравнивающего динамического тока [16]. При раздельном управлении лучше используется ТП по напряжению, упрощается задача защиты силовых элементов ТП, снижается влияние помех на работу СИФУ. Однако ТП с раздельным управлением имеют недостатки:

- при переключениях с одного комплекта тиристоров (например, ТП₁) на другой (ТП₂) имеет место зона нечувствительности;
- наличие аппаратной бестоковой паузы между временем снятия импульсов управления с одного комплекта тиристоров (ТП₁) и подачей их на другой комплект (ТП₂);
- вероятность работы ТП в режиме прерывистого тока.

Для придания ТП с раздельным управлением достоинств ТП с совместным управлением в настоящее время разработаны различные схемные решения и устройства, широко используемые в системах управления ТП. Динамические характеристики ТП с раздельным управлением при наличии адаптивных регуляторов внутренних контуров тока и напряжения практически приближены к характеристикам ТП с совместным управлением. Разработки соответствующих требованиям устройств с использованием микроэлектроники позволили создать надежные быстродействующие системы управления ТП.

В основе принципа действия ТП с раздельным управлением комплектами тиристоров лежит логическое переключающее устройство (ЛПУ). На функциональной схеме (рис.4.4) показаны кроме ЛПУ и другие элементы СУ, обеспечивающие работу ТП с раздельным управлением. К ним следует отнести: системы импульсно-фазового управления (СИФУ₁ и СИФУ₂), датчики нулевого тока ДНТ₁ и ДНТ₂; устройство управления (УУ) и датчик управления (ДУ), трансформаторы тока ТТ₁ и ТТ₂. Рассматриваемая функциональная схема управления двумя комплектами ТП построена по принципу раздельного управления и называется двухкомплектной с двухканальной СИФУ. Существуют схемы управления с одной СИФУ, сигналы управления с которой посредством ключей «переброса» подаются на ТП₁ или ТП₂.

Логическое переключающее устройство, в котором включение группы тиристоров другого направления осуществляется в функции сигнала системы управления (обычно с выхода регулятора тока РТ или сигнала рассогласования другого контура регулирования), получило в настоящее время широкое распространение.

Сигналы СУ U_1 и U_2 подаются на устройство управления (УУ) и датчик управления (ДУ), что служит необходимой информацией для реализации конкретных функций ЛПУ и СИФУ_{1,2} по управлению двигателем М.

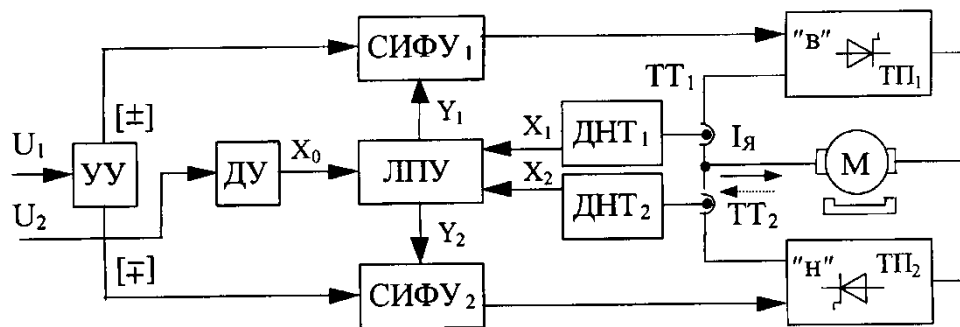


Рис. 4.4. Функциональная схема реализации раздельного управления тиристорными преобразователями

Включение ЛПУ в функциональной схеме должно обеспечивать:

- запрет появления импульсов управления от СИФУ_{1,2} в двухкомплектном тиристорном преобразователе (ТП₁ и ТП₂);
- выбор тиристорного преобразователя, на который должны быть поданы импульсы управления от СИФУ_{1,2};
- запрет включения другого ТП до тех пор, пока в контуре нагрузки протекает ток от ранее работавшего комплекта тиристоров;
- создание необходимой временной задержки между моментом снятия импульсов управления с ранее работавшего ТП и моментом подачи импульсов на вновь включаемый ТП.

Перечисленные требования определяют алгоритм работы ЛПУ и определяют формируемые характеристики системы «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока» (ТП – ДТП). Поскольку ЛПУ является устройством дискретного действия, то его выходные Y_1 и Y_2 величины являются дискретными и представляются двумя уровнями напряжений: низким $\rightarrow 0$, высоким $\rightarrow 1$. С учетом требований к функционированию ЛПУ алгоритм работы последнего можно записать в виде структурных формул:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \overline{(X_0 + X_1)} + X_2, \\ Y_2 &= \overline{(X_0 + X_2)} + X_1, \end{aligned} \quad (4.27)$$

где Y_1 и Y_2 – запрещающие сигналы на работу тиристорных групп условно «вперед» – «В», «назад» – «Н»; X_1 , X_2 – сигналы наличия тока в силовом контуре ТП₁,

ТП₂; X_0 – сигнал выбора тиристорной группы «В» или «Н». Если $U_2 > 0$, то $X_0 = 0$ и выбирается для работы тиристорный преобразователь ТП₁ (группа тиристоров «В»). При $U_2 < 0$, $X_0 = 1$ и разрешение к работе получает группа «Н» (т.е. преобразователь ТП₂).

В соответствии с выражением (4.27) запрещающий сигнал Y_1 имеет место на входе СИФУ₁, если $X_2 = 1$, т.е. $I_{\alpha} \neq 0$ или $X_2 = 0$ и $X_1 = 0$, но $X_0 = 1$.

Аналогично можно записать условие формирования запрещающего сигнала для входа Y_2 , т.е. $Y_2 = 1$, если $X_1 = 1$, $I_{\alpha} \neq 0$ или $X_1 = X_2$, но $X_0 = 0$.

Следует отметить, что схемы ЛПУ в зависимости от наличия или отсутствия зоны нечувствительности в релейном устройстве проектируются по двух- или трехпозиционной логической схеме [16]. В двухпозиционной схеме импульсы управления присутствуют на одной из групп «В» или «Н» тиристоров всегда в зависимости от знака сигнала U_2 системы управления. В трехпозиционной логической схеме, если сигнал U_2 с выхода системы управления меньше зоны нечувствительности релейного устройства, импульсы управления снимаются с силовых тиристоров обеих групп. Главным недостатком приведенных логических схем является неоднозначность внешних характеристик ЭММ, работающих в режиме прерывистых токов [20], когда при одном и том же сигнале U_1 напряжение нагрузки принимает различные значения, ухудшаются динамические свойства ТП. Системы ЛПУ оказываются чувствительны также к отклонению характеристик комплектующих их элементов и других устройств, входящих в функциональную схему управления тиристорными преобразователями. Наиболее перспективными для управления ТП в ЭММ являются ЛПУ поискового типа [16] или ЛПУ, построенные с использованием принципа сканирования [20] или самонастройки режима работы ТП.

Лекция

Тема 1.2.9. ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

ВОПРОСЫ

1. Особенности построения, применения и принцип работы ШИП.
2. Электромагнитные процессы в ШИП.

3. Механические и энергетические характеристики в системе ШИП-ДПТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карнаухов Н.Ф. Электромеханические модули мехатронных систем. Основы расчета и проектирования. Учеб.пособие. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2001. - 173 с. (гл.6).

1. Особенности построения, применения и принцип работы ШИП

Широтно-импульсные преобразователи (ШИП) находят применение в электроприводах мехатронных систем благодаря их высоким динамическим и энергетическим свойствам. Основой ШИП является силовой ключ (СК), который коммутирует напряжение источника питания на нагрузку двигателя постоянного тока (рис.6.1). Оптимальным ключом для преобразователя служит полностью управляемый силовой полупроводниковый прибор (СПП), шунтированный быстродействующим диодом. К таким приборам относятся биполярные и полевые транзисторы, запираемые сигналом управления, тиристоры и гибридные интегральные модули на их основе. Основным недостатком тиристорных ключей является их неполная управляемость и необходимость применения для их запираения специальных коммутационных узлов формирования мощных запирающих импульсов. Вследствие этого массогабаритные показатели и КПД тиристорных ШИП несколько ниже транзисторных.

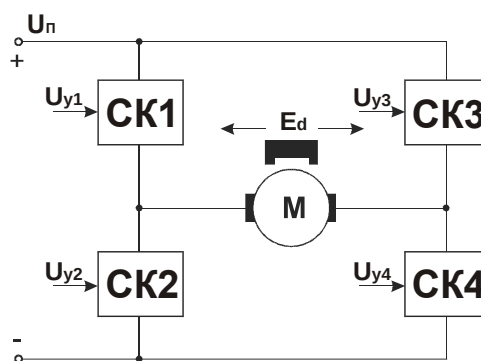


Рис. 6.1. Упрощённая принципиальная схема ШИП: СК1 – СК4 – силовые ключи; $U_{y1} - U_{y4}$ – сигналы управления

В зависимости от способа управления ШИП к нагрузке (рис.6.2) прикладывается однополярное или разнополярное импульсное напряжение. Среднее значение

ЭДС преобразователя E_d (или напряжение на якоре $U_{я}$) для симметричного управления ($\gamma_0=0.5$) $E_d=U_n(2\gamma-1)$, для несимметричного и поочерёдного управления ($\gamma_0 = 0$) $E_d=U_n\gamma$, где γ_0 – скважность импульсов выходного напряжения при сигнале управления равном нулю. Так как коммутация СК происходит не мгновенно, а занимает некоторый интервал времени, то практически $\gamma_{max}<1$ и устанавливается с помощью системы управления на уровне 0.85–0.9, чему соответствует максимальное выходное напряжение

$E_{dmax}=(0.85-0.9)U_n$, где U_n – напряжение источника питания.

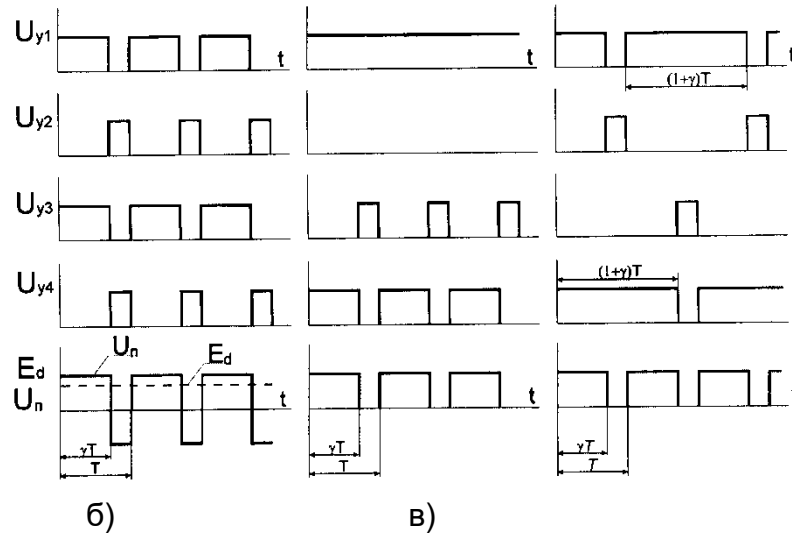


Рис. 6.2. Временные диаграммы работы ШИП при двухсторонней энергетической связи: а – симметричное; б – несимметричное; в – поочерёдное управление:

T – период коммутации; γ - скважность импульсов

Приведённая на рис. 6.1 схема ШИП позволяет осуществить как двигательный, так и тормозные режимы работы двигателя. Она обеспечивает непрерывный ток при любой нагрузке и регулируемую скорость холостого хода. В системах, не обеспечивающих тормозные режимы, возможен режим прерывистых токов [28]. В таком режиме линейность механических характеристик двигателей постоянного тока нарушается.

В отличие от управляемых выпрямителей функции выпрямления переменного напряжения и регулирование его средней величины в схеме ШИП-Д разделены. Функцию выпрямления переменного напряжения силового трансформатора выполняет неуправляемый выпрямитель, собранный чаще всего по трёхфазной мостовой схеме. Выпрямленное напряжение $U_d = \text{const}$ сглаживается ёмкостным либо индуктивно-ёмкостным фильтром.

Силовые трансформаторы модулей ЭМС являются самым распространённым элементом, согласующим напряжение в сети и выпрямителя с напряжением двигателя. Благодаря разделению функций выпрямления и регулирования выходного напряжения в системах ШИП габаритная мощность трансформатора может быть существенно снижена по сравнению со схемами с управляемыми выпрямителями [29]. Исследования показывают, что габаритная мощность $S_{т.г}$ для систем ШИП-Д находится в пределах $(0.6-0.8)U_{ном} \cdot I_{ном}$ в зависимости от типа нагрузки, в то время как для шестиимпульсного реверсивного УВ она составляет $(1.6-1.7)U_{ном} I_{ном}$.

Таким образом, габаритная мощность трансформаторов систем ШИП-Д примерно в 2 раза меньше, чем трансформаторов УВ при равных мощностях двигателей. Характерно также снижение габаритных размеров и массы других силовых элементов энергетического канала по сравнению с двигателями, работающими в приводах с УВ, благодаря меньшим пульсациям тока в якоре. Проведённые для серии ПБВ расчёты [30] показывают, что увеличение массы двигателей $\Delta m_{дв}$, работающих в системе ШИП-Д, для различных типоразмеров составляет от 0.5 до 3.2%; для тех же двигателей, работающих в приводах с шестиимпульсными УВ – от 4.7 до 45%, а для трёхимпульсных УВ – от 11 до 100%. Таким образом, система ШИП-Д позволяет осуществить заметную экономию массы исполнительных двигателей и расход соответственно меди и электротехнической стали. Применяемые в современных ШИП-Д якорные сглаживающие реакторы также существенно меньше по массе (в 3-4 раза), чем реакторы, используемые в шестиимпульсных УВ.

Важным техническим показателем системы ШИП-Д является высокое быстродействие при отработке управляющих и возмущающих воздействий. При частоте коммутации 4-5 кГц реально достижимая полоса пропускания контура тока в 2-2.5 раза превышает полосу пропускания в схемах с шестиимпульсным управлением УВ. Более высокое быстродействие приводов ШИП-Д позволяет соответственно увеличить добротность проектируемой системы. Для обеспечения максимальной производительности необходимо минимизировать суммарный момент инерции, приведённый к валу двигателя, применяя малоинерционные двигатели (предпочтительно с дисковыми якорями). Индуктивность якоря таких двигателей значительно меньше, чем у обычных и высокомоментных. Поэтому применение ШИП с более высокой частотой коммутации позволяет сократить потери в двигателе и уменьшить габариты сглаживающего реактора, время нарастания тока якоря и скорости двигателя, что сказывается на увеличении производительности механизма МС.

Указанные достоинства систем электропривода с ШИП обусловили их широкое применение в различных МС.

Принцип работы

шиотно-импульсного преобразователя

Электроприводы с широтно-импульсными преобразователями МС являются более быстродействующими, чем приводы с управляемыми выпрямителями, обеспечивают высокие диапазоны регулирования скорости (до 10000 и более) с высокой плавностью вращения вала двигателя, имеют незначительные потери и более высокий коэффициент мощности преобразования [29].

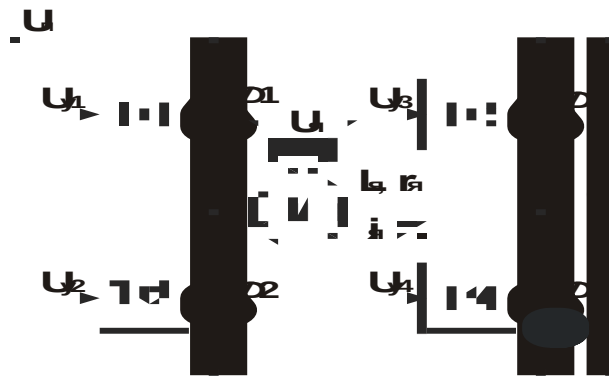


Рис. 6.3. Схема транзисторного ключа

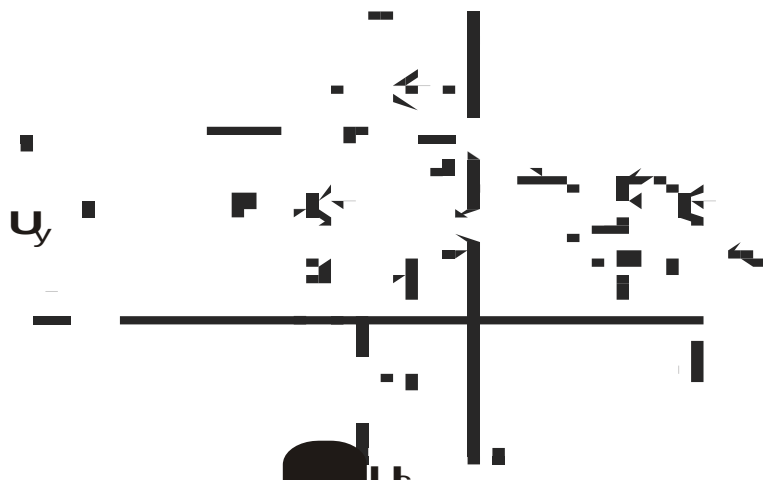


Рис.6.4. Схема транзисторного широтно-импульсного преобразователя

Основой полупроводниковых ШИП являются транзисторный или тиристорный силовые ключи СК. Транзисторный ключ представляет собой функционально

законченное устройство, содержащее схемы гальванической развязки, усиления и защиты [28]. Один из вариантов построения транзисторного ключа ТК представлен на рис.6.3. Схема содержит выходные транзисторы VT5, VT6, включенные по схеме Дарлингтона с обратным диодом VD2. Транзистор VT6 и диод VD2 могут содержать несколько параллельно включенных приборов. Предвыходной каскад выполнен на транзисторах VT1-VT4, каскад согласования управляющих сигналов и сигналов защиты с предвыходным усилителем выполнен на микросхеме D. Схема транзисторного ключа содержит блок защиты БЗ по току и каскад гальванической развязки ГР. Питание предвыходного усилителя, устройств управления и защиты осуществляется от отдельного симметричного источника со средней точкой.

При отсутствии управляющих импульсов ($U_y=0$) на выходе каскада ГР и блока БЗ имеет место логическая единица, выходной транзистор схемы совпадения D открыт, транзисторы VT1-VT3 заперты, а транзистор VT4 открыт. При этом по базовой цепи транзисторов VT5-VT6 течет запирающий ток, транзисторный ключ оказывается в закрытом состоянии. При подаче сигнала управления U_y на каскад ГР, т.е. $U_y=1$, отпираются транзисторы VT1 – VT3, закрывается транзистор VT4 и открываются транзисторы VT5, VT6. При протекании тока через ключ ТК выше заданного уровня сигнал, поступающий с измерительного резистора RI на вход блока БЗ, переводит его в открытое состояние (логический ноль на выходе). Этот сигнал запирает ключ ТК. Импульсы U_c частотой до 50 кГц, поступающие на синхронизирующий вход блока БЗ, переводят его в исходное состояние, в котором он и остается, если устранилась причина, вызвавшая недопустимый ток. Диод VD2, включенный параллельно выходному каскаду ключа ТК, служит для создания пути тока нагрузки в ШИП.

При проектировании ШИП широко используются ненасыщенные силовые транзисторные ключи, охваченные нелинейной обратной связью [29], и тиристорные ключи, содержащие специальные схемы выключения [30].

Упрощенная принципиальная схема ШИП на транзисторах (рис.6.4) содержит четыре транзисторных ключа ТК1-ТК4, образующих мост. В диагональ моста включена либо цепь якоря двигателя, либо обмотка возбуждения. Питание ШИП осуществляется от источника постоянного напряжения, шунтированного конденсатором большой емкости С.

Наиболее простым способом управления ШИП является симметричный (см.рис.6.2,а). При таком способе управления в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа моста, а напряжение на выходе ШИП представ-

ляет собой знакопеременные импульсы, длительность которых регулируется входным сигналом. В ШИП с симметричным управлением среднее напряжение $U_{\text{я}}$ на выходе равно нулю, когда относительная продолжительность включения $\gamma = 0.5$. Симметричный закон управления обычно используют в маломощных приводах постоянного тока, его преимуществом является простота реализации и отсутствие зоны нечувствительности в регулировочной характеристике. Недостатком такого ШИП является разнополярное напряжение на нагрузке и, в связи с этим, повышенные пульсации тока в обмотке якоря исполнительного двигателя.

При несимметричном управлении (см.рис.6.2,б) переключаются транзисторные ключи ТК3 и ТК4 (ключи ТК1 и ТК2 при противоположной полярности сигнала управления), транзисторный ключ ТК1 постоянно открыт, а ключ ТК2 постоянно заперт. Транзисторные ключи ТК3 и ТК4 переключаются в противофазе, обеспечивая протекание тока от источника питания и противоЭДС двигателя. При этом на выходе ШИП формируются знакопостоянные импульсы, а среднее напряжение $U_{\text{я}}$ равно нулю, когда относительная продолжительность включения транзисторных ключей $\gamma = 0$. Недостатком такого закона управления является то, что верхние по схеме транзисторные ключи ТК1, ТК3 по току загружены больше, чем нижние.

Указанный недостаток устранен при управлении, когда при любом знаке входного сигнала в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа, однако, частота переключения каждого из них в два раза меньше, чем частота напряжения на выходе ШИП. Управляющие напряжения транзисторных ключей одной фазы моста ТК1, ТК2 и ТК3, ТК4 постоянно находятся в противофазе, при этом ключи переключаются через период выходного напряжения T . Этим достигаются одинаковые условия работы транзисторов в мостовой схеме.

При некотором входном сигнале управляющие импульсы U_{y1}, U_{y4} длительностью $t=(1+\gamma)T$ подаются на диагонально расположенные транзисторные ключи со сдвигом на половину периода, а управляющие импульсы U_{y2}, U_{y3} длительностью $t=(1-\gamma)T$ также со сдвигом на половину периода подаются на транзисторы противоположной диагонали. В этом случае на интервале T нагрузка подключена к источнику питания с помощью диагонально расположенных ключей, а на интервале $(1-\gamma)T$ нагрузка закорочена с помощью верхних или нижних транзисторных ключей. При изменении знака входного сигнала порядок управления диагональными ключами изменяется на противоположный. При поочередном управлении на нагрузке формируются знакопостоянные импульсы длительностью T , пропорциональные сигналу на входе.

2. Электромагнитные процессы в широтно-импульсном преобразователе

Основным вариантом реверсивного ШИП с выходом на постоянном токе является мостовая схема (см.рис.6.4), выполненная на четырех транзисторных ключах ТК1-ТК4, шунтированных диодами VD1...VD4. Каждый транзисторный ключ кроме выходных транзисторов содержит предвыходной каскад, блок защиты и управления (см.рис.6.3). Все эти устройства не загружаются силовым током, протекающим через выходные транзисторы, и включенные встречно-параллельно им диоды.

Проанализируем работу ШИП при симметричном управлении (см.рис.6.2,а). Электромагнитные процессы в нагрузке (якоре двигателя постоянного тока) при симметричном управлении транзисторными ключами ШИП изображены на рис.6.5. За период коммутации T здесь последовательно образуются четыре интервала 1-4, на каждом из которых ток протекает через обозначенные на рис.6.4 полупроводниковые приборы ШИП.



Рис. 6.5. Электромагнитные процессы в нагрузке ШИП при симметричной нагрузке



Рис. 6.6. Электромагнитные процессы в нагрузке ШИП при несимметричном и поочерёдном управлении. Силовые полупроводниковые приборы, работающие при несимметричном управлении, указаны над осью t , а при поочерёдном - под осью t

На рис. 6.6 приведен наиболее общий случай знакопеременного тока нагрузки. Если ток нагрузки знакопостоянен, то интервал 4, на котором ток нагрузки протекает через транзисторные ключи ТК1, ТК4, отсутствует.

Электромагнитные процессы в нагрузке описываются следующими дифференциальными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_n &= r_{\text{я}} \cdot i_{\text{я}} + L_{\text{я}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + E \dots \text{при} \dots 0 < t < T \cdot \gamma \\ -U_n &= r_{\text{я}} \cdot i_{\text{я}} + L_{\text{я}} \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} + E \dots \text{при} \dots \gamma \cdot T < t < T \end{aligned} \right\} \quad (6.1)$$

Решения этих уравнений в относительных единицах имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{i}_{\text{я}} &= 1 - \bar{\Omega} + \frac{2 \cdot (a_1^2 \cdot b_1^{-1} - 1)}{1 - a_1^2} \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{\tau_n}\right)} \dots \text{при} \dots 0 < \tau < \gamma \\ \bar{i}_{\text{я}} &= -1 - \bar{\Omega} - \frac{2 \cdot (b_1 - 1)}{1 - a_1^2} \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{\tau_n}\right)} \dots \text{при} \dots \gamma < \tau < 1 \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

где $a_1 = e^{-\left(\frac{1}{2 \cdot \tau_H}\right)}$; $b_1 = e^{\left(\frac{\gamma}{\tau_H}\right)}$; $\tau = \frac{t}{T}$ – относительное время; $\tau_H = \frac{L_{\text{я}}}{r_{\text{я}} \cdot T}$ – относительная постоянная времени; $\bar{i}_{\text{я}} = \frac{i_{\text{я}}}{I_k}$ – относительный ток якоря; $\bar{\Omega} = \frac{E}{U_n} = \frac{k \cdot \Omega}{U_n}$ – относительная скорость двигателя; $I_k = \frac{U_n}{r_{\text{я}}}$ – ток короткого замыкания двигателя; T – период коммутации; $\gamma = \frac{t_1}{T}$ – относительная длительность включения.

Максимальный ток в транзисторе и диоде выходного каскада ключа ТК может быть найден из (6.2) при $\tau = \gamma$:

$$\bar{I}_{\text{макс}} = 1 - \bar{\Omega} + \frac{2 \cdot (a_1^2 \cdot b_1^2 - 1)}{1 - a_1^2} \cdot e^{-\left(\frac{\gamma}{\tau_H}\right)} \quad (6.3)$$

При симметричном управлении переключаются все транзисторные ключи моста (см. рис. 6.4). В этом случае состав силовой цепи на всех интервалах неизменен, изменяется лишь полярность источника питания в цепи нагрузки.

Симметричный способ управления реализуется с помощью достаточно простых схем. Его несомненным преимуществом является отсутствие зоны нечувствительности и линейность регулировочной характеристики. Напряжение на нагрузке в этом случае $U_{\text{я}} = U_n \cdot (2 \cdot \gamma - 1)$, а токи в полупроводниковых приборах и нагрузке ШИП определяются формулами [28]:

средний ток транзистора

$$\bar{I}_{T_{cp}} = (1 - \bar{\Omega}) \cdot \gamma - 2 \cdot \tau_H \cdot \frac{(a_1^2 \cdot b_1^{-1} - 1) \cdot (b_1 - 1)}{1 - a_1^2};$$

действующий ток транзистора

$$\bar{I}_T = \sqrt{(1 - \bar{\Omega})^2 \cdot \gamma - 4 \cdot (1 - \bar{\Omega}) \cdot \tau_H \cdot \frac{(a_1^2 \cdot b_1^{-1} - 1)}{1 - a_1^2} - 2 \cdot \tau_H \cdot \frac{(a_1^2 \cdot b_1^{-1} - 1) \cdot (b_1^2 - 1)}{(1 - a_1^2)^2}};$$

средний ток шунтирующего диода

$$\bar{I}_{d_{cp}} = - \left[(1 - \bar{\Omega}) \cdot (1 - \gamma) - 2 \cdot \tau_H \cdot \frac{(a_1^2 \cdot b_1^{-1} - 1) \cdot (b_1 - 1)}{1 - a_1^2} \right];$$

действующий ток диода

$$\bar{I}_D = \sqrt{(1 + \bar{\Omega}) \cdot (1 - \gamma) - 4 \cdot (1 + \bar{\Omega}) \cdot \tau_H \cdot \frac{(b_1 - 1) \cdot (a_1^2 \cdot b_1^{-1} - 1)}{1 - a_1^2} - 2 \cdot \tau_H \cdot \frac{(a_1^4 \cdot b_1^2 - 1) \cdot (1 - b_1)}{(1 - a_1^2)^2}};$$

средний ток нагрузки

$$\bar{I}_{ясп} = 2 \cdot \gamma - \bar{\Omega} - 1;$$

действующий ток нагрузки

$$\bar{I}_я = \sqrt{\left(1 + \bar{\Omega}\right)^2 - 4 \cdot \bar{\Omega} \cdot \gamma + 4 \cdot \tau_H \cdot \frac{(b_1 - 1) \cdot (a_1^2 \cdot b_1^{-1} - 1)}{1 - a_1^2}}.$$

Недостатком ШИП с симметричным управлением являются пульсации тока в выходной цепи. Этот недостаток исключается при несимметричном и поочередном способах управления ШИП.

При несимметричном управлении переключаются лишь два транзисторных ключа, расположенные на одной стороне моста, (см.рис.6.2,б, рис.6,4): ТК3, ТК4 (или ТК1, ТК2 при обратной полярности входного сигнала).

Второй верхний на схеме транзисторный ключ ТК1 постоянно насыщен, а нижний ключ ТК2 заперт. При этом на выходе ШИП формируются знакопостоянные импульсы напряжения и положению равновесия в системе соответствует относительная продолжительность включения одного из нижних транзисторных ключей, когда $\gamma = 0$.

Временные диаграммы электромагнитных процессов в нагрузке ШИП при несимметричном управлении приведены на рис.6.6. Здесь в течение периода коммутации T последовательно образуются четыре интервала; полупроводниковые приборы, через которые протекает ток якоря на этих интервалах, указаны в верхней части (рис.6.6). Электромагнитные процессы в нагрузке в течение импульса (γT) и паузы $(1 - \gamma)T$ описываются уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_n &= r_{я} \cdot i_{я} + L_{я} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + E_{...} n p u_{...} \dots 0 < t < T\gamma \\ 0 &= r_{я} \cdot i_{я} + L_{я} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + E_{...} n p u_{...} \dots \gamma \cdot T < t < T \end{aligned} \right\} \quad (6.4)$$

Мгновенные значения токов для первого и второго интервалов периода находятся из решения уравнений (6.4) и могут быть определены по [28,29]:

$$\begin{aligned} \bar{i}_{я} &= 1 - \frac{1 - a_1^2 \cdot b_1^{-1}}{1 - a_1^2} \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{\tau_H}\right)} - \bar{\Omega}_{...} n p u_{...} \dots 0 < \tau < \gamma, \\ \bar{i}_{я} &= \frac{1 - b_1}{1 - a_1^2} \cdot e^{-\left(\frac{\tau}{\tau_H}\right)} - \bar{\Omega}_{...} n p u_{...} \dots \gamma < \tau < 1. \end{aligned}$$

Средние и действующие токи в транзисторах и диодах выходного каскада ключа ТК и в нагрузке:

средний ток транзисторных ключей ТК2 и ТК4

$$\bar{I}_{TK2,4.cp} = \gamma - \bar{\Omega} \cdot \gamma + \tau_n \frac{(a_1^2 \cdot b_1^{-1} - 1) \cdot (1 - b_1)}{1 - a_1^2};$$

действующий ток транзисторных ключей ТК2 и ТК4

$$\bar{I}_{TK2,4} = \sqrt{(1 - \bar{\Omega})^2 \cdot \gamma + 2 \cdot \tau_n \cdot (1 - \bar{\Omega}) \cdot \frac{(1 - a_1^2 \cdot b_1^{-1}) \cdot (b_1 - 1)}{(1 - a_1)^2} - \frac{\tau_n}{2} \cdot \frac{(1 - a_1^2 \cdot b_1^{-1}) \cdot (b_1^2 - 1)}{(1 - a_1^2)^2}};$$

средний ток диодов

$$\bar{I}_{d.cp} = -\bar{\Omega} \cdot (1 - \gamma) - \tau_n \cdot \frac{(a_1^2 \cdot b_1^{-1} - 1) \cdot (1 - b_1)}{1 - a_1^2};$$

действующий ток диодов

$$\bar{I}_d = \sqrt{(1 - \gamma) \cdot \bar{\Omega}^2 + 2 \cdot \tau_n \cdot \frac{\bar{\Omega} \cdot (a_1^2 \cdot b_1^{-1} - 1) \cdot (1 - b_1)}{(1 - a_1)^2} - \frac{\tau_n}{2} \cdot \frac{(a_1^4 \cdot b_1^{-2} - 1) \cdot (1 - b_1)^2}{(1 - a_1^2)^2}};$$

средний ток нагрузки

$$\bar{I}_{яcp} = \gamma - \bar{\Omega};$$

действующий ток нагрузки

$$\bar{I}_я = \sqrt{\gamma - 2\bar{\Omega}\gamma + \bar{\Omega}^2 - \tau_n \cdot \frac{(1 - a_1^2 \cdot b_1^{-1}) \cdot (1 - b_1)}{1 - a_1^2}}. \quad (6.7)$$

Из уравнения (6.5) при $\tau = \gamma$ определяется максимальный ток транзистора и диода выходного каскада транзисторного ключа

$$\bar{I}_{макс} = 1 - \frac{a_1^2 \cdot b_1^{-1}}{1 - a_1^2} \cdot e^{-\left(\frac{\gamma}{\tau_n}\right)} - \bar{\Omega}. \quad (6.8)$$

При несимметричном управлении ШИП напряжение на якоре двигателя постоянного тока $U_я = \gamma \cdot U_n$.

При поочередном способе управления ШИП в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа, но частота переключения каждого ключа вдвое меньше частоты коммутации тока в нагрузке (см.рис.6.6). Управляющие

напряжения транзисторных ключей ТК1, ТК2 и ТК3, ТК4 постоянно находятся в противофазе; при этом транзисторные ключи одной фазной группы переключаются через период T . Этим достигаются одинаковые условия работы полупроводниковых приборов ШИП.

Электромагнитные процессы в нагрузке при поочередном управлении такие же, как при несимметричном управлении. На интервале T нагрузка включена в цепь источника питания через диагонально расположенные транзисторные ключи ТК1, ТК4, а на интервале $(1-\gamma)T$ она закорочена с помощью верхних или нижних ключей, так как транзисторные ключи ТК1 и ТК4 запираются поочередно через период T . Последовательность образования коммутационных интервалов в течение времени $2T$ и полупроводниковые приборы, проводящие ток на этих интервалах, указаны в нижней части (см.рис.6.6). При поочередном управлении на нагрузке также формируются знакопостоянные импульсы напряжения продолжительностью $\gamma \cdot T$.

Средние токи в транзисторных ключах при поочередном управлении определяются как полусумма тока ТК2 (ТК4) и тока нагрузки, а действующие токи равны сумме действующего тока ТК2 (ТК4) и тока нагрузки, разделенной на $\sqrt{2}$. Средние токи диодов при поочередном управлении вдвое меньше средних токов диодов при несимметричном управлении, а действующие токи меньше в $\sqrt{2}$ раз. Максимальные токи в транзисторных ключах и диодах находятся из уравнения (6.8) и формируют исходные данные для выбора СПП с соответствующими характеристиками.

3. Механические характеристики разомкнутой и замкнутой систем ШИП – ДПТ

Уравнения механических характеристик электроприводов ШИП – двигатель, полученные на основании уравнений для средних напряжений на якоре двигателя, имеют вид:

а) для несимметричного и поочередного управления с однополярными импульсами выходного напряжения $\gamma_0 = 0$ [30]:

$$\bar{\Omega} = \gamma - \bar{I}_я; \quad (6.9)$$

б) для симметричного управления со знакопеременными импульсами выходного напряжения ($\gamma_0 = 0,5$)

$$\bar{\Omega} = (2\gamma - 1) - \bar{I}_я. \quad (6.10)$$

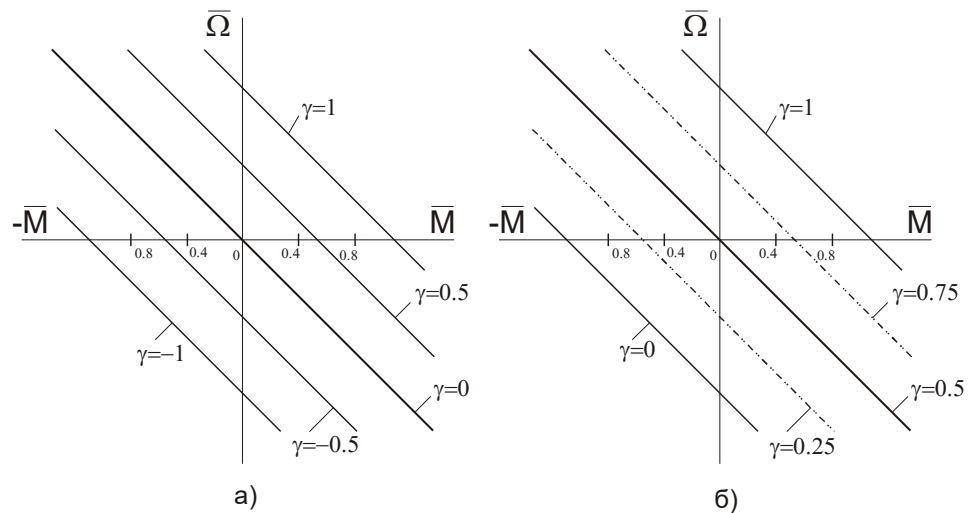


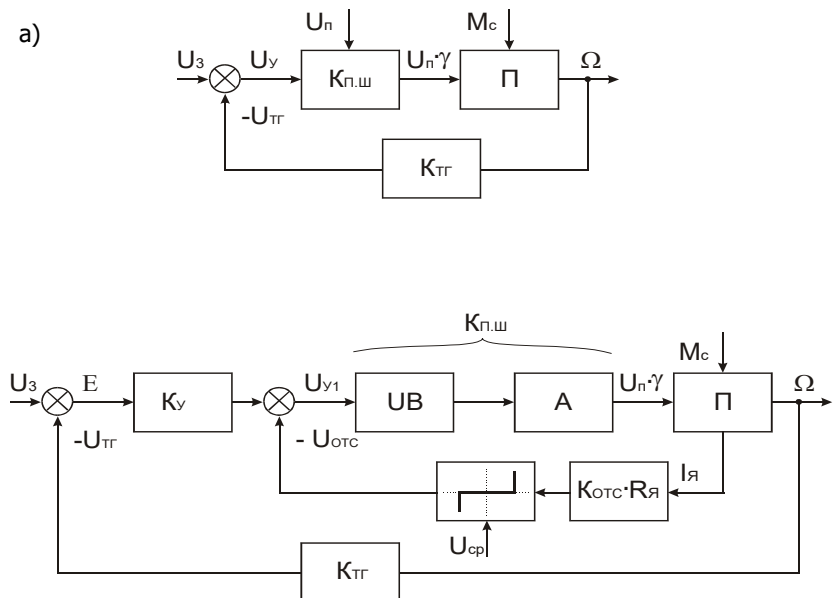
Рис. 6.7. Механические характеристики системы ШИП-ДПТ при несимметричном и поочерёдном (а) и симметричном (б) управлении

Как следует из (6.9) и (6.10), механические характеристики разомкнутой системы ШИП – двигатель постоянного тока (рис.6.7) представляют собой семейство прямых с постоянным углом наклона к оси абсцисс, пересекающих ось ординат при $\bar{\Omega} = \gamma$ (при несимметричном и поочерёдном управлении с $\gamma_0=0$) или при $\bar{\Omega} = 2\gamma-1$ (при симметричном управлении с $\gamma_0=0,5$).

Электромеханический модуль МС, построенный по схеме ШИП-ДП, обычно работает в замкнутой системе автоматического управления с обратными связями по угловой скорости Ω и току якоря $I_{\text{я}}$ двигателя. Скорость двигателя в разомкнутой системе регулируют изменением скважности γ коммутирующего напряжения на зажимах якоря в соответствии с выражением:

$$\Omega = \frac{U_{\text{п}} \cdot \gamma \cdot I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}\Sigma}}{C}, \quad (6.11)$$

где $R_{\text{я}\Sigma}$ - суммарное сопротивление якорной цепи; C – конструктивный коэффициент двигателя равный $C_e \cdot \Phi$; γ - скважность импульсов.



б)

Рис. 6.8. Структурные схемы электромеханического модуля с ШИП:

а – упрощённая, б – развёрнутая; П – транзисторный (тиристорный) преобразователь – двигатель; UB – широтно-импульсный модулятор; А – усилитель мощности на транзисторах (тиристорах);

На рис. 6.8 приведены упрощённая и развёрнутая структурные схемы электромеханического модуля с ШИП для замкнутой системы.

Известно [30], что механические характеристики разомкнутой системы ШИП-Д имеют зоны прерывистого и непрерывного токов. Переход от непрерывного тока к прерывистому сопровождается изменением наклона характеристик в координатах Ω , М (или Ω , $I_{\text{я}}$) приграничном значении тока цепи якоря. Уравнение электромеханической характеристики разомкнутой системы в зоне непрерывных токов можно записать в виде

$$\Omega = \frac{U_{\text{п}} \cdot \gamma}{C} - \frac{I_{\text{я}} \cdot U_{\text{п}}}{C \cdot I_{\text{к}}} , \quad (6.12)$$

где $I_{\text{к}}$ – ток короткого замыкания двигателя равный $U_{\text{п}}/R_{\text{я}\Sigma}$; $R_{\text{я}\Sigma}$ - суммарное сопротивление якорной цепи

$$R_{\text{я}\Sigma} = r_{\text{я}} + r_{\text{дп}} + R_{\text{др}} + 2R_{\text{т}} , \quad (6.13)$$

где $r_{\text{я}}$ – сопротивление обмоток якоря; $r_{\text{дп}}$ – сопротивление обмотки дополнительных полюсов; $R_{\text{др}}$ – сопротивление сглаживающего дросселя; $R_{\text{т}}$ – сопротивление перехода эмиттер-коллектор транзистора (или тиристора).

В зоне прерывистых токов уравнение электромеханической характеристики приближённое и запишется как

$$\Omega \approx \frac{U_{\Pi}}{C} - \frac{I_{\text{я}} \cdot U_{\Pi}}{C \cdot I'_{\text{к}} \cdot \gamma}, \quad (6.14)$$

где $I'_{\text{к}}$ – приведённый ток короткого замыкания, $I'_{\text{к}} = 0.5 \cdot \frac{T}{T_{\text{я}}} \cdot I_{\text{к}}$; $T_{\text{я}}$ – постоянная времени якорной цепи.

Для вывода уравнений электромеханических характеристик замкнутой системы следует записать исходные уравнения для структурной схемы (рис. 6.8, а):

$$U_{\text{y}} = U_3 - U_{\text{тг}}, \quad (6.15)$$

$$U_{\text{y}} \cdot K_{\text{п.ш}} = U_{\Pi} \cdot \gamma. \quad (6.16)$$

Здесь $U_{\text{тг}} = K_{\text{тг}} \cdot \Omega$; $K_{\text{тг}}$ – передаточный коэффициент тахогенератора; $K_{\text{п.ш}}$ – коэффициент передачи широтно-импульсного преобразователя.

Широтно-импульсный преобразователь включает широтно-импульсный модулятор, преобразующий напряжение управления в скважность управляющих силовыми ключами импульсов, и транзисторные (тиристорные) импульсные усилители. ШИП имеет линейную характеристику управления при пилообразном опорном напряжении и вертикальном способе получения модулированных импульсов, т.е.

$$K_{\text{п.ш}} = \frac{E_{\text{д}}}{U_{\text{умакс}}} = \frac{U_{\Pi} \cdot \gamma_{\text{макс}}}{U_{\text{умакс}}}, \quad (6.17)$$

где $\gamma_{\text{макс}}$ – максимальная скважность управляющих импульсов ($\gamma_{\text{макс}} < 1$); $U_{\text{умакс}}$ – максимальное напряжения управления (до 5В).

Если при проектировании заданы: перепад скорости $\Delta\Omega_{\text{р}}$ при номинальной нагрузке и номинальном напряжении U_{Π} в разомкнутой системе и $\Delta\Omega_{\text{мин}}$ – перепад скорости при номинальной нагрузке нижней характеристики в замкнутой системе, определяемый из выражения $\Delta\Omega_{\text{мин}} = 0.1 \cdot \Delta\Omega_{\text{н}} / D$, то передаточный коэффициент по скорости можно определить по формуле

$$K_{\text{п.ш}} = \frac{\Delta\Omega_{\text{р}}}{\Delta\Omega_{\text{мин}}}. \quad (6.18)$$

При выводе выражения (6.18) приняты обозначения: D – диапазон регулирования скорости; $\Omega_{\text{н}}$ – номинальная угловая скорость двигателя. Решение уравнений (6.12), (6.15), (6.17) позволяет определить зависимость скорости двигателя от параметров структурной схемы в области непрерывных токов:

$$\Omega = \frac{U_3}{C/K_{п.ш} + K_{тг}} - \frac{I_{я} \cdot U_{п}}{I_{к} \cdot (C + K_{тг} \cdot K_{п.ш})}. \quad (6.19)$$

Для зоны прерывистых токов уравнение скорости двигателя в схеме с обратными связями можно получить, записав уравнения равновесия напряжений для суммирующего узла (рис. 6.8, а) в виде:

$$U_3 - K_{тг} \cdot \Omega = \frac{U_{п} \cdot \gamma}{K_{п.ш}}, \quad (6.20)$$

$$\gamma = \frac{I_{я} \cdot U_{п}}{I_{к} \cdot (U_{п} - C \cdot \Omega)}. \quad (6.21)$$

После подстановки (6.21) в (6.20) и выполнения преобразований можно представить уравнение для скорости двигателя структурной схемы электродвигателя с ШИП (рис 6.8, б) в виде:

$$\Omega \left[\Omega - \left(\frac{K_{тг} \cdot U_{п} + C \cdot U_3}{K_{тг} \cdot C} \right) \right] + \frac{U_3 \cdot U_{п}}{K_{тг} \cdot C} = \frac{U_{п} \cdot I_{я}}{K_{тг} \cdot K_{п.ш} \cdot C \cdot I_{к}}. \quad (6.22)$$

Если произвести подстановки вида [31]:

$$a = \frac{K_{тг} \cdot U_{п} + C U_3}{K_{тг} \cdot C}; \quad b = \frac{U_3 \cdot U_{п}}{K_{тг} \cdot C}; \quad \Pi = \frac{U_{п}}{K_{тг} \cdot K_{п.ш} \cdot C \cdot I_{к}},$$

то уравнение (6.22) можно записать

$$\Omega^2 - \Omega \cdot a + b = \Pi \cdot I_{я}. \quad (6.23)$$

Преобразование уравнения (6.23) в уравнение параболы [32]:

$$\left(\Omega - \frac{a}{2} \right)^2 = \Pi \left[I_{я} + \frac{\frac{a^2}{4} - b}{\Pi} \right] \quad (6.24)$$

позволяет определить координаты вершин параболы в точке

$$I_{я} = \frac{a^2 - 4b}{4\Pi}; \quad \Omega = a/2,$$

а ось параболы проходит параллельно оси абсцисс.

Для структурной схемы замкнутой системы (рис. 6.8, б) можно записать уравнения:

$$U_y = (U_3 - U_{тг}) \cdot K_y; \quad U_{y1} = U_y - U_{отс} \quad U_{y1} \cdot K_{п.ш} = U_{п} \cdot \gamma, \quad (6.25)$$

где K_y – коэффициент усиления операционного усилителя; $U_{отс} = I_{я} \cdot R_{ш} \cdot K_{отс} - U_{\phi}$

- напряжение на входе узла токоограничения; $U_{ср}$ – напряжение сравнения; $R_{ш}$

– сопротивление шунта в цепи якоря.

Совместное решение уравнений (6.25) с уравнением (6.12) позволяет определить уравнение электромеханической характеристики замкнутой системы в режиме токовой отсечки в виде

$$\Omega = \frac{U_3}{C/K - K_{\text{ПТ}}} - \frac{(I_{\text{я}} \cdot R_{\text{Ш}} \cdot K_{\text{ОТС}} - U_{\text{ср}}) \cdot K_{\text{П.Ш}}}{C + K_{\text{ПТ}} \cdot K_{\text{П.Ш}}} - \frac{I_{\text{я}} \cdot U_{\text{П}}}{I_{\text{к}}(C + K_{\text{П.Ш}} \cdot K_{\text{ПТ}})}, \quad (6.26)$$

где коэффициент токовой отсечки определяется по формуле:

$$K_{\text{ОТС}} = \frac{U_{\text{Умакс}} - U_{\text{Умин}}}{(I_{\text{я.СТ}} - I_{\text{я.ОТС}}) \cdot R_{\text{Ш}}}. \quad (6.27)$$

где $U_{\text{Умакс}}$ – максимальное напряжение на выходе операционного усилителя; $I_{\text{я.СТ}}$ – ток стопорения; $I_{\text{я.ОТС}}$ – расчётный ток отсечки якоря; $U_{\text{Умин}}$ – минимальное напряжение на выходе операционного усилителя с учётом зон нечувствительности в характеристиках ШИП, определяется по формуле

$$U_{\text{Умин}} = \frac{I_{\text{я}} \cdot R_{\text{ЯΣ}}}{K_{\text{П.Ш}}} + S, \quad (6.28)$$

где S – зона нечувствительности широтно-импульсного преобразователя в режиме несимметричного и поочерёдного управления, принимается в диапазоне 0,5-0,7В.

3.2. Энергетические характеристики в системе ШИП–ДПТ

Потери мощности в якоре двигателя постоянного тока при симметричном управлении ШИП ($\gamma_0 = 0,5$) определяются по формуле [28]:

$$\Delta P_{\text{я}} = r_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2 + 4 \cdot r_{\text{я}} \cdot I_{\text{к}}^2 \cdot [\gamma \cdot (1-\gamma) - \tau_{\text{н}} \cdot K_{\text{П}}] = r_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2 \cdot (1 + 4 \cdot \alpha_{\text{к}} \cdot \alpha_{\text{р}}). \quad (6.29)$$

При несимметричном и поочередном управлении ($\gamma_0 = 0$) потери составят:

$$\Delta P_{\text{я}} = r_{\text{я}} \cdot I_{\text{П}}^2 + 4 \cdot r_{\text{я}} \cdot I_{\text{к}}^2 \cdot [\gamma \cdot (1-\gamma) - \tau_{\text{н}} \cdot K_{\text{П}}] = r_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2 \cdot (1 + \alpha_{\text{к}} \cdot \alpha_{\text{р}}), \quad (6.30)$$

$$K_{\text{П}} = \frac{(1 - e^{-\left(\frac{\gamma}{\tau_{\text{н}}}\right)}) \cdot [1 - e^{-(1-\gamma) \cdot \tau_{\text{н}}}]}{1 - e^{-\left(\frac{1}{\tau_{\text{н}}}\right)}}$$

где $K_{\text{П}}$ – коэффициент пульсаций тока якоря

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{я}}}; \quad \alpha_{\text{р}} = \gamma \cdot (1-\gamma) - \tau_{\text{н}} \cdot K_{\text{П}}.$$

Потери мощности в цепи якоря двигателя представляют собой сумму основной составляющей $r_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2$, соответствующей питанию двигателя от источника постоянного напряжения, и дополнительной, обусловленной пульсациями тока в цепи якоря;

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{я}\partial} &= r_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2 \cdot \alpha_k \cdot \alpha_p & \text{при } \gamma_0 = 0 \\ \Delta P_{\text{я}\partial} &= 4 \cdot r_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2 \cdot \alpha_k \cdot \alpha_p & \text{при } \gamma_0 = 0,5 \end{aligned} \quad (6.31)$$

В относительных единицах дополнительные потери $\Delta \bar{P}_{\text{я}\partial}$ определяются выражениями [29, 30]:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{P}_{\text{я}\partial} &= \frac{\Delta P_{\text{я}\partial}}{U_{\text{II}} \cdot I_{\text{я}}} = \alpha_k \cdot \alpha_p & \text{при } \gamma_0 = 0 \\ \Delta \bar{P}_{\text{я}\partial} &= 4 \cdot \alpha_k \cdot \alpha_p & \text{при } \gamma_0 = 0,5 \end{aligned} \quad (6.32)$$

Относительные дополнительные потери в двигателе являются функцией коэффициента α_p , который в свою очередь зависит от γ , τ_n , K_p .

Зависимости (6.32) имеют максимум при $\gamma_0 = 0,5$ [28]:

$$(\Delta \bar{P}_{\text{я}\partial})_{\gamma=0.5} = \alpha_K (0.25 - K_{\text{II}} \cdot 0.5 \cdot \tau_n) \quad (6.33)$$

Основными составляющими потерь в силовых транзисторах ШИП являются потери на переключение $P_{\text{пер}}$ и потери в насыщенном состоянии $P_{\text{нас}}$ [30]:

$$P_{\text{TP}} = P_{\text{пер}} + P_{\text{нас}} = K_{\alpha} \cdot I_{\text{я}} \cdot U_{\text{II}} \cdot f \cdot \frac{t_+ + t_-}{2} + I^2 \cdot r_{\text{TP}} \quad (6.34)$$

где

$$K_{\alpha} = 1 + \alpha_k \cdot \left(\frac{1 - b_1^{-1}}{1 - e^{-\left(\frac{1}{\tau_n}\right)}} - \gamma \right) = 1 + \alpha_k \cdot k'_{\alpha} \quad \text{и} \quad K_{\alpha} = 1 + 2 \cdot \alpha_k \cdot k'_{\alpha}$$

для систем с $\gamma_0 = 0,5$; r_T – динамическое сопротивление транзистора в режиме насыщения; t_+ , t_- – время нарастания и время спада тока коллектора.

Значение K_{α}' максимально при

$$\gamma = \gamma_{\max} = \tau_n \cdot \ln \left(\frac{1}{\tau_n \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{1}{\tau_n} \right)} \right)} \right)$$

Приближенно можно считать, что при $0 < \tau_n^{-1} < 1$ имеем $\gamma_{\max} = 0,5$. Если $\tau_n^{-1} > 1$, то максимум сдвигается в область меньших значений γ .

Зависимость $K_{\alpha, \max} = F(\tau_n^{-1})$ в области $\tau_n^{-1} < 3$ описывается линейным уравнением:

$$K'_{\alpha, \max} = 0,116 \cdot \alpha_k / \tau_n, \quad (6.35)$$

при этом

$$\left. \begin{aligned} K_{\alpha} &= 1 + 0,116 \cdot \alpha_k / \tau_n, \\ K_a &= 1 + 0,232 \cdot \alpha_k / \tau_n, \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{если } \gamma_0 = 0 \\ &\text{если } \gamma_0 = 0,5 \end{aligned} \quad (6.36)$$

В современных электроприводах МС частота коммутации ШИП выбирается достаточно высокой (до нескольких кГц); при этом всегда удовлетворяется неравенство $\tau_n^{-1} < 1$. Тогда действующий ток транзистора определяется в основном моментом на валу двигателя, а ухудшение механических характеристик системы ШИП – ДПТ из-за импульсного характера питания обусловлено дополнительными потерями в меди якоря двигателя и потерями на переключение в силовых транзисторах. Эти обстоятельства позволяют определить оптимальную частоту коммутации в ШИП.

Суммарные дополнительные потери в системе ШИП – ДПТ в относительных единицах определяют [29]:

$$\left. \begin{aligned} (\Delta \bar{P}_{\text{я}} + \bar{P}_{\text{пер}}) &\approx \frac{0,0045 \cdot \alpha_k}{\tau_n^2} + \frac{\tau_+ + \tau_-}{2 \cdot \tau_n} \cdot (\tau_n + 0,116 \cdot \alpha_k) \\ (\Delta \bar{P}_{\text{я}} + \bar{P}_{\text{пер}}) &= \frac{0,018 \cdot \alpha_k}{\tau_n^2} + \frac{\tau_+ + \tau_-}{2 \cdot \tau_n} \cdot (\tau_n + 0,232 \cdot \alpha_k) \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{при } \gamma_0 = 0 \\ &\text{при } \gamma_0 = 0,5 \end{aligned} \quad (6.37)$$

где $\tau_+ = \frac{t_+}{T}$; $\tau_- = \frac{t_-}{T}$ - относительное время нарастания и спада коллекторного тока выходного транзисторного ключа ТК.

Определение минимума дополнительных потерь в системе ШИП-ДПТ может быть выполнено из условия

$$\frac{\partial(\Delta \bar{P}_{\text{я0}} + \bar{P}_{\text{пер}})_{\gamma \approx 0.5}}{\partial(\tau_n^{-1})} = 0, \quad (6.38)$$

которое позволяет в первом приближении найти (в герцах) оптимальную частоту коммутации транзисторов в ШИП [28]:

$$f_{\text{opt}} = K_f \cdot \sqrt[3]{\frac{\alpha_k \cdot r_{\text{я}}^2}{L_{\text{я}}^2 \cdot (t_+ + t_-)}}, \quad (6.39)$$

где $k_f = 0.26$ для систем ШИП-ДПТ с $\gamma_0 = 0$ и $k_f = 0.332$ для систем ШИП-ДПТ с $\gamma_0 = 0.5$.

Целью расчета и проектирования транзисторного ШИП является выбор способа управления, типа транзисторов и диодов, определение токов и мощности рассеяния и оптимальной частоты коммутации транзисторов (тиристоров) ШИП.

При выборе способа управления необходимо исходить из требований, предъявляемых к регулировочным и энергетическим характеристикам электропривода. Симметричное управление ШИП позволяет получить линейные характеристики двигателя. Однако энергетические характеристики ШИП при этом способе управления ухудшены вследствие повышенных пульсаций тока в якоре и в СПП.

При несимметричном и поочередном управлении ШИП в регулировочной характеристике электропривода имеет место зона нечувствительности. Схемные способы уменьшения этой зоны ухудшают устойчивость электропривода.

Энергетические характеристики ШИП с несимметричным и поочередным управлением лучше, чем уШИП с симметричным управлением, так как пульсации тока здесь в два раза меньше.

Определение оптимальной частоты коммутации в ШИП представляет собой достаточно сложную и неоднозначную задачу. Ранее эта задача рассмотрена для случая, когда в качестве критерия принят минимум суммарных дополнительных потерь в двигателе и транзисторах – потерь, обусловленных пульсациями тока якоря.

При минимизации суммарных дополнительных потерь задача определения f остается достаточно сложной, так как расчет динамических потерь в транзисторах

чрезвычайно сложен. Уравнение позволяет определить f лишь в первом приближении. Значения t_+ , t_- , входящие в выражение потерь на переключение в транзисторах, зависят от коэффициента форсировок на включение $K_1 = h_{21E} \cdot I_{б.вк} / I_{макс}$ и выключение $K_2 = h_{21E} \cdot I_{б.выкл} / I_{макс}$ выходных транзисторов ключа ТК [18], от их типа и от параметров импульсов базового тока.

При прямоугольных импульсах базового тока значения t_+ , t_- могут быть приближенно определены выражениями:

$$\left. \begin{aligned} t_+ &\approx T_T \cdot \ln \left(\frac{h_{21E} \cdot I_{б.вк}}{h_{21E} \cdot I_{б.вк} - I_{макс}} \right) = T_T \cdot \ln \left(\frac{K_1}{K_1 - 1} \right), \\ t_- &= T_T \cdot \ln \left(\frac{h_{21E} \cdot I_{б.выкл} + I_{макс}}{h_{21E} \cdot I_{б.выкл}} \right) = T_T \cdot \ln \left(\frac{K_2 + 1}{K_2} \right), \end{aligned} \right\} (6.40)$$

где T_T – постоянная времени транзистора, с; h_{21E} – коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером; $I_{б.вк}$ – максимальный включающий ток базы, А; $I_{б.выкл}$ – максимальный выключающий ток базы, А; $I_{макс}$ – максимальный коллекторный ток в транзисторе, определяемый нагрузкой, А.

Расчет токов в выходных транзисторах (тиристорах) ключей и диодах коммутирующих узлов ШИП производится с помощью приведённых зависимостей, а результаты расчётов сопоставляются с паспортными данными СПП, где обычно приводится допустимая рассеиваемая их мощность как с радиатором, так и без него. Поэтому определение мощности, рассеиваемой транзистором и диодом, может рассматриваться как конечный результат расчета. В справочных данных дается максимальная допустимая температура структуры и суммарное тепловое сопротивление R_T СПП с радиатором и без него. В этом случае для определения работоспособности диода предварительно определяется рассеиваемая мощность по формуле

$$P_D = U_O \cdot I_{д.ср} + R_D \cdot I_D^2, \quad (6.41)$$

где U_O , R_D – пороговое напряжение и динамическое сопротивление диода; $I_{д.ср}$, I_D – средний и действующий ток диода, А

Максимальная температура структуры P-N – перехода диода не должна превышать 140 – 160°C и находится по формуле:

$$\Theta_{PN} = P_D \cdot R_T + \Theta, \quad (6.42)$$

где Θ – температура окружающей среды обычно принимается при проектировании ЭММ не выше 50°C.

Аналогичные расчеты могут быть проведены и для транзисторов, если в качестве конечного результата принять максимальную допустимую температуру P-N – перехода структуры СПП.

Лекция

Тема 1.3.1. Современные мехатронные модули

ВОПРОСЫ

1. Моторы-редукторы и ММ вращательного движения на базе высокомоментных двигателей.
2. ММ линейного движения и ММ типа «двигатель-рабочий орган».
3. Интеллектуальные мехатронные модули движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с. 133-160).
2. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5 с. 26-46).

1. Моторы-редукторы и ММ вращательного движения на базе высокомоментных двигателей

Рассмотрим основные виды однокоординатных модулей движения, разработанных для решения задач автоматизированного машиностроения. Мехатронные модули движения (ММД) являются функциональными "кубиками", из которых затем можно компоновать сложные мехатронные системы, примеры которых рассматриваются далее.

Общая схема, поясняющая эволюцию развития мехатронных модулей движения от моторов-редукторов до перспективных интеллектуальных модулей, приведена на рис.3.1. Предлагаемая схема, несмотря на ее очевидную условность, разработана с целью систематизации известных ММД по составу и степени интеграции элементов.

7) Моторы-редукторы

Моторы- редукторы являются, по-видимому, исторически первыми по принципу своего построения мехатронными модулями, которые стали серийно выпускаться и нашли очень

Управление цифровых образовательных технологий

широкое применение в приводах различных машин и механизмов. Мотор-редуктор представляет собой компактный конструктивный модуль, объеди-

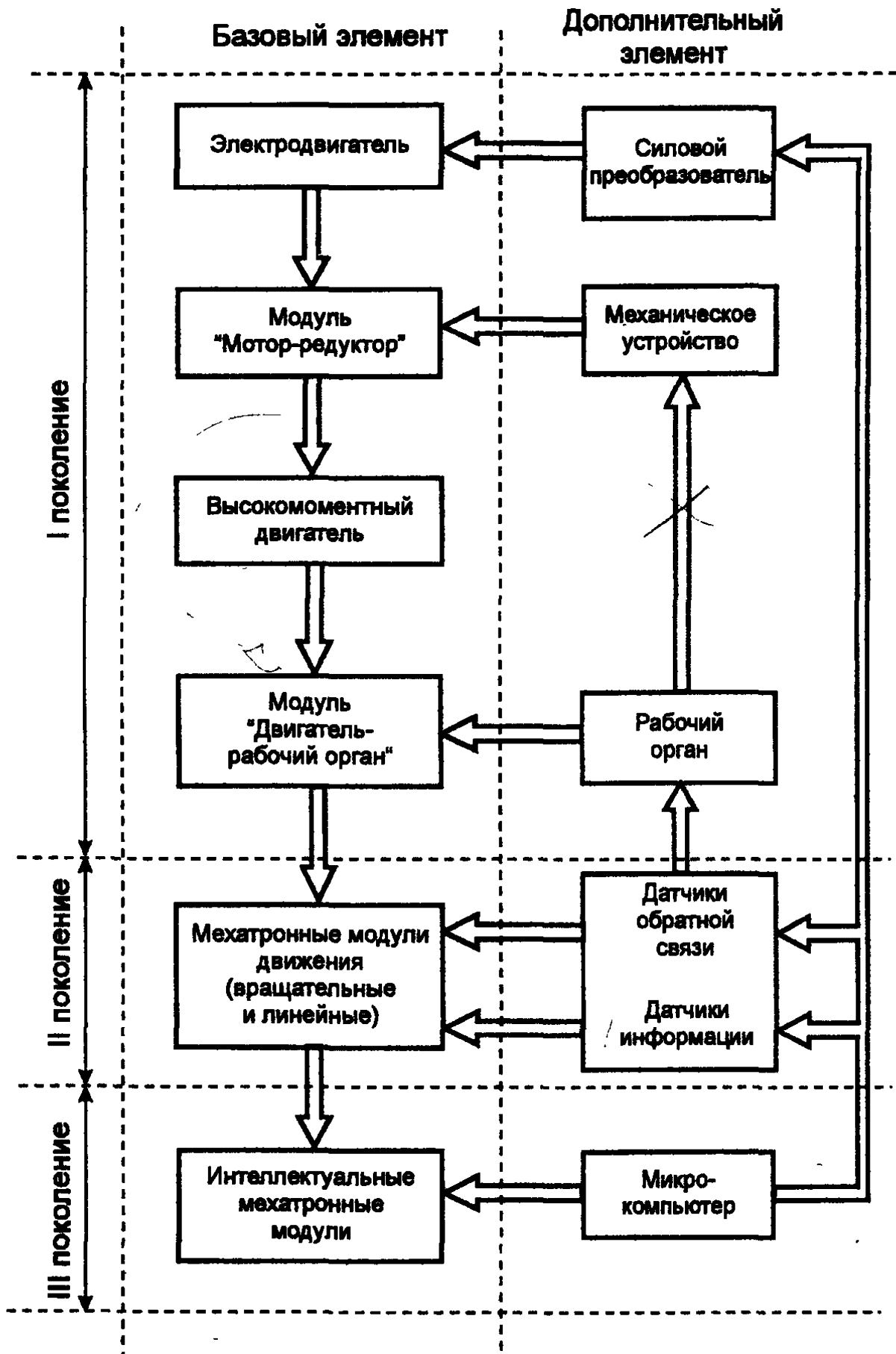


Рис. 3.1. Схема развития мехатронных модулей движения

няющий электродвигатель и редуктор. По сравнению с традиционным соединением двигателя и редуктора через муфту моторы- редукторы обладают целым рядом существенных преимуществ:

- сокращение габаритных размеров;
- снижение стоимости за счет сокращения количества присоединительных деталей, уменьшения затрат на установку, наладку и запуск изделия;
- улучшенные эксплуатационные свойства (пыле- и влагозащищенность, минимальный уровень вибраций, безопасность и надежность работы в неблагоприятных производственных условиях).

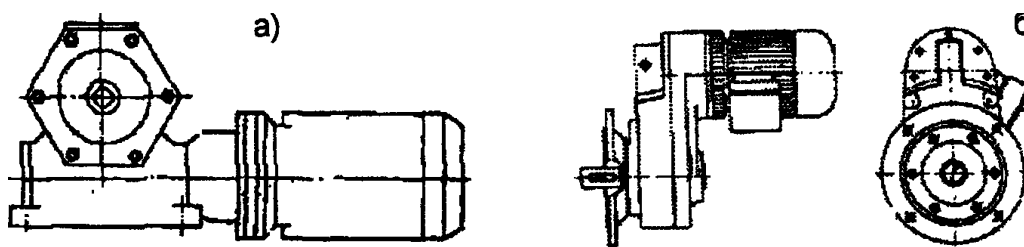
Конструктивное исполнение модуля определяется типами используемых редуктора и электродвигателя. В зависимости от технических требований задачи применяются цилиндрические, насадные, конические, червячные и другие виды редукторов. В качестве электродвигателей наиболее часто используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором и регулируемые преобразователи частоты вращения, однофазные двигатели и двигатели постоянного тока.

Общий вид одноступенчатого червячного мотора-редуктора (изготовитель АО "Завод Редуктор", С-Петербург) показан на рис.3.2,а. Редуктор выпускается для общемашиностроительного применения. Особенность конструкции состоит в том, что в ступице червячного колеса встроена предохранительная муфта, позволяющая ограничивать развиваемый крутящий момент.

Основные технические характеристики данного мотора-редуктора (типоразмер МРЧс-82): мощность электродвигателя - 0.27 кВт, номинальная скорость вращения выходного вала - 0.28 с⁴, максимальный момент на выходном валу - 50 Нм, передаточное число редуктора - 86, габаритные размеры модуля - 500 x 255 x 245 мм, масса модуля -

35 кг.

На рис.3.2,б показан насадной мотор-редуктор фирмы "Бауэр", который насаживается непосредственно на вал ведомого механического устройства и поэтому является быстро-съемным модулем. Блочно-модульный принцип конструирования позволяет комбинировать в модуле двигатели и редукторы различных типов и мощностей, обеспечивая таким образом широкий спектр механических характеристик модуля: по частоте вращения от 0.2 до 160 об/мин, по мощности от 0.015 до 75 кВт.



**Рис. 3.2. а) общий вид червячного мотора-редуктора;
б) общий вид насадного мотора-редуктора.**

Стоимостной анализ, проведенный фирмой "Бауэр" [28], показал, что применение моторов-редукторов рентабельно в машинах с низкой скоростью перемещения рабочего органа (особенно при частотах вращения ниже 500 1/мин).

Таким образом, потребитель приобретает и эксплуатирует мотор- редуктор как единый модуль, догадываясь о наличии в его составе зубчатых передач только из названия и при смене масла.

1.2. Мехатронные модули вращательного движения на базе высокомоментных двигателей

Следующим шагом в развитии приводной техники стало появление высокомоментных двигателей вращательного движения, применение которых позволило вообще исключить механический редуктор из состава электроприводов постоянного тока, работающих на низких скоростях.

Высокомоментными называются двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов и электронной коммутацией обмоток, которые допускают многократную перегрузку по моменту. Для определения положения полюсов на роторе вентильного ВМД устанавливают дополнительные технические средства (например, датчики Холла, индуктивные и фотоэлектрические датчики) [2, 17,19, 46]. Обычно высокомоментные двигатели (ВМД) устойчиво работают на частотах вращения ниже 500 1/мин, которые типичны для металлорежущих станков и промышленных роботов.

Основные преимущества ВМД определяются отсутствием в приводе редуктора:

- снижение материалоемкости, компактность и модульность конструкции;
- повышенные точностные характеристики привода благодаря отсутствию зазоров;
- исключение трения в механической трансмиссии позволяет существенно уменьшить погрешности позиционирования и нелинейные динамические эффекты на ползучих скоростях;
- повышение резонансной частоты.

ВМД выпускаются в настоящее время коллекторного и вентильного (иногда используется термин «бесщеточного», либо «бесконтактного») типов.

Управление цифровых образовательных технологий

Основные преимущества вентильных двигателей по сравнению с коллекторными:

- ❖ высокая надежность, большой срок службы, минимальные затраты на обслуживание (вследствие исключения искрения и износа щеток);
- ❖ улучшенные тепловые характеристики (так как тепло рассеивается на обмотках статора, а на роторе тепловыделяющие элементы отсутствуют), отсюда возможность использования проводов малого сечения;
- ❖ высокое быстродействие за счет высокого соотношения развиваемый момент/ момент инерции ротора;
- ❖ большая перегрузочная способность по моменту (типично $M_{\max}/M_{\min} = 8-10$) в широком диапазоне регулирования скорости;
- ❖ близкие к линейным механические и регулировочные характеристики.

По сравнению с синхронными двигателями вентильные ВМД позволяют регулировать скорость вращения с помощью обратной связи, частота вращения не зависит от напряжения питания, нет проблемы выпадения из синхронизма.

Основной недостаток вентильных двигателей - наличие дорогостоящих магнитов и блока управления коммутацией обмоток, отсюда пониженный показатель мощность/цена и повышенные габариты. В современных модификациях эта проблема решается путем построения этих блоков на базе относительно дешевых интегральных микросхем.

В табл.2 приведены технические характеристики отечественных бесконтактных двигателей серии ДБМ (разработчики и изготовители ЗЛО "Машиноаппарат" и ТОО "МЭЛ-МА", г. Москва) [2].

Таблица 2

Условное Обозначение	Наружн. диаметр статора, мм	Диаметр Ротора, мм	Осевая длина, мм	Число пар полу- сов	Частота вращения хол. хода, мин ⁻¹	Пуско- вой момент Нм
ДБМ40-0.01- -2.5 3	40	12	26	4	3900- 5400	0.02
ДБМ63-0.06- -3-2	63	28	28	8	2700- 3400	0.11
ДБМ105-0.4-0.75-3	105	60	37	8	720- 1000	0.25

В состав современных мехатронных модулей движения на основе ВМД обязательно входят также датчики обратной связи и иногда управляемые тормоза, что позволяет отнести такие ММД ко второму поколению (см.рис.3.1). В качестве датчиков наиболее часто применяются фотоимпульсные датчики (инкодеры), тахогенераторы, резольверы и

кодовые датчики положения. Принципиально важно, что модуль "двигатель-датчик" имеет единый вал, что позволяет сочетать высокие технические параметры и низкую стоимость. Конструктивная схема модуля "двигатель постоянного тока - встроенный тахогенератор", иллюстрирующая эту идею, приведена на рис.3.3.

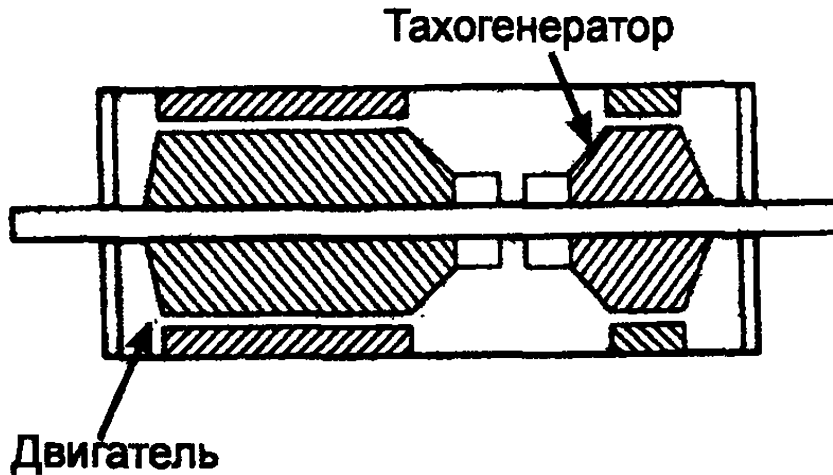


Рис. 3.3. Межатронный модуль «двигатель – тахогенератор».

На рис.3.4 показана конструкция межатронного модуля Dynaserv Motor, разработанного фирмой PARKER Corp. На базе высокомоментного двигателя [59]. В состав модуля входят: ротор двигателя, статор двигателя, подшипник, фотоимпульсный датчик. Вращающейся является внешняя часть модуля, которая базируется на опорных подшипниках. Модули комплектуются также электрическим кабелем.

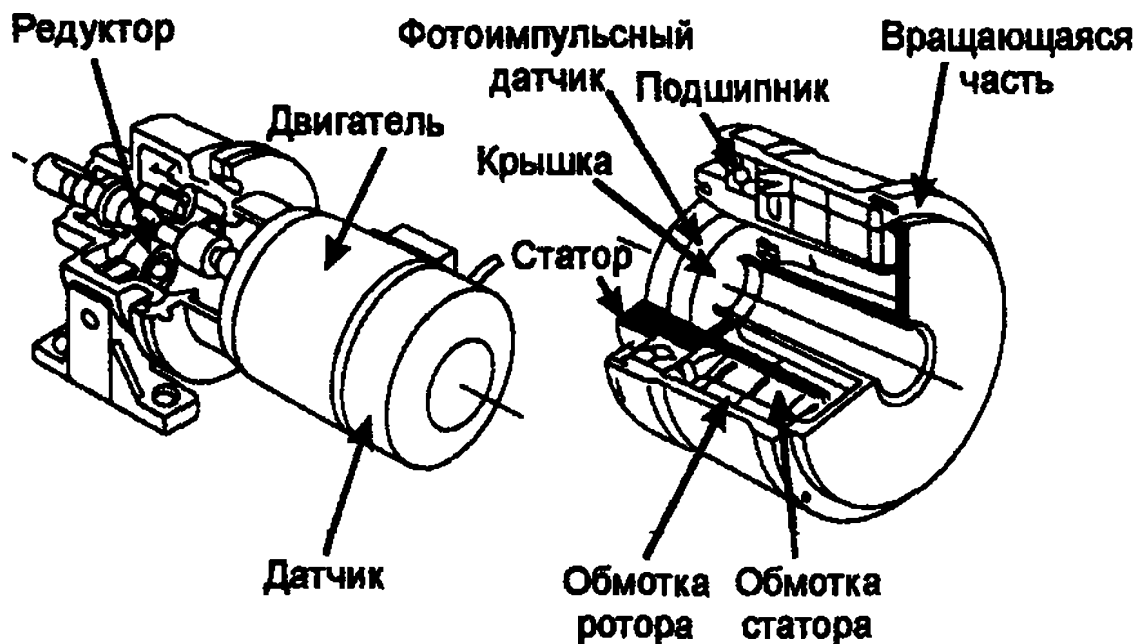


Рис. 3.4. Мехатронный модуль Dynaserv Motor

Основные технические характеристики мехатронных модулей Dynaserv Motor серии DM:

габаритные размеры модуля - длина до 295 мм, диаметр от 150 до 250 мм,
масса модуля - от 5.5 до 29 кг,

точность позиционирования - 0.0069 угл. Град,

электропитание - 115 В или 230 В (однофазное),

максимальный момент - до 200 Нм,

номинальная скорость - до 1 рад/с.

Перспективными являются также датчики скорости и положения, действующие без механического соединения с валом двигателя [46].

В нашей стране в рамках Государственной научно-технической программы "Технологии, машины и производства будущего" в 1997-99 годах создаются низкооборотные модули вращательного движения с моментом до 2500 Нм, максимальной скоростью до 800 об/мин для поворотных столов станков, измерительных машин, роботов и многоцелевых инструментальных головок [24].

Также модули данного типа могут применяться в нетрадиционных транспортных средствах: электромобилях, электровелосипедах, инвалидных колясках и т.п.

Мехатронные модули линейного движения

Рассмотренный мехатронный подход к построению модулей вращательного движения на базе высокомоментных двигателей получил в последние годы свое развитие и в модулях линейного перемещения. Цель проектирования аналогична : исключить механическую передачу из состава ММД.

Мехатронные модули движения на основе линейных высокомоментных двигателей (ЛВМД) находят все большее применение в гексаподах (см.гл.4), высокоскоростных станках (многоцелевых, фрезерных, шлифовальных), комплексах для лазерной и водоструйной резки, вспомогательном оборудовании (крестовых столах, транспортерах).

Традиционные электроприводы линейных перемещений включают в себя двигатель вращательного движения и механическую передачу для преобразования вращения в поступательное движение (шарики-винтовую передачу (ШВП), зубчатую рейку, ленточную передачу и т.п.). С начала 80- х годов известны разработки собственно линейных двигателей, однако из- за низких удельных силовых показателей они имели ограниченную область применения (графопостроители, координатно-измерительные машины) и в автоматизированном оборудовании не могли быть использованы:

- высокая статическая и динамическая жесткость.

Вместе с тем имеется ряд проблем при проектировании и внедрении ЛВМД: более высокая стоимость, необходимость использования систем охлаждения ММД (жидкостной или воздушной), относительно невысокий К.П.Д. модуля.

Серийно линейные ММД выпускаются в настоящее время рядом ведущих фирм. На международной выставке в Ганновере (1997) такие приводы демонстрировали более 20 фирм. В качестве примера рассмотрим технические характеристики ЛВМД, выпускаемых фирмой KraussMaffei(серия LIMESTS, со специальным охладителем) [6]: максимальное усилие - от 1720 до 14500 Н, максимальная скорость - до 3.5 м/с, масса модуля - от 13.1 до 132.9 кг.

По ГНТ программе "Технологии, машины и производства будущего" создаются модули линейного движения с усилием до 20000 Н, скоростью перемещения до 3 м/с и ускорением до 2g, которые ориентированы на применение в металлорежущих станках, промышленных роботах, запирающих устройствах газовых и нефтепроводов [24].

Мехатронные модули типа "двигатель - рабочий орган"

Важным этапом развития мехатронных модулей движения стали разработки модулей типа "двигатель-рабочий орган". Такие конструктивные модули имеют особое значение для технологических мехатронных систем, целью движения которых является реализация целенаправленного воздействия рабочего органа на объект работ.

В станках с относительно небольшим крутящим моментом (токарных малых размеров, консольно-фрезерных, высокоскоростных фрезерных станках) применяются так называемые "моторы-шпиндели". Отличительной конструктивной особенностью этих электро-механических узлов приводов главного движения является монтаж шпинделя непосредственно на роторе двигателя.

На рис.3.5 приведена конструкция модуля "мотор-шпиндель" фирмы "Fanuc" (одна из первых промышленных разработок данного класса), имеющего следующие основные технические характеристики: габариты - 784х338х430 мм, мощность - 5.5 кВт, номинальная скорость - 750 об/мин, максимальная скорость - 4500 об/мин, номинальный момент - 70 Нм. Использование в шпиндельных узлах механических подшипников определило их ограниченные функциональные возможности, в первую очередь при высоких скоростях вращения: недостаточный ресурс работы, необходимость смазки пар трения, проблему герметизации.

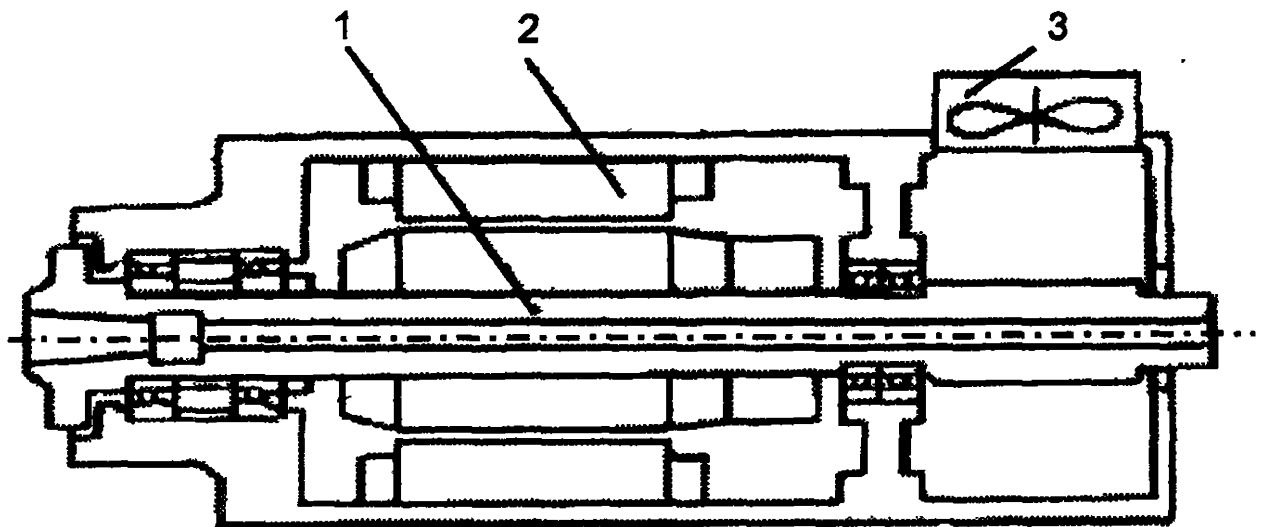


Рис. 3.5. Мехатронный модуль мотор-шпиндель:

1 - шпиндель, 2 - статор, 3 - вентилятор.

Для реализации на станках высокопроизводительных режимов резания разработаны шпиндельные узлы на электромагнитных опорах, которые обеспечивают скорость вращения до 200000 об/мин. Схема шпиндельного узла на электромагнитных опорах (ЭМО) показана на рис.3.6. Частота вращения ротора асинхронного двигателя регулируется изменением частоты питающего напряжения на статоре. Модуль имеет четыре опоры, две радиальные и две осевые. Дополнительным электронным элементом данного мехатронного модуля является система стабилизации положения оси ротора [7]. Под действием возмущающих усилий возникают отклонения в положении ротора, которые измеряются соответствующими осевыми и радиальными датчиками информации. Устройство

компьютерного управления, автоматически регулируя силу тока в обмотках возбуждения электромагнитов, поддерживает заданное положение оси ротора, либо изменяет его по желаемому закону (в пределах зазора в опорах) для получения деталей сложного профиля. Следует, однако, учитывать, что моторы-шпиндели на ЭМО требуют интенсивного охлаждения при длительной работе на высокоскоростных режимах.

В нашей стране участниками Ассоциации инновационного машиностроения и мехатроники ведется создание высокооборотных модулей с максимальной скоростью вращения до 250000 об/мин и мощностью до 60 кВт для металлорежущих станков, деревообрабатывающих машин, станков для сверления печатных плат.

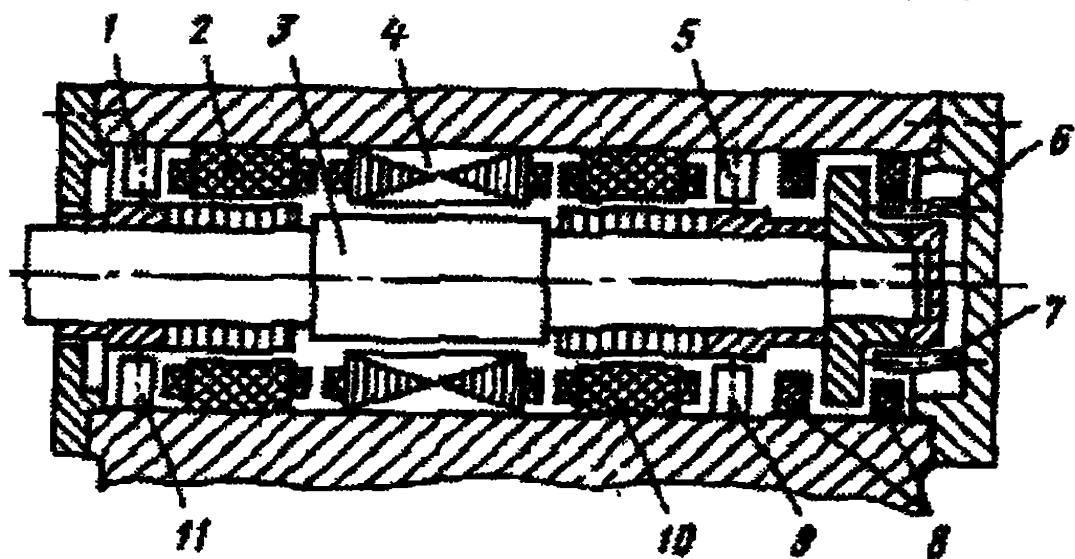


Рис.3.6. Шпиндельный узел на электромагнитных опорах:

- 1,5,9,11 – радиальные датчики информации;**
- 6,7 – осевые датчики информации;**
- 4 – статор асинхронного двигателя;**
- 2, 10 – радиальные электромагнитные опоры;**
- 8 – осевые электромагнитные опоры.**

Модули типа "двигатель - рабочий орган" нашли широкое распространение также в электроприводах различных самоходных средств (электровелосипедов и электромобилей, робокаров и мобильных роботов и т.п.). Так, при разработке тягового привода кресла-коляски в Новосибирском ГТУ [46] использован бесколлекторный высокомоментный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов, встроенный в ведущее колесо без промежуточного механического редуктора. Такие модули получили название "мотор-колесо". Избранное решение позволило снизить материалоемкость и трудоемкость изготовления привода, обеспечить бесшумность передвижения, уменьшить габариты и высвободить таким

образом пространство для размещения источника питания. Привод обеспечивает движение кресла-коляски со скоростью 6 км/час при общей массе 150 кг.

Интеллектуальные мехатронные модули движения

Главной особенностью современного этапа развития мехатронных модулей является интеллектуализация процессов управления их функциональными движениями. По сути речь идет о разработке принципиально нового поколения модулей, в которых осуществлена интеграция всех трех компонент: электромеханической, электронной и компьютерной. Техническая реализация интеллектуальных мехатронных модулей движения (ИММД) стала возможной благодаря бурному развитию в последние годы микропроцессорных систем, ориентированных на задачи управления движением. Постоянное совершенствование производственных технологий ведет к стабильному снижению стоимости аппаратных средств, что сделало их к настоящему времени рентабельными для практического внедрения. И1 связывает его с верхним уровнем управления и интерфейс И4 - с сенсорами и один выходной канал (интерфейс И2), через которой поступают управляющие команды на исполнительный привод. Соответственно можно выделить три направления интеллектуализации мехатронных модулей движения, которые классифицируются в зависимости от интерфейсных точек интеграции:

I. Развитие интегрированных интерфейсов, связывающих управляющий контроллер с компьютером верхнего уровня в единый аппаратно- программный управляющий комплекс (интерфейс И1).

II. Создание интеллектуальных силовых модулей управления путем интеграции управляющих контроллеров и силовых преобразователей (интерфейс И2).

III. Разработка интеллектуальных сенсоров мехатронных модулей, которые дополнительно к обычным измерительным функциям осуществляют компьютерную обработку и преобразование сигналов по гибким программам (интерфейс И3). Рассмотрим тенденции и способы технической реализации УКУ в современных мехатронных модулях.

Контроллеры движения

Первое из указанных направлений заключается в создании нового поколения компьютерных устройств, позволяющих пользователю гибко и быстро решать весь комплекс задач управления движением модуля.

Укрупненно можно разделить задачу управления движениями мехатронных систем на две основные части: планирование движения и его исполнение во времени. Задачу планирования движения и автоматизированного формирования программы управления решает компьютер верхнего уровня, который получает целеуказание от человека- оператора.

Функцию расчета и выдачи управляющих сигналов непосредственно на исполнительные приводы выполняет контроллер движения. Таким образом, сочетание компьютера и контроллера в архитектуре УКУ является обоснованным с точки зрения разделения решаемых подзадач управления.

Каждому из перечисленных этапов соответствуют определенные уровни в иерархической структуре системы управления, которая будет рассмотрена. В данной же вопросе, рассмотрим варианты архитектуры УКУ, которые применяются в мехатронике.

Лишь в простейших модулях иногда используются сепаратные контроллеры, которые привлекательны для пользователей своей относительной дешевизной. Функции такого контроллера ограничены задачей управления механическим движением по одной координате (редко по двум), некоторые модификации имеют стандартный интерфейс для включения в более сложные управляющие структуры. Однако необходимость программирования непосредственно оператором на языке достаточно низкого уровня (типа BASIC), малое количество каналов связи и ограниченный объем памяти делают этот тип контроллеров неперспективным для многокоординатных мехатронных систем с интеллектуальными методами управления.

Современные контроллеры обычно реализуют управление с обратной связью по положению и/или скорости управляемого механического объекта, т.е. мехатронная система управления является замкнутой на исполнительном уровне. Принцип разомкнутого управления в настоящее время используется только в системах управления шаговыми двигателями. Такие двигатели применяются, например в графопостроителях, плоттерах, поворотных столах и других устройствах, которые не испытывают существенных возмущающих воздействий. В оборудовании автоматизированного машиностроения (металлорежущих станках, технологических роботах) обеспечить приемлемую точность движения можно только используя замкнутые системы управления.

Для реализации функциональных движений контроллеры имеют также дополнительные входы/выходы для связи с внешним оборудованием (рис.3.7). Как правило, это сигналы, дискретные по форме. Здесь уместно обратить внимание на очень широкое распространение в промышленных системах автоматики программируемых логических контроллеров (ПЛК). Главная задача ПЛК - это эффективные операции исключительно с дискретной информацией. Поэтому построение на базе ПЛК систем управления движением мехатронными модулями, и тем более мехатронными системами, логически нецелесообразно. Но при этом возможен обмен информацией между контроллерами управления движением и ПЛК через блок дискретных входов/выходов.

Управление цифровых образовательных технологий

Наиболее распространены в настоящее время два метода формирования контроллером управляющих сигналов для силового преобразователя:

- ❖ аналоговые командные сигналы;
- ❖ модулированные управляющие сигналы.

Для формирования аналоговых управляющих сигналов необходим цифро- аналоговый преобразователь, который выдает электрические напряжения (обычно от -10В до +10В постоянного тока). С энергетической точки зрения выгодным считается метод широтно-импульсного управления силовыми ключами преобразователя.



Рис. 3.7. Структура системы управления функциональными движениями

Примечание. В технических описаниях контроллеров величины перемещений обычно имеют размерность [Имп] (Stepsили Counts), а скорости соответственно [Имп/с] (Steps/secили Counts/sec). Данные значения важны тем, что определяют собственные возможности контроллера без учета параметров датчиков обратной связи. Для определения параметров движения в системе единиц СИ следует разделить указанные числа на коэффициенты выбранных датчиков. Положим, что стандартный угловой фотоимпульсный датчик (инкодер) имеет коэффициент 5000 Имп/об, а выбранный резольвер - коэффициент 65000 Имп/об. Тогда при паспортной характеристике контроллера 1 000 000 имп/с получаем максимальные скорости вращения двигателя соответственно 200 об/с при использовании инкодера и 15.38 об/с при установке резольвера.

При создании интеллектуального мехатронного модуля возможны два базовых варианта аппаратной архитектуры УКУ:

Управление цифровых образовательных технологий

- 1) использование компьютера верхнего уровня и контроллера движения как отдельных устройств, соединенных стандартным интерфейсом (в этом случае контроллер является внешним блоком по отношению к компьютеру);
- 2) моноблочная структура, когда контроллер аппаратно устанавливается внутрь компьютера ("встраиваемый контроллер").

Данные аппаратные схемы имеют различные области предпочтительного применения. Архитектуру типа "внешний контроллер" целесообразно использовать в больших мехатронных системах, состоящих из нескольких многокоординатных управляемых машин (станков, роботов, вспомогательного оборудования). В таких системах компьютер выполняет функции сервера, решая задачи планирования движений, диспетчирования и управления работой всех контроллеров комплекса. Архитектура на базе встраиваемых контроллеров ориентирована на задачи координированного управления движением нескольких мехатронных модулей, входящих в состав, как правило, одной мехатронной системы (например, технологического робота для лазерной резки, который описан в следующей теме).

Блок-схема УКУ с внешним контроллером движения приведена на рис.3.8. Гибкость управления обеспечивается применением микропроцессора, исполняемая программа управления хранится в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ). Планирование функциональных движений осуществляется оператором на компьютере верхнего уровня с использованием пакетов прикладных программ. Компьютер выполняет также автоматическую генерацию команд для контроллера, которые поступают на исполнение через стандартный интерфейс (например, RS-232C). Эти команды задают желаемые законы изменения во времени положения, скорости и ускорения вала исполнительного двигателя. Типичным является трапецеидальный закон изменения скорости движения, включающий участки разгона, перемещения с постоянной скоростью и торможения с заданным ускорением (рис.3.8, б).

В качестве примера рассмотрим УКУ с внешним контроллером CompumotorPlus(серия "Хй"), выпускаемое фирмой Parker (USA) [59], которое предназначено для управления однокоординатными мехатронными модулями. В состав устройства входят:

- 1) контроллер управления движением, реализующий алгоритм цифрового ПИД-регулирования (коэффициенты регулятора могут программно изменяться по командам внешнего компьютера);
- 2) цифро-аналоговый преобразователь;
- 3) постоянное запоминающее устройство на 40 программ управления движением;
- 4) блок дискретных программируемых входов/выходов (3 выхода и 2 входа);

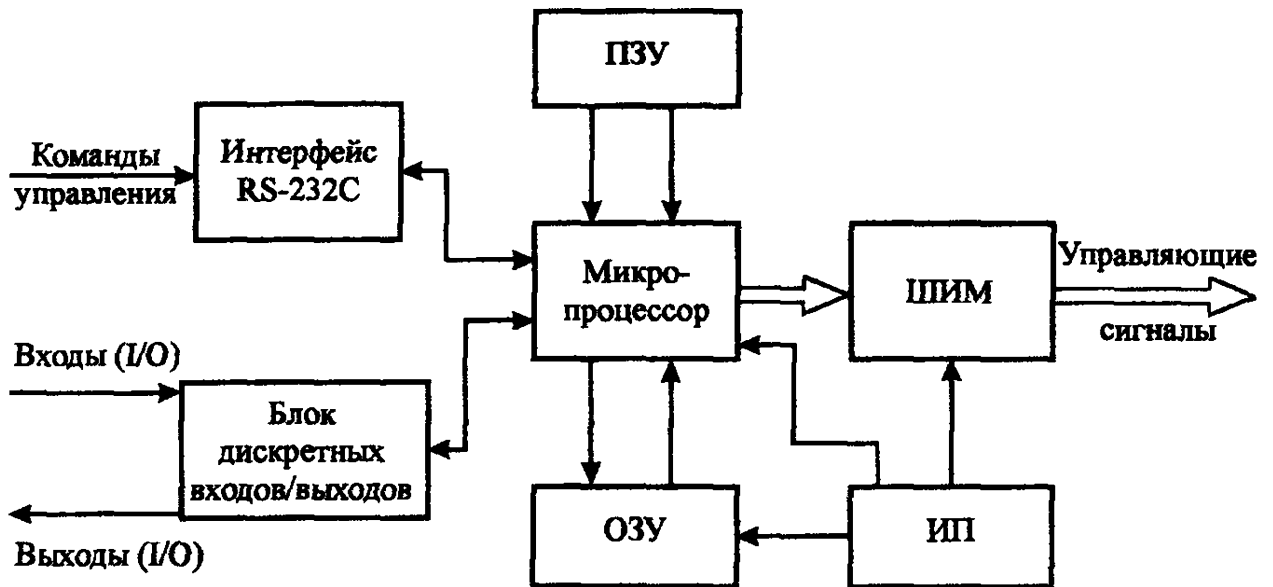
- 5) стандартный интерфейс RS-232C для связи с компьютером верхнего уровня;
- 6) интерфейс для преобразования в цифровую форму сигнала от резольвера;
- 7) панель оператора (монитор и кнопочный пульт).

Основные технические характеристики управляемого движения: диапазон скорости 0.0001 + 50 об/с, диапазон перемещения 0 - 327679 999 имп, позиционная ошибка не более 0.200 угл.град, повторяемость 0.0334 угл. град. платформы устройства управления движением. Это позволяет сочетать функции планирования и управления функциональными движениями мехатронными модулями и системами, сбора и обработки информационно-измерительных данных в аппаратно и программно едином устройстве. Важным с точки зрения пользователя достоинством такого подхода является интеграция стандартных операционных систем и программных средств (AutoCAD, Excel, Windows NT/95/11, C++ и т.п.) с системами программирования движений. Объединение управляющих компьютеров в сеть дает возможность создавать распределенные управляющие комплексы для задач автоматизации производственных ячеек, цехов и предприятий. При этом модульная архитектура на базе PC промышленного исполнения гарантирует эффективную защиту аппаратной части от тепловых, вибрационных и других воздействий производственной среды.

Технически встраиваемые контроллеры движения выпускаются в виде специальных плат (plug-incard), устанавливаемых в дополнительный слот PC. Обмен данными между контроллером и PC осуществляется через стандартную шину (обычно 32-битная) адреса и данных. Примерами типичных шин могут служить стандарты ISA, STD, VME и ШМ-PC Bus. На плате контроллера также имеются необходимые разъемы для подключения силового преобразователя привода, датчиков обратной связи (аналоговых и цифровых), внешних устройств с дискретным входом/выходом. Примером серийно выпускаемого в настоящее время встроенного контроллера движения является модель PCI-FlexMotion-C фирмы National Instruments (USA) [54]. Устройство позволяет одновременно управлять движением мехатронной системы по шести координатам с обратной связью и дополнительно по двум осям в шаговом режиме. В состав контроллера входят мощный многозадачный процессор Motorola real-time 32-bit, цифровой сигнальный процессор (DSP-processor) фирмы Analog-Device, многоканальные аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи, интерфейсы для внутренних и внешних коммуникаций.

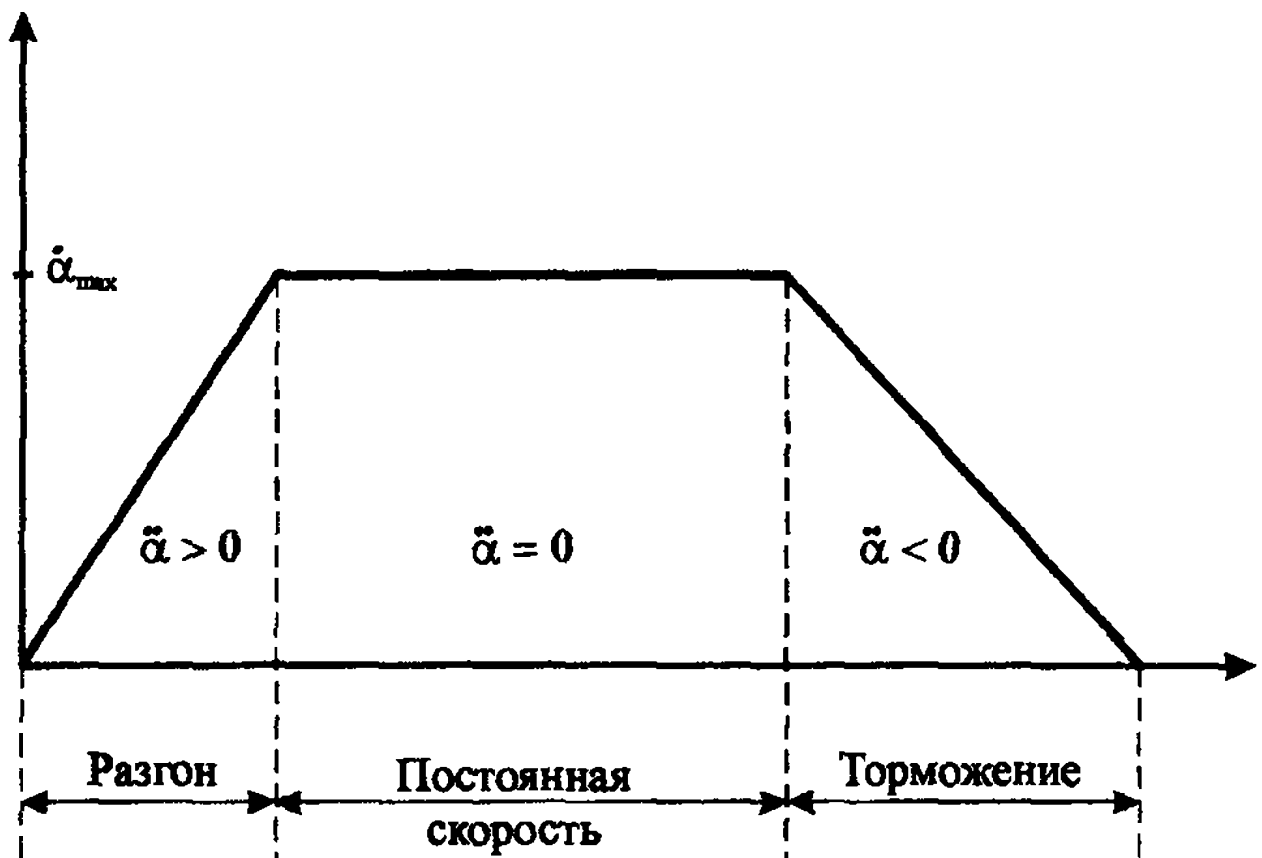
Контроллер позволяет реализовывать следующие виды управляемых движений:

- ❖ позиционное управление;
- ❖ перемещение по пространственным (3D) траекториям с линейной интерполяцией;
- ❖ контурные движения с круговой и онлайн-интерполяцией;
- ❖ копирующие движения.



(а). Блок-схема контроллера движения

(ПЗУ - постоянное запоминающее устройство,
ОЗУ - оперативное запоминающее устройство,
ШИМ - широтно-импульсный модулятор,
ИП - источник питания).



(б). Типовой закон движения

Рис. 3.8 Устройство компьютерного управления с внешним контроллером движения

Основные технические характеристики контроллера движения: период расчета управляющего сигнала (по одной оси) 62.5 мкс, диапазоны управления:

по скорости 0 - 16 Мега имп/с, по перемещению 0-5-2 147 483 647 имп, по ускорению 0 + 134 217 728 имп/с², максимальные ошибки управления:

позиционная ошибка ± 1 имп (для инкодера в обратной связи), 0.0049 В (для аналоговой обратной связи), скоростная ошибка 0.02%, дискретные входы/выходы 24 бит, 22 линии, аналого-цифровое преобразование 8 линий, 12 бит, 10 мкс, ± 10 В, цифро-аналоговое преобразование 16 бит, ± 10 В, выход широтно-импульсного модулятора 0.5 32 КГц.

Интеллектуальные силовые модули

Вернемся к анализу возможных способов интеллектуализации мехатронных модулей и рассмотрим подход, направленный на интеграцию контроллеров движения и силовых преобразователей привода (интерфейс И2 на рис.2.4). Такое решение целесообразно для многомерных мехатронных систем, компоненты которых расположены на значительном удалении друг от друга. В этих случаях комплексировать систему управления на базе одного персонального компьютера очень сложно, а иногда и технически невозможно из-за проблем передачи сигналов и данных на большие расстояния. Так, стандартный протокол RS-232 позволяет передавать данные на расстояния не более, чем 9.15 м.

Блок управления каждым модулем в таких системах встраивается в корпус преобразователя или даже в клеммную коробку электродвигателя [24, 43]. Такие модули получили название интеллектуальных силовых модулей - ИСМ.

Примером такого решения является новая система управления промышленных роботов ПР 125/150, выпускаемых АО АВТОВАЗ [38]. Силовая и слаботочная электронные части системы установлены в общем шкафу управления. Система управления имеет два управляющих модуля - модуль привода РМ6-600 и устройство компьютерного управления на базе процессора Pentium. Данный вариант удобен для обслуживания и эксплуатации, экономичен по занимаемой площади, обеспечивает свободный доступ ко всем коммуникациям системы.

Интеллектуальные силовые модули строятся на базе полупроводниковых приборов нового поколения [14, 43]. Типичными представителями этих приборов являются силовые полевые транзисторы (MOSFET), биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), запираемые тиристоры с полевым управлением (MCT). Новое поколение приборов отличается высоким быстродействием (для транзисторов IGBT частота коммутации составляет

до 50 000 Гц, для транзисторов MOSFET- 100000 Гц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (для IGBT: предельная сила коммутируемого тока - до 1200 А, предельное коммутируемое напряжение - до 3500 В), малая мощность управления.

В состав ИСМ входят, кроме традиционных приборов силовой электроники (ключей на базе силовых транзисторов или тиристоров, диодов и др.), элементы микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций - управление движением, защита в аварийных режимах и диагностика неисправностей. Использование ИСМ в составе приводов мехатронных модулей позволяет существенно снизить массогабаритные показатели силовых преобразователей, повысить их надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели. В последние годы рынок интеллектуальных силовых модулей быстро развивается и в 2000 году ожидается значительный скачок в его росте.

Интеллектуальные сенсоры мехатронных модулей и систем

Целью создания интеллектуальных сенсоров является объединение функций измерения текущих параметров механического движения, их преобразования и компьютерной обработки по заданным алгоритмам в едином информационно-измерительном модуле. Со структурной точки зрения речь идет об интеграции сенсорного и компьютерного блоков мехатронного модуля (интерфейс ИЗ на рис.2.4). Интеллектуализация сенсоров позволяет добиться более высокой точности измерения, программным путем обеспечив в самом сенсорном модуле фильтрацию шумов, калибровку, линеаризацию характеристик вход/выход, компенсацию перекрестных связей, гистерезиса и дрейфа нуля.

В мехатронных модулях сенсоры предназначены для сбора данных о фактическом состоянии элементов движущейся системы (исполнительного привода, механического устройства и рабочего органа), обработки в реальном времени и передачи сигналов обратной связи в устройство компьютерного управления.

К типичными измеряемым величинам, информация о которых используется при управлении мехатронными модулями и системами, относятся: перемещение (линейное или угловое), скорость, ускорение и моменты, развиваемые исполнительными двигателями; внешние усилия, действующие на рабочий орган (например, на шпиндель модулей, показанных на рис.3.5 и 3.6); положение и ориентация рабочего органа в пространстве (например, схвата промышленного робота или щупа контрольно-измерительной машины).

В целом проблема проектирования и технологии производства интеллектуальных сенсоров (ИС) является самостоятельной научно-технической областью и выходит за рамки рассматриваемого круга вопросов. Для мехатроники представляют интерес способы интеграции ИС в мехатронные модули движения и метода минимизации промежуточных

преобразований измеряемой физической величины в цифровой код, пригодный для ввода в устройство компьютерного управления.

С точки зрения минимизации промежуточных преобразований одним из наиболее эффективных (и потому очень широко применяемых в мехатронике) интеллектуальных датчиков обратной связи являются оптические инкодеры со встроенными микропроцессорами. Среди отличительных преимуществ современных инкодеров следует выделить: возможность определения как перемещения, так и скорости движения; высокую точность и низкие шумы при измерении; многооборотность; конструктивную компактность и возможность встраивания в мехатронный модуль. Важно подчеркнуть, что инкодеры выдают выходной сигнал в кодовой форме, что удобно для компьютерной обработки в реальном времени.

Различают два основных вида инкодеров - абсолютные и инкрементальные. Абсолютные инкодеры дают информацию о величине перемещения (линейного или углового) движущегося вала относительно фиксированного нулевого положения.

Преимуществами абсолютного инкодера являются надежность измерения (даже при временном отключении питания информация датчиком не будет потеряна), высокая точность при больших скоростях движения, запоминание нулевого положения (это важно при необходимости управления реверсивными и аварийными движениями машин). Инкрементальный датчик дает информацию о направлении и величине перемещения в приращениях относительно исходного положения, что вполне достаточно во многих практических приложениях.

Интеллектуализация инкодеров обеспечивается встроенными микропроцессорами, которые выполняют следующие основные функции: кодирование информации датчика, обнаружение ошибок измерения, масштабирование сигнала и передача текущего кода в контроллер движения по стандартному протоколу. Современная тенденция в создании инкодеров заключается в объединении в едином сенсорном модуле конструктивных элементов (валов, подшипников), кодировочных дисков, фотоэлементов и микропроцессора.

Примером технического воплощения этой тенденции является вращательный инкодер серии AR(разработка фирмы Parka* [59]). Ниже приведены его некоторые технические характеристики:

- ❖ разрешающая способность 1024 позиций/об или 16384 позиций/об (выбирается и масштабируется пользователем с помощью микропроцессора);
- ❖ максимальное число позиций - 8 388 608 (достигается применением дополнительных дисков и переходом к многооборотному режиму работы); погрешность не более

5.5 угл. Мин; скорость вращения до 5000 об/мин; габариты: длина 87 мм, диаметр 60 мм; масса 0.45 кг.

Интеграционная направленность мехатроники стимулирует развитие так называемых гибридных технологий для производства особо компактных и миниатюрных модулей. Гибридные технологии предусматривают использование единых материалов (в первую очередь полупроводниковых - например, кремния) как для механических, так и для микроэлектронных компонент. Это позволяет радикально уменьшать размеры модуля без увеличения его стоимости, что практически невозможно при традиционных производственных технологиях.

Серийно выпускает сенсоры для определения параметров механического движения на основе гибридных технологий фирма AnalogDevice[61]. В качестве примера рассмотрим датчик ускорения модели ADXL05, который может использоваться как в мехатронных модулях, так и в системах вибродиагностики и защитной сигнализации.

Акселерометр представляет собой интегральную микросхему (диаметр корпуса 9.4 мм, высота 4.7 мм) в герметичном исполнении, которая имеет 10 выводов. Диапазон измеряемых ускорений может быть выбран пользователем от $\pm 1g$ до $\pm 5g$ соответственно с выходным сигналом от 200 mV/g до 1 V/g. Выход акселерометра непосредственно подключается к АЦП без каких-либо дополнительных активных элементов. В состав сенсора входят следующие основные блоки: датчик ускорения (включает общую вибрирующую пластину и 46 дополнительных элементов), генератор, демодуляторы, источник питания, предварительный и буферный усилители, а также ряд пассивных элементов (резисторов и конденсаторов) для настройки. Действие акселерометра основано на принципе дифференциального емкостного преобразователя, т.е. блока конденсаторов, электрические параметры которого изменяются под действием измеряемого воздействия [13].

Рассмотренный датчик модели ADXL05 может использоваться в однокоординатных мехатронных модулях, так как измеряет только одну компоненту вектора ускорения. Для многомерных мехатронных систем фирмой разработаны многокомпонентные сенсоры, например, акселерометр модели ADXL202. Этот сенсор применяется в мобильных роботах фирмы "ТАРИС" для определения углов крена и дифферента при выполнении работ в наклонных подземных трубопроводах. Функциональная схема этого сенсора приведена на рис.3.9.

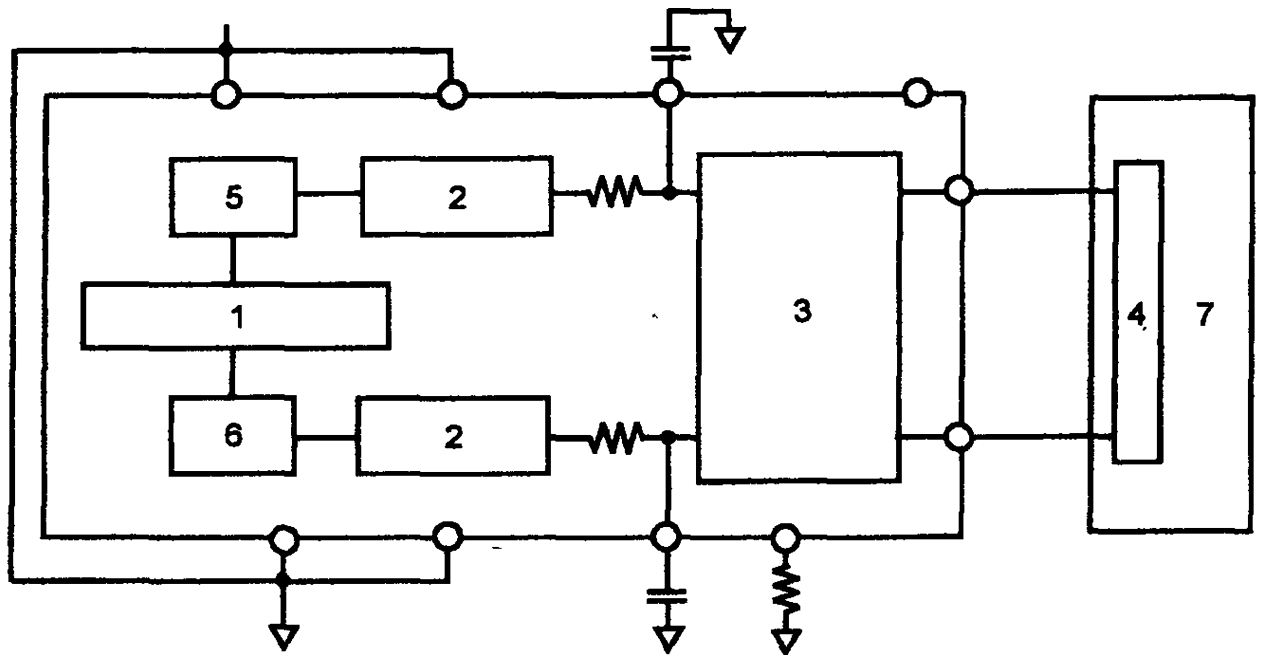


Рис. 3.9. Блок-схема двухкомпонентного акселерометра:

- 1 - генератор колебаний; 2 - демодуляторы; 3- широтно-импульсные модуляторы;
5- измеритель ускорения по оси X; 6-измеритель ускорения по оси Y; 7- микропроцессор.

Датчик дает информацию о значениях ускорений при пространственном движении объекта управления по двум осям (X и Y) в диапазоне $\pm 2g$ [62]. Полоса пропускания датчика устанавливается пользователем в интервале от 0.01 Гц до 5 КГц в зависимости от решаемой задачи. Погрешность измерения составляет 5 мд для полосы 60 Гц. Выходной сигнал формируется широтно-импульсным модулятором (ШИМ), поэтому его цифровой код определяется микропроцессорным счетчиком без предварительного аналого-цифрового преобразования. Период выходного сигнала регулируется в диапазоне от 0.5 мс до 10 мс. Гарантируется нормальная работа сенсора при температурах от 0°C до +70 °C в обычном исполнении или от -40°C до +85°C в специальном варианте.

Другим примером реализации гибридных технологий, ориентированным на массового потребителя, может служить предложенный в работе [60] проект интеллектуальной авторучки, позволяющей писать на бумаге с одновременным вводом текста в компьютер. Для кодирования графической информации используются пьезоэлектрический датчик сипы/ускорения и датчик угла наклона ручки. Размещение как чувствительных элементов пьезодатчика, так и всех электронных цепей на одном кремниевом кристалле позволит, по мнению авторов, добиться желаемых габаритов авторучки ,не превышающих размеров обычного маркера) при доступной для потребителя цене.

Интересным направлением является применение в интеллектуальных мехатронных модулях косвенных методов измерения параметров механического движения. В этом случае можно вообще отказаться от установки типичных датчиков (даже встроенных), добиваясь минимальных габаритов и материалоемкости модуля. Величины скорости, положения, действующего момента рассчитываются компьютерным блоком по математическим моделям протекающих электромеханических процессов (поэтому иногда применяется термин "виртуальные датчики").

Хорошо известен способ косвенного определения момента, развиваемого двигателем постоянного тока, по пропорциональной величине тока в якорной цепи, который часто используется в промышленных приводах. В последнее время разработан ряд методов и устройств косвенного измерения скорости электродвигателей. Так, стабилизировать скорость вращения асинхронного двигателя можно без установки датчика скорости на его валу, поддерживая в обмотке статора отношение тока к напряжению на заданном уровне с помощью обратной связи по току статора. Для трехфазных вентильных двигателей малой мощности разработан метод коммутации обмоток по ЭДС вращения, позволивший устранить традиционные датчики положения ротора из конструкции двигателя. Все методы косвенного измерения требуют построения адекватных математических моделей и их эффективной компьютерной реализации в реальном времени, включая алгоритмы фильтрации помех, статистической обработки измерений и цифрового кодирования информации. Появление на рынке быстродействующих и недорогих встроенных микропроцессорных средств делает эти методы перспективными для интеллектуальных мехатронных модулей - модулей нового поколения.

Лекция

Тема 1.3.2. Современные мехатронные системы

ВОПРОСЫ

1. Мобильные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов.
2. Сенсоры используемые в прототипе мобильного робота.
3. Диагностика неисправностей в городских инженерных коммуникациях в среде MATLAB.

ЛИТЕРАТУРА

3. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с. 160-167).

4. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5 с. 48-51).
5. Алгоритмы и системы нечеткого вывода при решении задач диагностики городских инженерных коммуникаций в среде MATLAB. – М.: Радио и связь, Горячая линия – Телеком, 2005. – 365 с. (с. 146-163).

Даже беглый взгляд на перечень областей применения мехатронных систем, свидетельствует об их огромном многообразии. В настоящем курсе мы ограничимся рассмотрением лишь нескольких систем, относящихся к области автоматизированного машиностроения. Первые три примера взяты из робототехники. Мехатроника в нашей стране и как научно-техническое направление и как инженерная специальность очень тесно связана с робототехникой (любопытно, что эта же тенденция характерна для становления мехатроники в некоторых других европейских странах, в частности Великобритании [53]). Однако следует заметить, что во многих европейских и отечественных научно-технических программах последних лет (например, в Критических технологиях Министерства науки РФ на 1999-2000 годы) все чаще мехатроника выделяется как самостоятельное направление, что свидетельствует о значимости и приоритетности ее развития.

При рассмотрении примеров особое внимание будем обращать на то, каким образом реализованы в конкретной разработке концепция построения и принципы проектирования мехатронных систем.

1. Мобильные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов

Проблема эксплуатации и ремонта трубопроводов актуальна для нефтяных и газопроводов, для водопроводных и канализационных сетей (особенно для крупных городов и мегаполисов как Москва), для каналов водосброса и водозабора из рек. Применение мобильных роботов для телеинспекции и обслуживания магистралей позволяет предупреждать техногенные и экологические аварии и катастрофы (а не подсчитывать многомиллионный ущерб и описывать безвозвратные утраты в природе, чем зачастую заняты экологические службы) и внедрить бестраншейные методы ремонта. Роботизация позволяет также осуществлять реновацию и санацию ветхих магистралей, проводить приемку новых и контроль за состоянием действующих трубопроводов, проводить экологический мониторинг сетей, составлять карты подземных коммуникаций.

Ведущим отечественным разработчиком инспекционных роботов для водопроводных и канализационных сетей является московское НПО "ТАРИС". Выпускаемые предприятием с 1991 года роботы достойно конкурируют с зарубежными системами. При равном уровне качества цена мобильных роботов фирмы "ТАРИС" на 15-20% ниже импортных аналогов, при этом очевидны выгоды в гарантийном и сервисном обслуживании техники на территории России и СНГ. По имеющимся оценкам годовой экономический эффект от применения инспекционных роботов приблизительно в два раза превосходит их стоимость [26,42].

Общий вид роботов фирмы "ТАРИС" показан на рис.4.1. Осмотровый робот Р-200 предназначен для телеинспекции трубопроводов диаметром от 150 до 1200 мм. Этот мобильный робот имеет набор сменных колес и цветную поворотную телекамеру. Управляется робот дистанционно оператором с поста управления, размещенного в автомобиле (длина кабеля до 200 м). Пост управления имеет цветной монитор и цифровую систему документирования на базе компьютера в промышленном исполнении. Телекамера оснащена устройством наведения (механизмы качания, ротации и подъема) для осмотра стенок трубы, блоками основного и дополнительного освещения, электромеханический стеклоочиститель, а также имеет дистанционный привод фокусировки. Робот имеет герметичное исполнение, способен работать с погружением в воду, корпус накачивается азотом для предотвращения конденсации влаги внутри него и запотевания стекол телекамеры. Приводы перемещения представляют собой мехатронные модули типа "мотор-колесо" на базе двигателей постоянного тока. Схема телеинспекции показана на рис.4.2, а. Помимо системы технического зрения робот оснащен датчиком пути, датчиком углов крена и дифференциала корпуса, датчиками углов ориентации телекамеры. Эти сенсоры необходимы не только для управления движением робота, но и для трассировки залегания трубопровода, дают информацию о профиле трубы и координатах дефекта (свища, трещины) или обнаруженного постороннего предмета.

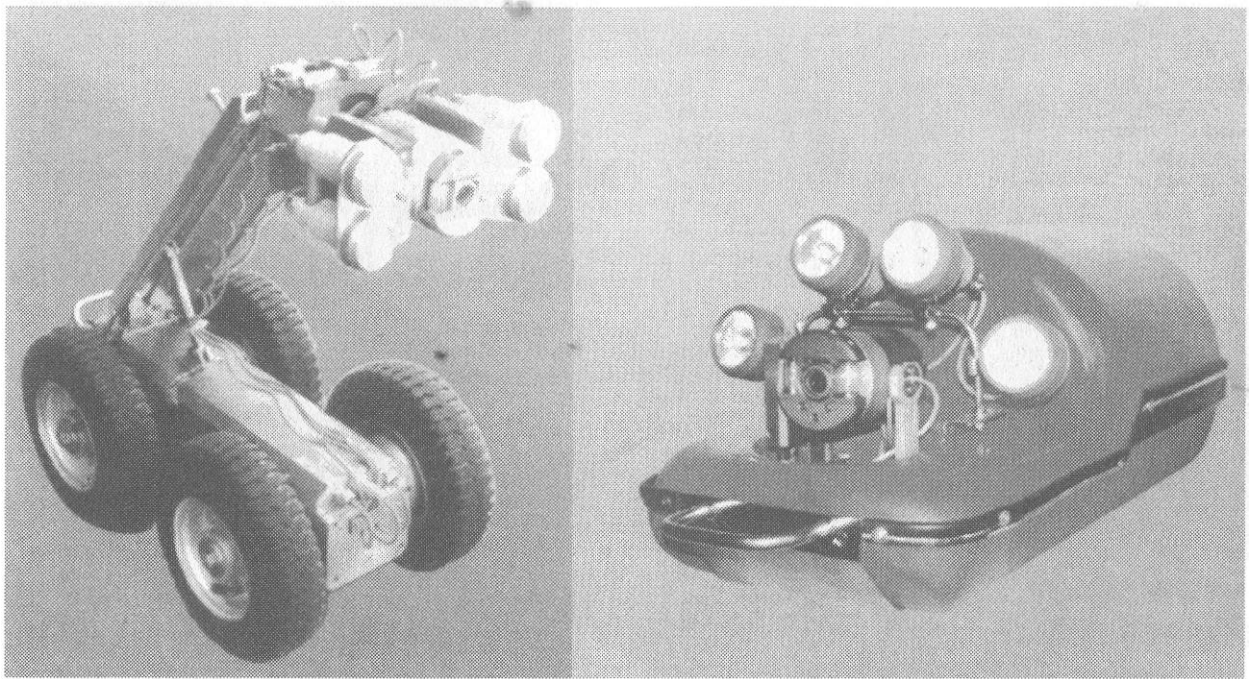


Рис. 4.1.Общий вид мобильных роботов

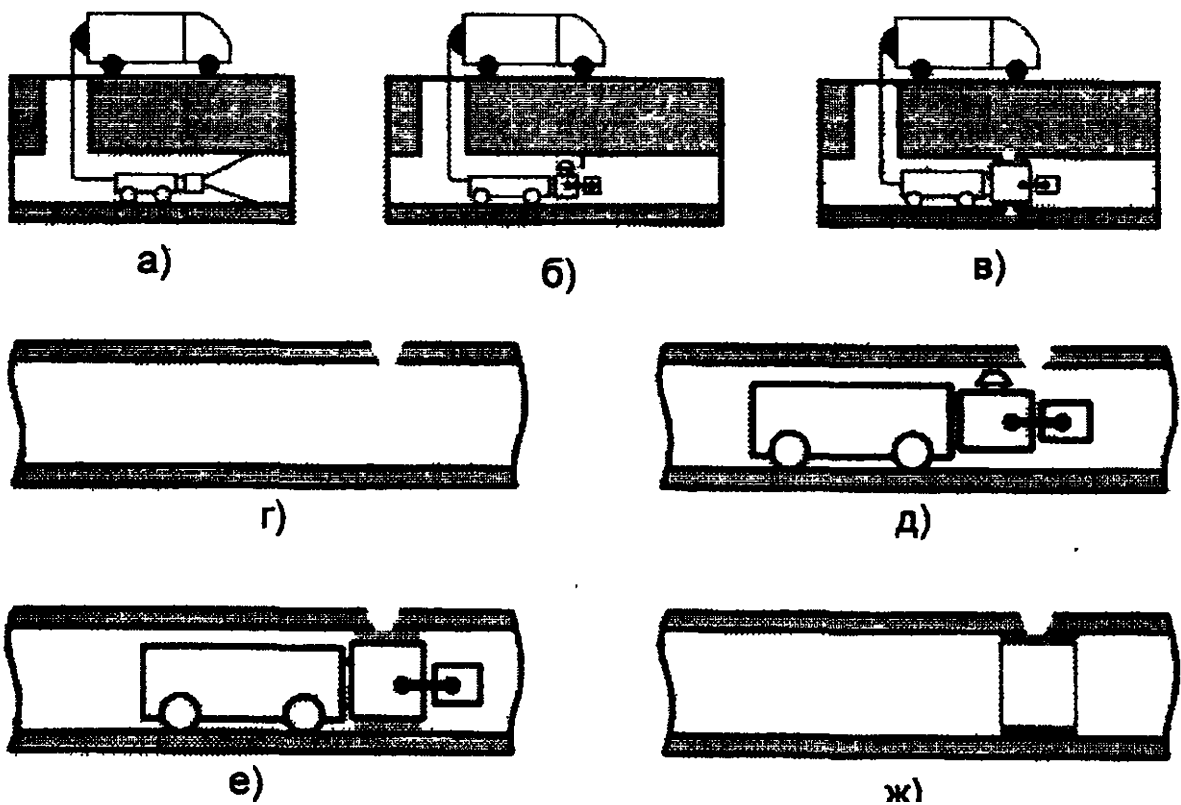


Рис. 4.2. Схемы роботизированных операций:

- а) телеинспекция трубопровода; б) подрезка выступающих элементов;
- в) локальная заделка дефекта; г) дефект в трубопроводе;
- д) зачистка с помощью фрезерной головки;
- е) установка внутреннего бандаж; ж) трубопровод после ремонта.

Телероботы НПО "ТАРИС" позволяют не только обнаружить, но и устранить целый ряд дефектов. Робот РОКОТ-1М комплектуется сменными рабочими органами -фрезерными и бандажными головками для выполнения ремонтных операций внутри трубы. Фрезерная головка предназначена для локальной зачистки поверхностей, сверления, подрезки выступающих элементов (наплывы, грат на сварных швах, штыри), прорезки боковых отводов после санации трубы пластиком. Заделка дефектов выполняется с помощью бандажной головки, которая накладывает кольцевой бандаж шириной 100 мм из ткани со специальной пропиткой. Схемы ремонта дефекта в трубопроводе для ликвидации утечек без раскопки показаны на рис.4.2, б-ж.

Мобильный робот является характерной мехатронной системой, когда проектно-конструкторские решения по разработке электромеханической, сенсорной и электрической частей необходимо принимать только во взаимосвязи, учитывая уже с начальных этапов главный лимитирующий фактор - диаметр трубопровода.

Перспективы развития мобильной робототехники связаны с интеллектуализацией устройств управления и сенсоров, что позволит повысить качество проводимых операций и автономность их выполнения.

Автоматическое принятие решений роботом, без непосредственного участия человека-оператора, целесообразно на следующих операциях:

- обнаружение и распознавание постороннего объекта в трубопроводе с использованием информации системы технического зрения (СТЗ) и локационных датчиков;
- планирование траектории и скорости движения при прохождении поворотов на базе сенсорных сигналов от двухкомпонентного датчика крена-дифферента и датчиков приводных модулей "мотор-колесо";
- управление режимами работы фрезерной головки на основании информации о действующих силах и моментах;
- диагностика и измерение толщины стенки трубы.

Мобильные роботы НПО «Тарис» позволяют не только обнаружить, но и устранить целый ряд дефектов. Одним из эффективных методов ремонта труб является бандажирование (рис. 4.2)

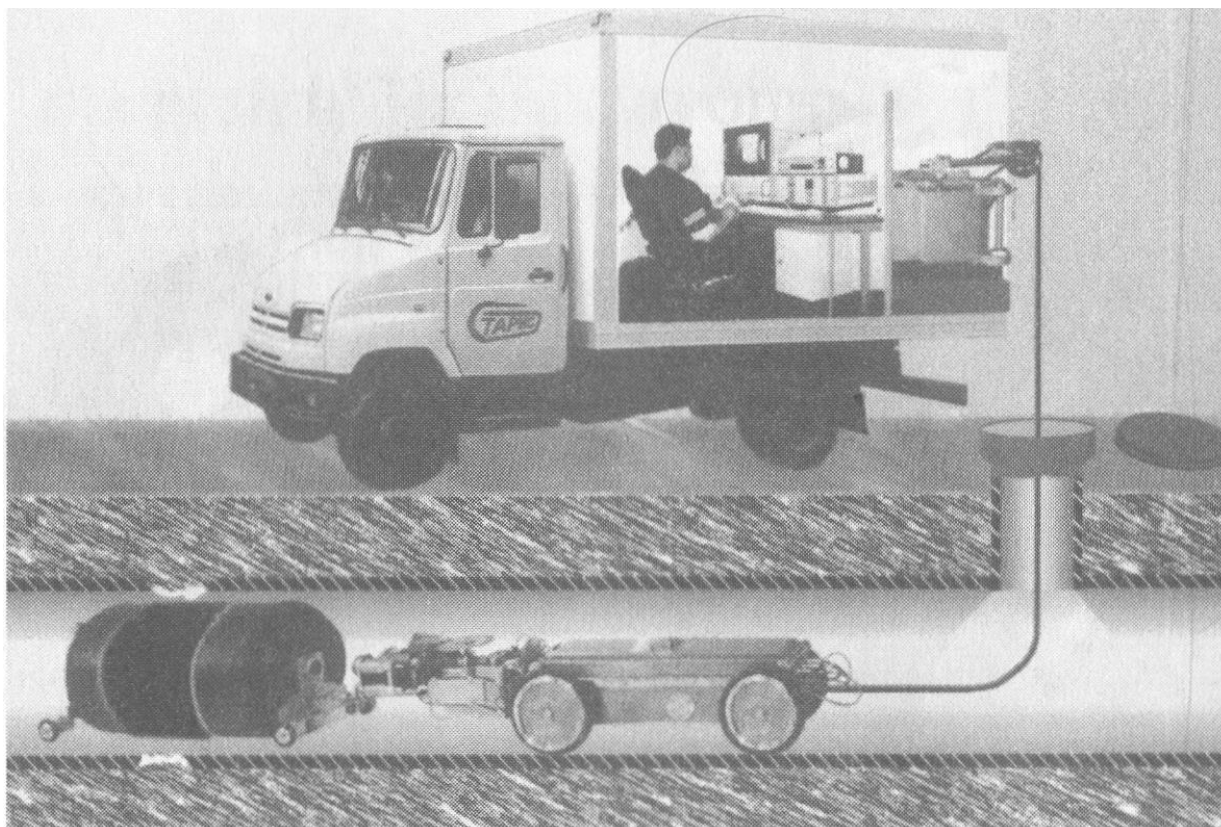


Рис. 4.3. Мобильный робот с бандажным устройством фирмы «Тарис»

Устанавливаемый бандаж состоит из металлической обечайки и слоя ткани, пропитанной полимером. Под действием давления, подаваемого по шлангам, пакер раздувается и прижимает обечайку с полимером к стенкам трубы. Применяются обечайки, изготовленные из коррозионно-стойкой или углеродистой стали. Вместо ткани с полимером в качестве материала для герметизации дефекта может применяться слой резины.

В состав мобильного робототехнического комплекса С-200 (рис. 4.4) входят: технологический робот, кабельный барабан, рабочая станция с системой технического зрения, пост управления оператора.

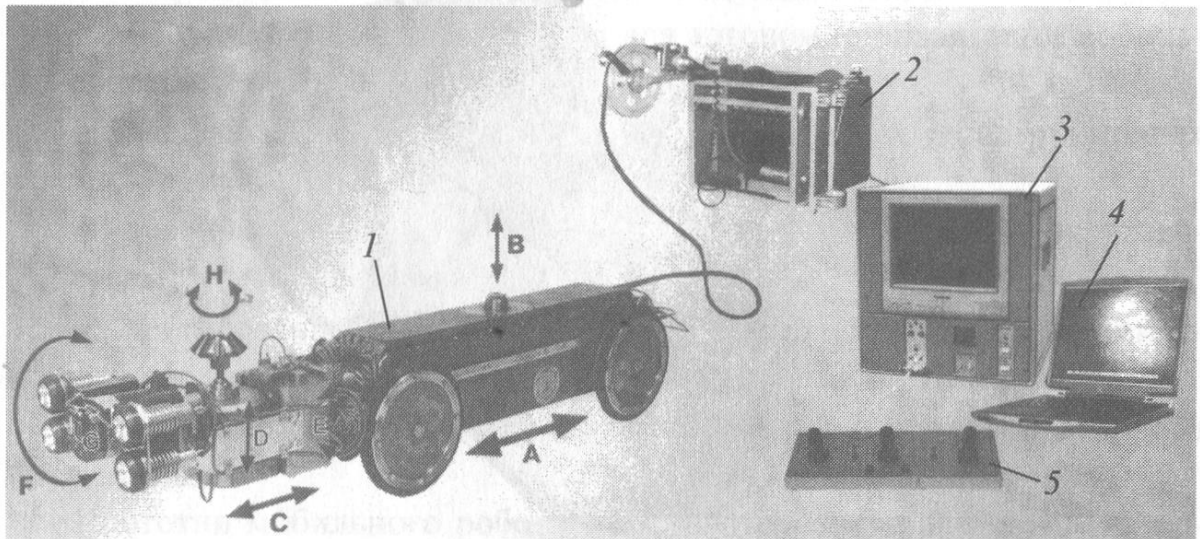


Рис. 4.4. Мобильный робототехнический комплекс С-200 фирмы «Тарис»: 1-робот; 2-кабельный барабан; 3-рабочая станция CD3; 4-пост управления; 5-пульт управления

Робот комплектуется сменными рабочими органами – фрезерными и инструментальными головками для выполнения ремонтных операций внутри трубы. Рабочие органы предназначены для локальной зачистки поверхностей, сверления, подрезки выступающих элементов (наплывов, гратов на сварных швах, штырей), прорезки боковых отводов после санации трубы пластиком.

Стрелками на рис. 4.4 обозначены основные движения данной мехатронной системы: А – перемещение робота за счет колесного привода (скорость 0...0,2 м/с); В – выдвигание упора (сила 500 Н); С – выдвигание рабочего органа (ход 10 мм, сила 500 Н); D – поперечная подача инструментальной головки (ход 50 мм, сила 500 Н); E – ротация рабочего органа (угол $\pm 180^\circ$, момент 50 Н*м); F – качание видеокамеры (угол качания $\pm 140^\circ$); G – перемещение стеклоочистителя видеокамеры; H – вращение инструментальной головки.

На кафедре робототехники и мехатроники МГТУ «СТАНКИН» был создан прототип модильного робота «ИРИС-1». Значительная часть работ была выполнена в рамках проекта международного сотрудничества при поддержке Королевского Общества (Великобритания). Участниками проекта являлись МГТУ «СТАНКИН» и Де Монтфортский университет (Великобритания).

Усовершенствование робота имело следующие цели:

- исследование новых методик для автономной навигации мобильных роботов;

- экспериментальное изучение влияния новых конструктивных решений, примененных в прототипе;
- тестирование различных сенсоров для распознавания окружающей среды;
- тестирование мультисенсорной технологии инспекции окружающей среды;
- создание прототипа для дальнейшего развития лабораторного оборудования.

Прототип мобильного робота с компьютерным управлением на основе двигателя постоянного тока состоит из базового, сенсорного, транспортного, электронно-коммуникационного, силового модулей и модуля управления (рис. 4.5).

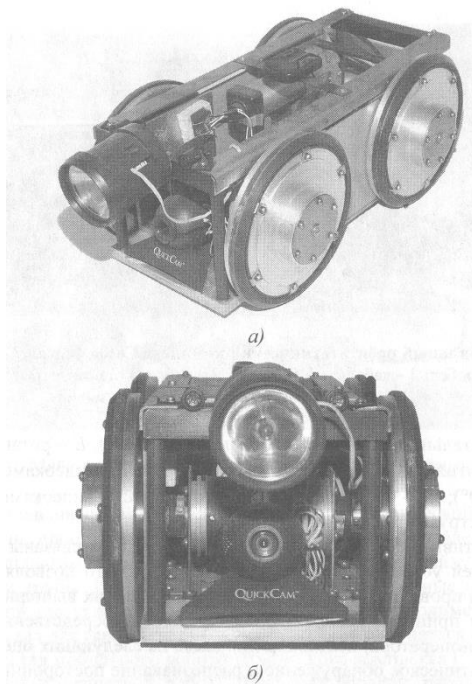


Рис. 4.5. Прототип мобильного робота «ИРИС-1»: а- общий вид; б – вид впереди

Базовый модуль состоит из жесткой несущей рамы с множеством отверстий для варьированного крепления сенсоров и транспортного модуля. Также на базовый модуль установлены две клеммные колодки для крепления силовых и информационных кабелей.

Сенсорный модуль (табл. 4.1) включает ультразвуковые и фотоимпульсные датчики, микроволновый датчик, видеокамеру, набор двумерных акселерометров. Для эффективного функционирования видеокамеры внутри трубы на роботе имеется источник дополнительного освещения.

2. Сенсоры, используемые в прототипе мобильного робота

Тип сенсора	Функциональное описание
Акселерометры	Двухкоординатные акселерометры "Analogue Device ADXL205" для определения фактических параметров движения мобильного робота при его транспортной навигации
Фотоимпульсные датчики	Фотоимпульсные датчики "ЛИР-21" с разрешающей способностью 1000 имп/об для измерения параметров движения

Тип сенсора	Функциональное описание
Ультразвуковые датчики	Однозонные релейные ультразвуковые датчики "Sirio" для определения дефектов трубы и обнаружения препятствий
Микроволновой датчик	Однозонный релейный микроволновой датчик "Falcon MWS-1" для определения дефектов трубы и обнаружения препятствий
Видеокамера	Видеокамера "Logitech" для изучения внутреннего состояния трубы и ее конфигурации. Может работать как в непрерывном, так и в дискретном режимах

Транспортный модуль состоит из двух мотор-редукторов (двигателей постоянного тока с встроенными червячными передачами). Робот имеет четыре колеса. Два задних колеса являются ведущими, к ним прилагается сепаратный крутящий момент от мотор-редукторов. Передние колеса - ведомые и соединены с фотоимпульсными датчиками. Все колеса опираются на подшипники качения и снабжены специализированными шинами (производство НПО "ТАРИС", Москва) для обеспечения высоких сцепных свойств внутри труб.

Электронно-коммуникационный и силовой модуль состоит из платы ЦАП-АЦП (производство L-Card, Россия) и силового блока для подачи управляющих сигналов на электродвигатели с обратной связью. Длина коммуникационных кабелей составляет 5 м. Кабель состоит из 16 проводов для передачи информационных и силовых сигналов.

Управляющий модуль состоит из управляющего компьютера (PentiumII-350) с программным обеспечением и служит для обработки информации, поступающей с датчиков, установленных на мобильном роботе.

На базе мобильного робота "ИРИС-1" на кафедре "Робототехника и мехатроника" МГТУ "СТАНКИН" была создана система дистанционного управления мобильным роботом с использованием сети Интернет. Применение сетевых технологий для решения задач дистанционного управления позволяет использовать такие преимущества глобальной сети Интернет, как широкая распространенность и доступность, возможность организации доступа широкого круга специалистов и студентов к уникальному дорогостоящему оборудованию. Описание этой системы дано в следующей теме.

3. Диагностика неисправностей в городских инженерных коммуникациях в среде MATLAB

Рассмотрим процесс получения заключений на основе непосредственного применения нечеткого отношения, что характерно для задач технической диагностики [3, 4, 5, 7, 12]. Этот пример иллюстрирует:

- особенности решения нечетких уравнений и неравенств;
- метод получения заключений с использованием посылок (обратный метод вывода – fuzzy modus tollens).

Пусть выделено полное пространство предпосылок X из m факторов (причин), вызывающих какую-либо неисправность городских инженерных коммуникаций (ГИК), и полное пространство заключений Y – из n симптомов (проявлений) неисправностей ГИК: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$; $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$.

Рассмотрим упрощенную модель диагностики неисправностей ГИК на некотором участке коммуникаций теплосетей на основе ТНМ при $m = 2$ и $n = 3$: x_1 – "коррозия трубы", x_2 – "разрыв трубы", y_1 – "утечка воды", y_2 – "парение", y_3 – "провал земли" [5].

Между x_i и y_j существуют нечеткие причинные отношения $r_{ij} = x_i \rightarrow y_j$. Все нечеткие отношения можно представить в виде матрицы R с m строками и n столбцами, т. е. существует матрица нечетких отношений

$$R = [r_{ij}]; \quad i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n}; \quad r_{ij} \in [0, 1].$$

Конкретные входы (предпосылки) и выходы (заключения) системы можно рассматривать как нечеткие множества A и B на пространствах X и Y . Обозначим отношения этих множеств как $B = A \circ R$, где R – матрица, отражающая знания эксперта (экспертов) о влиянии факторов на симптомы; " $\circ$ " – есть правило композиции нечетких выводов. Направление выводов является обратным к направлению входов для правил. То есть в случае диагностики R (знания эксперта) наблюдаются выходы B (симптомы) и определяются входы A (факторы).

Знания эксперта при $m = 2$, $n = 3$ имеют вид:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \end{bmatrix}. \text{ Пусть, например, } R = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 & 0.2 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix},$$

где первый столбец соответствует симптому y_1 ; второй столбец – симптому y_2 ; третий столбец – симптому y_3 .

При этом причиной появления, например, симптома y_1 , является фактор x_1 со степенью соответствия $r_{11} = \mu_1$ и фактор x_2 со степенью соответствия $r_{21} = \mu_2$. Значения степеней соответствия напоминают собой вероятности (классические), но при этом не требуется, чтобы $\sum_{i=1}^m \mu_i = 1$, т. е. сумма $(\mu_1 + \mu_2)$ не должна обязательно равняться единице, как в классической теории вероятностей.

Пусть в результате поверхностного осмотра места аварии на некотором участке коммуникаций ГИК состояние этого участка оценивается экспертом как $B = b_1/y_1 + b_2/y_2 + b_3/y_3$, т. е. симптом y_i , $j = \overline{1,3}$ имеет место со степенью соответствия $b_j = \mu_j$, $j = \overline{1,3}$. Например,

$$B = 0.9/y_1 + 0.1/y_2 + 0.2/y_3. \quad (2.1)$$

Требуется определить причину такого состояния:

$$A = a_1/x_1 + a_2/x_2. \quad (2.2)$$

Представим формулы для B и A в виде строк:

$$B = [b_1; b_2; b_3], A = [a_1; a_2], \quad (2.3)$$

где $b_j, a_i \in [0,1]$; $j = \overline{1,3}$; $i = \overline{1,2}$.

Тогда

$$B = [0.9; 0.1; 0.2]. \quad (2.4)$$

Формулу $B = A \circ R$ можно представить в виде

$$[b_1; b_2; b_3] = [a_1; a_2] \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \end{bmatrix},$$

или

$$[0.9; 0.1; 0.2] = [a_1; a_2] \circ \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 & 0.2 \\ 0.6 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

или, транспонируя, в виде нечетких векторов-столбцов

$$\begin{bmatrix} 0.9 \\ 0.1 \\ 0.2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.6 \\ 0.1 & 0.5 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad (2.6)$$

где " $\circ$ " – операция максиминной ($\max$ – $\min$) свертки.

При этом вычисляется "произведение" вектора A и матрицы R , но вместо операции умножения выполняется операция взятия минимума (" $\wedge$ " – $\min$), а вместо операции сложения – выполняется операция взятия максимума (" $\vee$ " – $\max$) соответственно.

Тогда (2.6) можно привести к виду:

$$0.9 = (0.9 \wedge a_1) \vee (0.6 \wedge a_2) \quad (2.7)$$

$$0.1 = (0.1 \wedge a_1) \vee (0.5 \wedge a_2) \quad (2.8)$$

$$0.2 = (0.2 \wedge a_1) \vee (0.5 \wedge a_2), \quad (2.9)$$

Решим систему (2.7)–(2.9). В уравнении (2.7) второй член правой части не влияет на левую часть. Поэтому:

$$0.9 = 0.9 \wedge a_1 \Rightarrow a_1 \geq 0.9. \quad (2.10)$$

Из (8) получим:

$$0.1 \geq 0.5 \wedge a_2 \Rightarrow a_2 \leq 0.1. \quad (2.11)$$

Формулы (2.10), (2.11) удовлетворяют выражению (2.9). Таким образом, получаем решение:

$$0.9 \leq a_1 \leq 1.0; \quad 0 \leq a_2 \leq 0.1, \quad (2.12)$$

т. е. лучше устранить фактор x_1 (a_1 – параметр, характеризующий проявление фактора x_1 ; a_2 – параметр, характеризующий проявление фактора x_2).

Таким образом, задачу диагностики можно рассматривать как моделирование с помощью системы уравнений 1-го порядка, где дизъюнкция заменяется на максимум, а конъюнкция – на минимум.

На практике m и n могут принимать значения от нескольких единиц до нескольких десятков. Можно использовать несколько правил композиции нечетких выводов и могут быть построены 2- и 3-каскадные нечеткие системы принятия решений.

При этом решение будет получено как значение на отрезке (2.12), в результате чего можно предположить максимальное $\begin{bmatrix} 1.0; & 0.1 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix}$ и минимальное $\begin{bmatrix} 0.9; & 0 \\ a_1 & a_2 \end{bmatrix}$ решение.

В общем случае очевидно, что для композиции максимум-минимум существует единственное максимальное и несколько "меньших" решений. Таким образом, решение – это вектор значений, каждое из которых принадлежит некоторому отрезку (лежащему в интервале от 0 до 1).

Аналогичная модель может быть построена и для определения предпосылок, приводящих к появлению факторов (причин) предложенной выше модели диагностики. Например, можно выявить из-за чего возникает коррозия, разрыв трубы, построить соответ-

ствующую матрицу бинарных отношений R и снова применить правило композиции нечетких выводов.

Довольно часто из-за проявления субъективного человеческого фактора (незначительных ошибок эксперта) при оценивании состояния участка ГИК не удастся получить точное решение для системы $B = A \circ R$. В этом случае предлагается найти ближайшее ("минимальное" по сумме абсолютных отклонений от нуля для каждого из уравнений указанной выше системы) приближенное решение (или решения) системы $B = A \circ R$ и принять или отклонить полученное приближенное (одно из приближенных решений).

Очевидно, что приемлемое приближенное решение должно незначительно (на 0.1–0.3 по сумме абсолютных отклонений) отличаться от точного решения системы $B = A \circ R$. Если суммарное отклонение довольно большое (с точки зрения эксперта), следует предложить самому эксперту снова оценить состояние участка ГИК, так как очевидно, что при первом оценивании он ввел противоречивые оценки состояния ГИК.

Лекция

Тема 1.3.3. Современные мехатронные системы (Мехатронные системы в автоматизированном машиностроении)

ВОПРОСЫ

1. Робототехнологический комплекс механообработки.
2. Мехатронный обрабатывающий центр MS630.
3. Мехатронная установка для контроля резьб нефтяного сортамента «Микрон-2».

ЛИТЕРАТУРА

6. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с. 167-175).
7. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5 с. 51-57).

1. Робототехнологический комплекс механообработки

В настоящее время для механообработки деталей сложной формы в основном применяются многокоординатные станки и обрабатывающие центры с ЧПУ. Однако существует ряд операций сложной фасонной обработки со сниженными требованиями к точности, где применение такого дорогостоящего оборудования становится нецелесообразным. На таких операциях рационально применять технологические роботы. Это обусловлено тем, что манипуляторы обладают развитой кинематической структурой, что позволяет выполнять механообработку сложных деталей за один установ, повышая таким образом производительность робототехнологического комплекса (РТК). Также имеется возможность использовать робот не только на основных технологических операциях, но и одновременно в качестве измерительной машины или загрузочного устройства.

Робототехнологический комплекс предназначен для выполнения операций механообработки деталей из пластмасс и легких сплавов. К числу типичных операций относятся зачистка заусенцев, снятие облоя, шлифование контуров и поверхностей, сверление отверстий, снятие фасок. РТК разработан в рамках программы научно-технического сотрудничества между МГТУ "СТАНКИН" и Будапештским техническим университетом. В состав РТК входят (рис. 4.5):

- промышленный робот РМ-01, включающий манипулятор "PUMA- 560" и устройство управления "Сфера-36";
- компьютер верхнего уровня типа IBMPC;
- блок пневмоэлектроаппаратуры;
- сменные рабочие органы (схваты, инструментальные головки) и комплект режущего инструмента (фрезы, напильники, металлические щетки) для обработки деталей, закрепленных на технологическом столе;
- устройство силомоментного очувствления с блоком ввода аналоговых сигналов в устройство управления и многофункциональный адаптер ввода-вывода сигналов в компьютер.

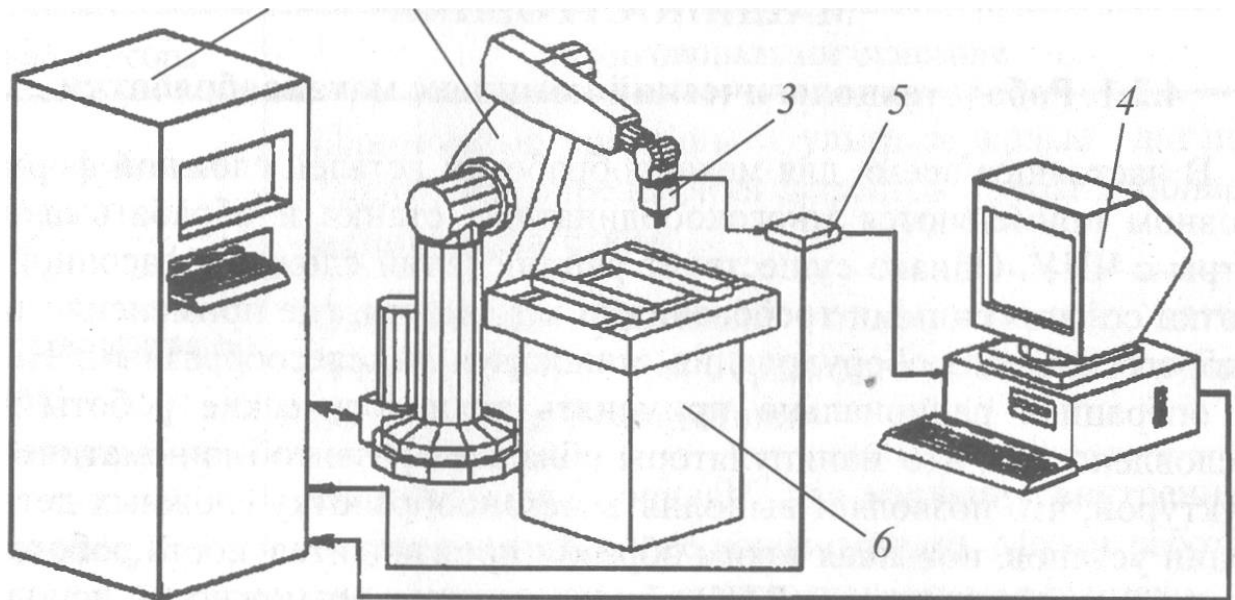


Рис. 4.5. Робототехнологический комплекс механообработки на базе робота РМ-01:

1 – манипулятор "PUMA-560"; 2 – устройство управления "Сфера-36";
3 – рабочий орган; 4 – компьютер верхнего уровня управления; 5 – устройство
силомоментного оцувствления; 6 – технологический стол

Для выполнения на РТК технологических производственных процессов возможно включение в его состав роликового транспортера и механизма подачи палет с заготовками, а также поворотного стола с фиксаторами. Технологическое оборудование РТК обеспечивается пневмопитанием под давлением 0,5 МПа. В качестве рабочего органа используется специальная пневмоголовка (производства фирмы Nokia, Финляндия), которая крепится к наружному фланцу силомоментного датчика (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Рабочий орган робота с силомоментным датчиком

Основные технические характеристики пневмоголовки: мощность 160 Вт, частота вращения выходного вала 28000 мин^{-1} , масса 1,5 кг.

Электромеханический манипулятор "PUMA-560" (см. рис. 1.13) антропоморфного типа имеет 6 вращательных степеней подвижности. Грузоподъемность робота 2,5 кг, точность позиционирования 0,1 мм.

Устройство управления "Сфера" предназначено для позиционного и контурного управления движениями манипулятора. Система является многопроцессорной и двухуровневой: она содержит центральный процессор и шесть процессоров приводов. Модули устройства имеют унифицированные шины внутренней связи (типа Q-BUS) и стандартный интерфейс связи с технологическим оборудованием. Устройство силомоментного очувствления (УСМО) состоит из двух функциональных модулей: датчика силы и блока обработки силомоментной информации. Датчик

силы конструктивно выполнен в виде плоских крестообразных пластин, на грани которых наклеены тензорезисторы. Конструкция датчика предусматривает измерение трех компонент вектора силы, действующей на рабочий орган робота: силы, перпендикулярной фланцу датчика силы (F_z), и двух моментов в плоскости фланца (M_x и M_y). В качестве чувствительных элементов используются фольговые тензорезисторы типа КФ 5П1-3200-А12. Датчик изготовлен из алюминиевого сплава Д16-Т, обладающего высоким значением модуля Юнга и малой удельной массой.

Блок обработки силомоментной информации предназначен для преобразования сигналов с тензоусилителя в три информационных сигнала о векторе сил, действующем на рабочий орган. Блок выполнен в виде отдельной платы и установлен в корпус тензоусилителя.

Технические характеристики устройства силомоментного очувствления:

- число измеряемых компонент вектора сил - 3 (осевая нагрузка до 50 Н; поперечные силы по осям Х и Т до 25 Н на плече 0,12 м);
- диапазон выходных сигналов для ввода в компьютер от -5 В до + 5 В, для ввода в "Сферу-36" - 0...5 В;
- погрешность выходного сигнала не более 2 % номинала.

При управлении роботом на операциях механообработки основная функция компьютера состоит в обработке сигналов от датчика силомоментного очувствления и выработке сигналов коррекции движения. Если датчик сил и моментов содержит встроенный микропроцессор, то организация обмена информацией с компьютером не представляет труда. В противном случае необходимо использовать многофункциональный адаптер (МА), который осуществляет согласование аналоговых и цифровых сигналов с системной шиной компьютера.

Адаптер содержит следующие функциональные узлы: аналого- цифровой преобразователь с коммутатором на входе, цифро-аналоговый преобразователь, устройство параллельного ввода-вывода и таймер. Серийный комплект устройства управления "Сфера-36" не имеет возможности ввода и обработки аналоговой информации, поэтому на базе стандартного модуля аналогового ввода (МAB) этой стойки управления был реализован контроллер ввода аналоговых сигналов с силомоментного датчика. Шесть каналов модуля МAB служат для ввода сигналов с потенциометрических датчиков, расположенных в степенях подвижности манипулятора. Оставшиеся два канала АЦП, которые в штатном режиме используются для

тестирования системы, переведены в режим связи с внешними генераторами сигналов. Связь между устройством управления "Сфера" и компьютером обеспечивается специальными драйверами.

Программирование движений технологического робота проводится с помощью специально разработанного комплекса подготовки управляющих программ (рис. 4.7). Таким образом, данный робототехнологический комплекс механообработки реализует современную концепцию построения производственных систем типа CAD/CAM, когда автоматизированное проектирование изделия и его автоматическое изготовление интегрированы в единую систему и задача пользователя состоит только в подготовке исходной компьютерной модели детали [92]. Данный подход имеет следующие основные преимущества:

- сокращается время на переналадку робота по сравнению с режимом обучения;
- используется единая среда программирования, если возможно программировать несколько роботов на одном рабочем месте;
- обеспечивается предварительная проверка логики работы робота, анализ его поведения в аварийных и нештатных ситуациях;
- человек-оператор выводится из потенциально опасной рабочей зоны;
- система программирования робота интегрируется с базами данных САПР;
- за счет применения языков высокого уровня становится возможным составление сложно структурированных программ, оптимизация движений робота по различным критериям.

В состав разработанной системы автоматизированного программирования входят четыре основные компонента: подсистема геометрического моделирования, подсистема моделирования динамической системы робот-рабочий орган-инструмент-рабочий процесс, подсистема программирования и оптимизации траекторий движения технологического робота, база данных технологических элементов.

Для начала выполнения программы необходимо выполнить привязку системы координат, задав в режиме дистанционного обучения исходную точку в рабочей зоне робота. Затем происходит автоматическое выполнение функционального движения, при этом сила резания поддерживается на заданном уровне за счет регулирования контурной скорости рабочего органа (подробно алгоритм управления рассмотрен далее).



Рис. 4.7. Система автоматизированного программирования движений технологического робота

2. Мехатронный обрабатывающий центр MS 630

Мехатронный обрабатывающий центр MS630 предназначен для высокоскоростной пятикоординатной обработки изделий со сложными пространственными

формами [15]. Центр разработан в ОКБС и изготовлен на станкозаводе "Свердлов" (Санкт-Петербург).

Компоновка машины построена по блочно-модульному принципу на базе мехатронных модулей движения. В состав центра входят шесть мехатронных модулей движения (ММД): четыре низкооборотных ММД для перемещения шпиндельной бабки и обрабатываемого изделия, один высокоскоростной модуль типа "мотор-шпиндель" и мехатронный модуль линейного выдвижения шпинделя.

Технические характеристики центра MS630

Число одновременно управляемых координат	5
Габариты (без дополнительного оборудования), мм	3020 x 1650 x 2500
Максимальные размеры обрабатываемого изделия, мм	500 x 500 x 400
Рабочая поверхность стола, мм	630
Точность позиционирования мехатронных модулей:	
❖ вращательные модули, угл. с	2,0
❖ линейный модуль, мкм	3
Грузоподъемность поворотного стола, кг	500
Скорость быстрого перемещения:	
вдоль оси шпинделя, мм/мин	20 000
поворотного стола, мин ⁻¹	18
Скорость вращения шпинделя, мин ⁻¹	200.. .24000
Мощность главного привода, кВт	20
Момент привода поворота стола, Н м	1200
Инструментальный магазин, позиция	12

3. Мехатронная установка для контроля резьб нефтяного сортамента «Микрон-2»

Разработчиком и производителем установки для контроля резьб нефтяного сортамента является фирма ООО "ИнСис Лтд" (рис. 4.8). Установка предназначена для автоматизации контроля наружных и внутренних резьб нефтяного сортамента в цеховых условиях. Автоматизация контроля резьб на трубных базах обеспечивает значительное повышение надежности и уменьшение брака при бурении и капитальном ремонте скважин.

В состав установки входят измерительный блок со сменной перископической насадкой и блок управления на базе промышленного компьютера. Возможны стационарный и портативный варианты исполнения.

Основные преимущества мехатронной установки "Микрон-2":

- ❖ универсальность установки для контроля различных типов внутренних и наружных резьб;
- ❖ бесконтактный метод измерений и полная замена ручного контроля калибрами;
- ❖ 100%-ный контроль каждой трубы или муфты непосредственно на линии производства или ремонта;
- ❖ контроль всех параметров резьбы по ГОСТу, высокая точность и повторяемость результатов;
- ❖ возможность измерения толщины стенки под резьбой и внутренней фаски

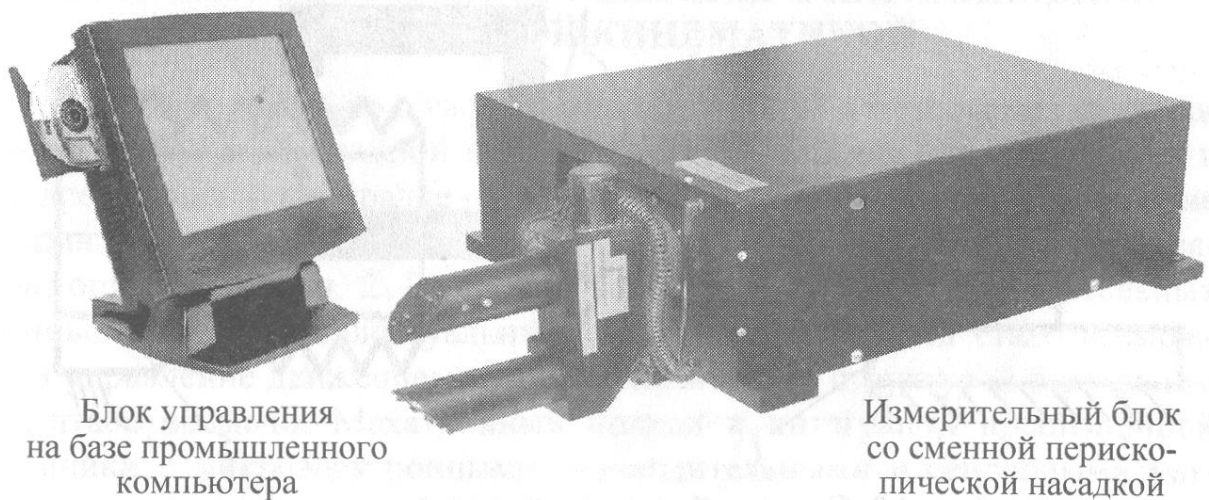


Рис. 4.8. Мехатронная установка контроля резьб нефтяного сортамента "Микрон-2"

- ❖ высокая надежность, отсутствие специальных требований к обслуживающему персоналу;
- ❖ отсутствие особых требований к базированию труб на позиции контроля;
- ❖ малые габариты и масса;
- ❖ сохранение результатов измерений в базе данных и отображение в виде графических и текстовых протоколов с возможностью распечатки;
- ❖ связь установки с АСУ производства для паспортизации труб.

Принцип работы основан на коноскопической профилометрии, т.е.

бесконтактном измерении геометрии резьбы, лазерным сканированием заданного количества сечений (рис. 4.9). Применяемая технология измерений обеспечивает высокую степень инвариантности к состоянию поверхности резьбы и позволяет использовать один лазерный микрометр для контроля различных типоразмеров с помощью сменных перископических насадок.

Сканирование отдельных профилей резьбы осуществляется мехатронным модулем на базе линейного двигателя со статором из редкоземельных магнитов, который реализует поступательное перемещение оптоэлектронного блока вдоль оси трубы. Привод вращения перископической насадки обеспечивает сканирование нескольких полных сечений резьбы контролируемого изделия. Уникальная технология "вращающегося лазерного луча" обеспечивает контроль и компенсацию погрешностей базирования, возникающих при установке труб/муфт на позиции контроля, а также позволяет контролировать толщину стенки под резьбой и внутреннюю фаску.

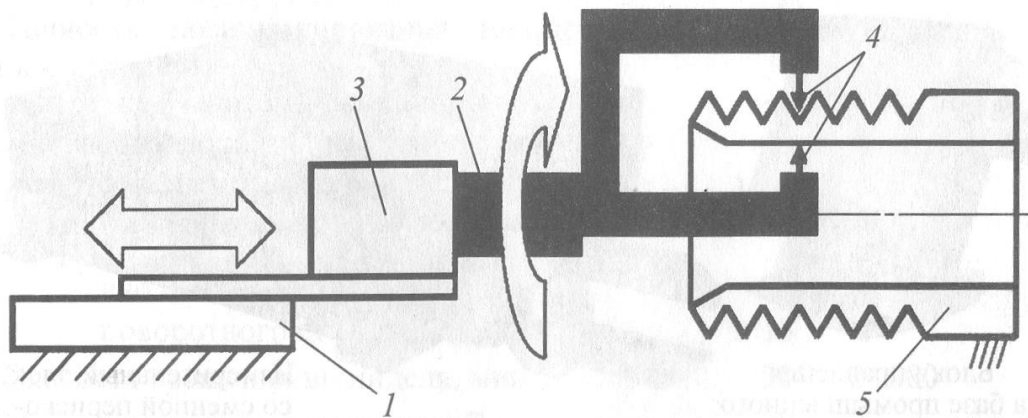


Рис. 4.9. Схема работы мехатронной установки:

1 – линейный двигатель; 2 – привод вращения перископической насадки;
3 – лазерный микрометр; 4 – луч лазера; 5 – контролируемое изделие

Специализированное программное обеспечение использует полученные данные для дифференцированного поэлементного контроля отдельных параметров резьбы. По результатам измерений автоматически определяется соответствие резьбы требованиям ГОСТа и ее пригодность для последующего применения. Установка может работать как автономно, так и в составе АСУ производства с выдачей полученных результатов измерений и служебных сигналов в цифровой форме. Основными контролируемыми параметрами являются: шаг и длина резьбы, высота профиля, угол наклона стороны профиля, радиус закругления вершины и впадины профиля, конусность, диаметры и длина резьбы, толщина стенки под резьбой.

Основные технические характеристики установки

Разрешающая способность измерений, мкм 1

Погрешность измерений, мкм 15

Время контроля одной трубы, с, не более 90

Условия эксплуатации Цеховые

Требования к базированию труб:

точность позиционирования по продольной

оси, мм $\pm 2,0$

точность позиционирования торца, мм $\pm 5,0$

Предварительно на поверхность резьбы должен быть нанесен слой мелкодисперсного талька методом напыления.

Лекция

Тема 1.3.4. Современные мехатронные системы (Производственные машины с параллельной и гибкой кинематикой)

ВОПРОСЫ

1. Мехатронный центр «ГЕКСAMEX-1» для аэрокосмической промышленности.
2. Технологические и координатно-измерительные мехатронные машины фирмы «ЛАПИК».
3. Мехатронный робот-станок «РОСТ 300».

ЛИТЕРАТУРА

8. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с. 175-180).
9. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5 с. 57-62).

Как было показано, именно принципы и методы мехатроники являются фундаментальной и практической базой для проектирования и внедрения машин с параллельной и гибридной кинематикой. Построение машин этого класса основано на использовании трех методов интеграции, описанных ранее. Благодаря появлению высокопроизводительных компьютеров и интеллектуальных мехатронных модулей стало возможным управление движением машин с нелинейной структурой в реальном масштабе времени. Мехатронный подход к интеграции прецизионной механики с микроэлектронными, вычислительными и сенсорными устройствами делает перспективным создание и внедрение машин с параллельной и гибридной кинематикой в различных отраслях промышленности.

1. Мехатронный центр «ГЕКСAMEX-1» для аэрокосмической промышленности

В сентябре 2003 года мехатронный центр "ГЕКСAMEX-1" был представлен на международной промышленной выставке в Москве [60]. Центр разработан специалистами ряда российских научно-исследовательских институтов: Национального института авиационных технологий (НИАТ), Новосибирского государственного технического университета, компании "Сибирь - Мехатроника" и других организаций. Производитель машины - Савеловский машиностроительный завод.

Общий вид центра показан на рис. 4.10.

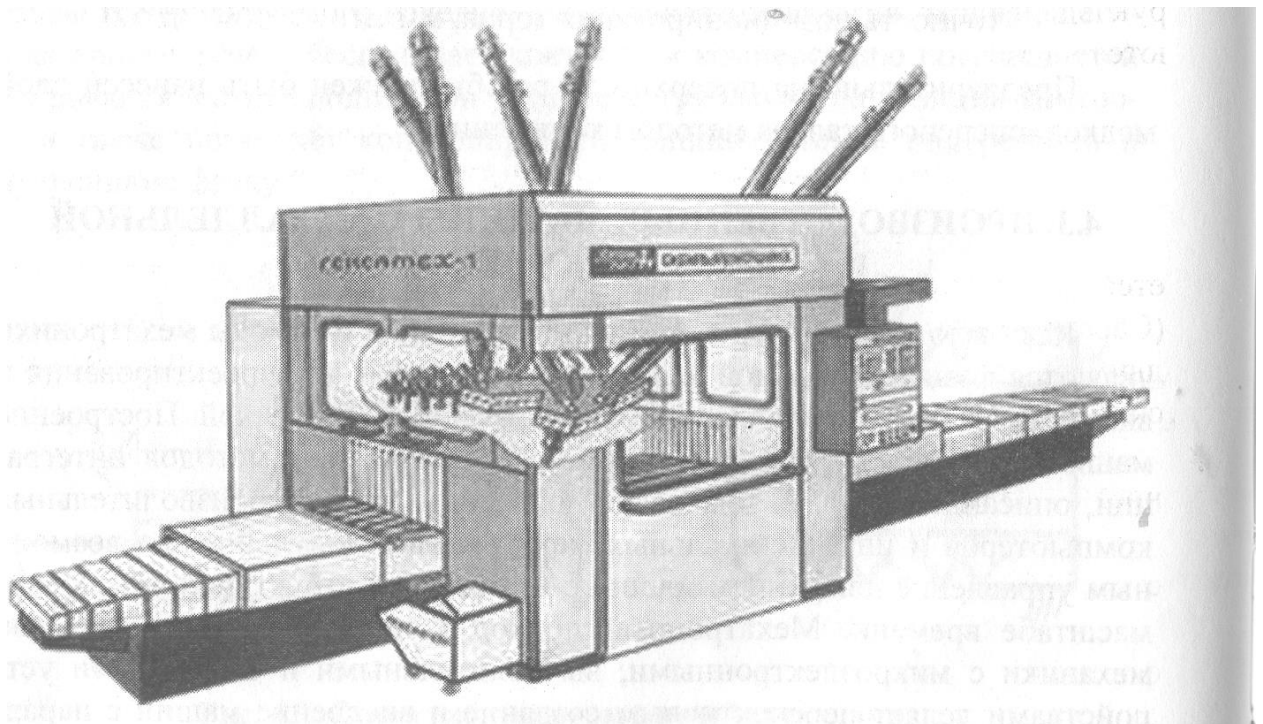


Рис. 4.10. Мехатронный центр "ГЕКСAMEX-1"

Центр предназначен для механообработки длинномерных (до 3 м) изделий в авиакосмической промышленности. Для этого в состав машины входит рабочий стол с линейным перемещением. Гексапод, имеющий шесть управляемых стержней, установлен на стальном восьмиугольном основании. Подвижная платформа, несущая шпиндель, изготовлена из сплава на основе титана и укреплена стальными секциями. Оптимизация конструкции мехатронной машины выполнена с помощью специальных программ, разработанных компанией "Сибирь - Мехатроника". Инструментальный магазин имеет 24 позиции.

Основные технические характеристики гексапода

Рабочая зона, мм 3000x800x700

Ориентация рабочего органа, °:

- относительно оси В ± 30
- относительно оси А ± 25
- по обеим осям в центре рабочей зоны ... ± 45

Мощность шпинделя, кВт 30

Максимальная скорость вращения, мин 30000

Максимальная скорость перемещения, м/мин 30

Максимальное ускорение 1 g

Точность перемещения (на расстоянии
1000 мм), мкм 100

Машина оснащена системой ЧПУ PA 8000 NT HS фирмы Power Automaton GmbH, которая имеет открытую архитектуру. Для исключения особых и недопустимых конфигураций и движений гексапода был разработан специальный программный модуль. Этот модуль контролирует предельные значения скорости и ускорения в приводах, исключает возможность достижения границ рабочей зоны линейными или ориентирующими степенями подвижности. Все опасные ситуации визуализируются на дисплее системы управления.

2. Технологические и координатно-измерительные мехатронные машины фирмы "ЛАПИК"

Примером отечественной технологической машины-гексапода является прецизионное оборудование, предлагаемое ЗАО "ЛАПИК" (Саратов). Фирма выпускает на единой конструктивной базе гексаподы двух типов: координатно-измерительные машины (КИМ) и технологические модули (ТМ) для механообработки.

Сочетание функций обрабатывающего центра и КИМ дает возможность:

- точно "координировать" новые участки к уже готовым поверхностям;
- корректировать траектории движения инструмента с учетом деформации обрабатываемой детали (это особенно важно при обработке длинномерных изделий повышенной точности);
- аттестовывать и при необходимости дорабатывать изделия на одном рабочем месте.

Технологические модули предназначены для фасонной обработки изделий с высокой точностью методами фрезерования, шлифования, сверления, полирования, а также для выполнения операций гравировки, растачивания, разметки. Рабочая зона гексаподов варьируется у различных моделей в диапазонах: по оси X - 500...3000 мм, по оси Y - 400... 1400 мм, по оси Z- 350...750 мм. Максимальный угол

поворота подвижной платформы относительно каждой из осей составляет в $45...60^\circ$, скорость ее движения задается программно в интервале $0,01... 160$ мм/с. Технологические машины оснащаются мехатронными модулями типа "мотор-шпиндель" мощностью от $1,5...7,5$ кВт с регулируемой частотой вращения в диапазоне $400...24000$ мин⁴.

КИМ выполняют автоматические измерения и контроль размеров деталей (в том числе легкодеформируемых изделий) от конструкторских или технологических баз. Погрешность объемных измерений для КИМ-500 (машина базового исполнения) не превышает $3,8$ мкм для измеряемого размера $L = 300$ мм. В машинах специального прецизионного исполнения этот показатель достигает значения $1,1$ мкм. Измерения выполняются с помощью специальной головки-щупа, оснащенной датчиками механического или токового касания. Контактное усилие при токовом касании не превышает $0,0003$ Н, что позволяет измерять податливые и мелкоструктурные детали. Погрешность позиционирования рабочего органа для технологических машин типа ТМ составляет $5,0$ мкм (на перемещениях на расстояние до 300 мм).

3. Мехатронный робот-станок "РОСТ 300"

Мехатронный робот-станок предназначен для финишной обработки: пера лопаток газовых и паровых турбин, энергетических станций и установок, газотурбинных двигателей, лопастей водяных турбин, гребных винтов различного назначения [4]. Схема станка представлена на рис. 4.11. Создание этой мехатронной машины вызвано необходимостью стабилизации геометрических параметров и качества поверхности лопаток, определяющих вибрационные и шумовые характеристики турбоагрегатов, а также автоматизировать тяжелые и вредные для здоровья человека технологические операции.

Машина имеет нелинейную компоновку, отличием которой является отсутствие традиционных прямолинейных направляющих (см. п. 1.1). Все формообразующие движения реализуются мехатронными модулями вращательного типа. Мехатронные модули построены на базе высокомоментных двигателей серии ТМА швейцарской фирмы ETEL S.A., кото-

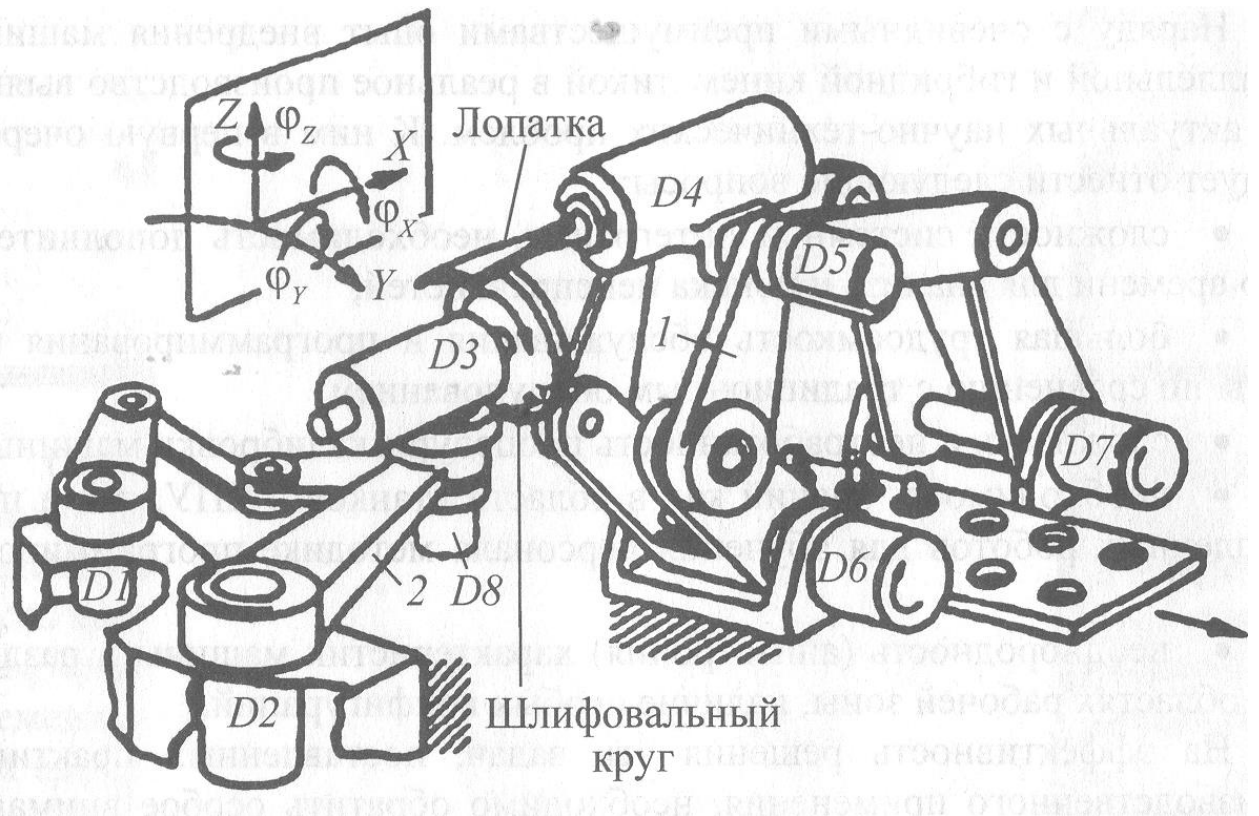


Рис. 4.11. Схема робота-станка "РОСТ 300" (ИМАШ РАН, ОАО "Микрон")

рые встроены в конструкцию машины. Станок оснащен цифровыми сервоприводами "Indramat DIAX04" и устройством числового программного управления серии PA8000NT фирмы Power Automation AG. Оптикоэлектронная измерительная система позволяет осуществлять контроль обрабатываемой поверхности заготовки с целью привязки к базовым поверхностям станка и задания оптимальных режимов обработки.

Технические характеристики робота-станка "РОСТ 300"

Число одновременно управляемых координат	6
Масса машины, кг	2500
Максимальные размеры обрабатываемого изделия, мм	150 x 40 x 80
Диаметр шлифовального круга, мм	30... 80
Точность контурной обработки, мм	0,025
Пределы рабочих подач по осям, м и н	1 2 0 . . . 2000
Скорость быстрого перемещения, мм/мин	24 000
Скорость вращения шлифовального электрошпинделя, мин ⁻¹	6000... 24 000

Наряду с очевидными преимуществами опыт внедрения машин с параллельной и гибридной кинематикой в реальное производство выявил ряд актуальных

научно-технических проблем. К ним в первую очередь следует отнести следующие вопросы:

- ❖ сложность системной интеграции, необходимость дополнительного времени для анализа и поиска неисправностей;
- ❖ большая трудоемкость обслуживания и программирования машины по сравнению с традиционным оборудованием;
- ❖ сложность и неотработанность процедуры калибровки машины;
- ❖ необходимость знаний как в области станков с ЧПУ, так и промышленных роботов для обучения персонала методике программирования;
- ❖ неоднородность (анизотропия) характеристик машины в различных областях рабочей зоны, наличие особых конфигураций.

На эффективность решения эти задач, поставленных практикой производственного применения, необходимо обратить особое внимание при создании машин нового поколения.

Лекция

Тема 1.3.5. Методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем (Подход к проектированию интегрированных мехатронных модулей и систем)

ВОПРОСЫ

1. Уровни интеграции в мехатронных системах.
2. Традиционный и параллельный алгоритмы проектирования мехатронных систем.

ЛИТЕРАТУРА

10. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с. 87-98).
11. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5 с. 62-70).

1. Уровни интеграции в мехатронных системах

Основой метода мехатроники является интеграция составляющих частей, которая закладывается на этапе проектирования и затем реализуется в технологических процессах производства и эксплуатации мехатронных модулей и систем. На

современном этапе развития мехатроники особенно актуальным является решение следующих интеграционных задач:

1. Функциональная, структурная и конструктивная интеграция элементов в мехатронных модулях.
2. Аппаратно-программная интеграция исполнительных и интеллектуальных элементов в интеллектуальных мехатронных модулях.
3. Разработка и внедрение гибридных технологий производства интегрированных модулей и машин.
4. Создание информационных сред для поддержки решений междисциплинарных мехатронных задач.
5. Построение математических и компьютерных моделей мехатронных модулей и систем, отражающих их интеграционную специфику.
6. Интеграционные подходы в организационно-экономической деятельности предприятий, выпускающих мехатронные изделия.
7. Междисциплинарная подготовка специалистов, способных к системной интеграции в области мехатроники.

На рис. 2.1 показана иерархия уровней интеграции в мехатронных системах.

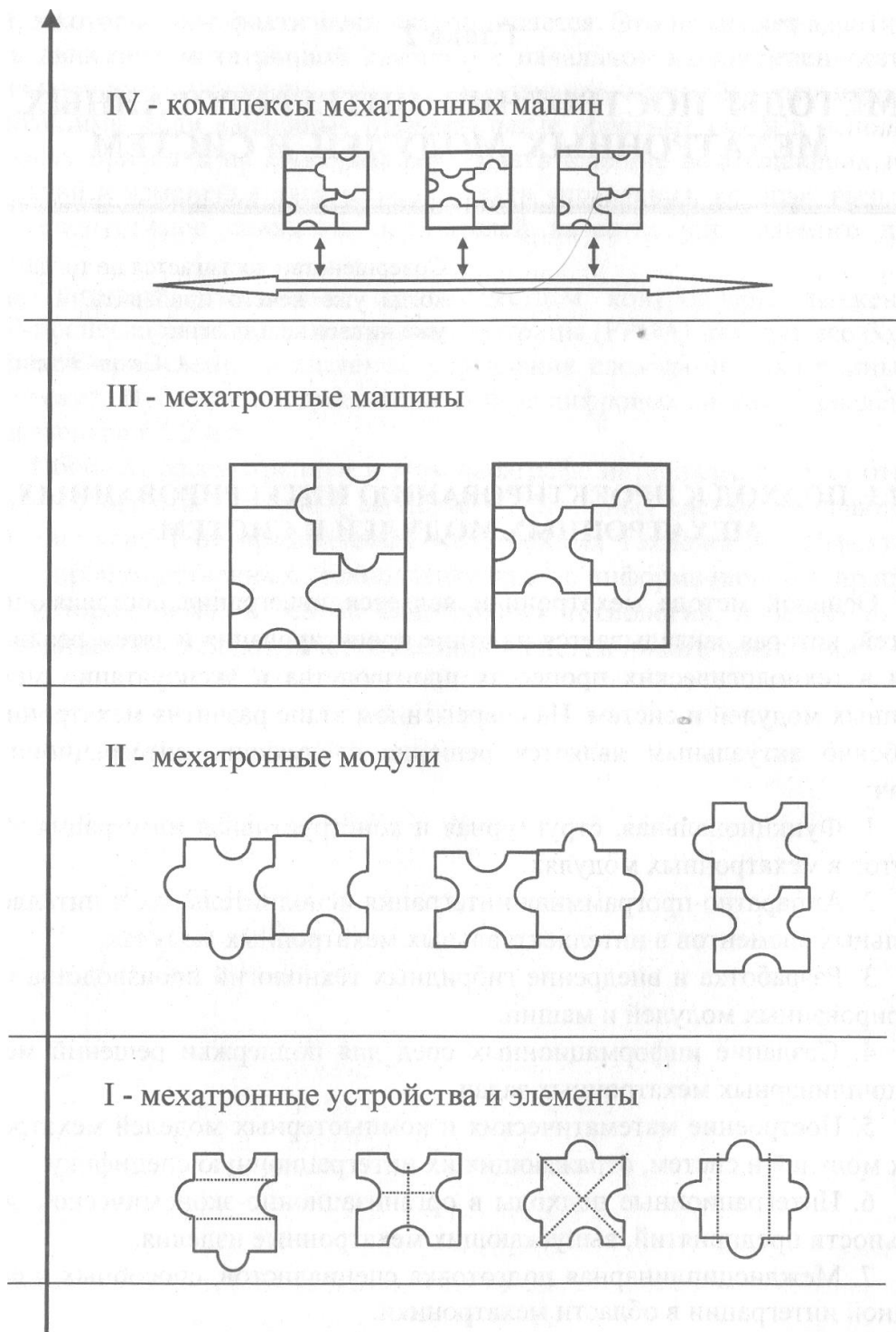


Рис. 2.1. Уровни интеграции в мехатронных системах

Первый уровень интеграции образуют мехатронные устройства и составляющие их элементы. Второй уровень включает интегрированные мехатронные модули. Набор мехатронных устройств определяет тип мехатронного модуля. В общем случае для интеллектуального модуля можно выделить две основные группы устройств: в исполнительную группу входят механические устройства и двигатели,

а группа интеллектуальных устройств является совокупностью электронных, информационных и управляющих компонентов. На третьем уровне интеграции из мехатронных модулей komponуются многокоординатные мехатронные машины. Высший (четвертый) уровень предполагает построение на единой интеграционной платформе комплексов мехатронных машин для реконфигурируемого производства.

В целом проектирование мехатронных систем является сложной многофакторной проблемой выбора и оптимизации принимаемых технических и технологических, организационно-экономических и информационных решений. Раскрытие всех возникающих при этом закономерностей и связей выходит далеко за оговоренные рамки этой книги. Здесь мы сосредоточим внимание только на одной, но крайне важной проектной задаче - интеграции элементов в мехатронных модулях и машинах.

Узким местом (по-английски "bottleneck" - бутылочное горлышко) мехатронных модулей и машин являются интерфейсы между составляющими устройствами и элементами.

Понятие **"интерфейс"** является ключевым для предлагаемого подхода к проектированию мехатронных модулей и систем. В первую очередь отметим, что взаимодействие основных устройств в мехатронной системе осуществляется не напрямую, а через некоторые соединительные блоки, обозначенные на рисунке стрелками. С физической и технической точки зрения это могут быть совершенно различные устройства, однако они имеют одинаковое функциональное назначение. Их главная функция - это выполнение энергетического и информационного обмена между сопрягаемыми структурными элементами системы.

В данном представлении будем трактовать понятие "интерфейс" применительно к мехатронным системам именно в таком - расширительном смысле. Место интерфейса в структуре мехатронной системы задается связями с входными и выходными устройствами. Технические характеристики интерфейса определяются способом и процедурой передачи (при необходимости - преобразования, хранения и синхронизации) воздействий, сигналов и информации, а также аппаратно-программной реализацией используемых каналов связи.

1.1. Основные интерфейсы мехатронной системы

Характеристики интерфейса

Устройство на входе	Устройство на выходе	Передаваемые воздействия/ сигналы/ информация
Человек-оператор или компьютер верхнего уровня	Устройство компьютерного управления (УКУ)	Цель движения
УКУ	Силовые электронные преобразователи	Сигналы управления приводами
Силовые электронные преобразователи	Исполнительные двигатели	Управляющие напряжения
Исполнительные двигатели	Механическое устройство	Движущие силы и моменты
Механическое устройство	Информационное устройство	Информация о состоянии механического устройства
Исполнительные двигатели	Информационное устройство	Информация о состоянии двигателей
Информационное устройство	УКУ	Сигналы обратной связи

"Проблема интерфейсов" обусловлена многогранностью структурного и технологического базисов мехатроники. В табл. 2.1 перечислены основные мехатронные интерфейсы, обозначенные направленными стрелками в обобщенной структуре мехатронных машин.

Как следует из приведенной таблицы, многочисленные интерфейсы в мехатронной машине связывают устройства различной физической природы (механические, электронные и информационные), что предопределяет их конструктивную и аппаратно-программную сложность. При традиционном проектировании интерфейсы представляют собой самостоятельные устройства и узлы. Обычно это блоки, которые выпускаются специализированными фирмами, но многие интерфейсы приходится разрабатывать и изготавливать самим пользователям. В машине с компьютерным управлением по трем координатам, построенной на традиционных приводах, только для связи основных устройств необходимо соединить порядка

100 сигнальных и силовых проводов. Опыт эксплуатации комплексных машин и систем показывает, что до 70 % проблем их функционирования связаны с надежностью связей и соединений.

Суть мехатронного подхода состоит в объединении элементов в интегрированные модули уже на этапах проектирования и изготовления, освобождая таким образом конечного потребителя от решения "проблемы интерфейсов" при эксплуатации мехатронной машины.

Интегрированные мехатронные модули и машины отличаются повышенной надежностью, устойчивостью к неблагоприятным внешним воздействиям, точностью выполнения движений, модульностью и компактностью конструкции. С точки зрения потребителя - это целостные изделия, удобные при настройке и программировании движений. Интегрированные решения, в конечном счете, экономически выгодны для потребителя, так как машина принимается "под ключ", упрощается ее сервис и повышается ремонтпригодность.

Безусловно, системы с глубокой степенью интеграции элементов имеют и обратную сторону - такие машины являются менее гибкими, т.е. имеют ограниченные возможности для модернизации и реконфигурации. Поэтому мехатроника предлагает конечным потребителям мехатронные модули различного уровня интеграции, что позволяет находить разумный компромисс для конкретных задач автоматизации.

Идея интеграции широко используется в инженерной практике при проектировании устройств и систем самого различного назначения. Характерным примером реализации этой инженерной идеи в бытовой технике является MP3-Player - современное цифровое устройство, в котором объединены аудио-плеер, радиоприемник, диктофон и магнитофон. Очевидны преимущества этого комбинированного устройства - multifunctionality, компактность, выигрыш в цене по сравнению с покупкой всех компонент отдельно, пользователь освобожден от проблем с подключением кабелей и разъемов. Однако покупатель должен четко отдавать себе отчет в том, что это система негибкая, отдельные ее компоненты нельзя заменить и модернизировать, все они могут эксплуатироваться и ремонтироваться только совместно.

Решение "проблемы интерфейсов" в мехатронике можно трактовать как задачу минимизации структурной сложности мехатронной системы. Структурная сложность комплексных систем в общем случае определяется количеством соединяемых элементов, числом и интенсивностью их взаимосвязей [40].

В основе рассматриваемого подхода лежат три фундаментальных направления теории системного проектирования сложных систем:

- функционально-структурный анализ и эволюционный синтез сложных технических систем;
 - методология параллельного проектирования систем;
 - структурный синтез и оптимизация технических систем по критериям сложности.
- **2. Традиционный и параллельный алгоритмы проектирования мехатронных систем.**

Кратко рассмотрим ключевые положения перечисленных направлений.

Функционально-структурный подход базируется на идее приоритета функции системы над ее структурной организацией. Задачей проектировщика является определение такой структуры, которая позволит системе выполнять предписанные функциональные задачи с максимальной эффективностью по выбранным критериям качества. Основные положения этого метода были разработаны акад. Е.П. Балашовым и проф. Д.В. Пузанковым применительно к задачам проектирования информационно-управляющих комплексов и вычислительных устройств [6, 7]. Метод эволюционного синтеза предусматривает нахождение рациональных решений путем многоэтапной процедуры оптимизации. Поиск вариантов производится из базы перспективных структурных решений, которая открыта для развития и имеет иерархическую структуру. Как доказано в работах проф. Ю.В. Илюхина [20, 21], проектирование мехатронных систем на основе эволюционного метода позволяет повысить качество проекта и снизить требования к интуитивным способностям разработчика.

Методологической основой разработки мехатронных систем служат методы параллельного проектирования. При традиционном проектировании управляемых машин разработка механической, электронной, информационной и компьютерной частей ведется последовательно и независимо друг от друга (рис. 2.2).

Задачами системной интеграции занимается разработчик системы управления. При этом его возможности крайне ограничены, так как основные конструкторские решения уже приняты на предыдущих этапах. Выбранные двигатели и механические устройства образуют так называемую "неизменяемую часть", состав и характеристики которой нельзя корректировать при раз-



Рис. 2.2. Традиционный алгоритм проектирования

j

работке электронной и управляющей частей системы. Методология параллельного проектирования заключается в одновременном и взаимосвязанном синтезе всех устройств мехатронной системы (рис. 2.3).

Разработанная процедура проектирования интегрированных мехатронных модулей и машин представлена на рис. 2.4.

Она предусматривает *четыре взаимосвязанных этапа*:

1. определение функций мехатронных модулей на основе анализа исходных требований к мехатронной машине;
2. функционально-структурный анализ с целью выбора структуры всех мехатронных модулей и формирование структурной модели системы;
3. структурно-конструктивный анализ и конструирование модулей, формирование конструктивной модели системы;

4. планирование и оптимизация функциональных движений, разработка программ движения машины и ее модулей.



Рис. 2.3. Алгоритм параллельного проектирования мехатронных систем

Исходные требования к мехатронным машинам, которые определяют основные проектные решения, формируются путем анализа выполняемых технологических операций. В качестве примера в табл. 2.2 приведены предпочтительные значения параметров контурного движения рабочего органа для ряда роботизированных операций [20].

Рекомендации технологов, как правило, ограничиваются выбором номинальных режимов движения машины. При проектировании мехатронной системы обычно задаются исходные данные, которые включают информацию о программных движениях и комплекс ограничений.



Рис. 2.4. Процедура проектирования интегрированных мехатронных модулей и машин

2.2. Предпочтительные значения параметров движения РО

Технологическая операция	Максимальная скорость РО, мм/с	Отношение рабочих скоростей РО, $v_{\max} / v_{\min}$	Допустимая погрешность отработки траектории, мм
Лазерная резка	66,7	66,7	0,05
Воздушно-плазменная резка	83,3	5,0	0,1
Окраска распылением	500	10	5,0
Дуговая сварка	11	2,2	0,5

Требования к траекториям движения содержат описание программных траекторий рабочего органа в пространстве и допустимую погрешность их отработки. Программные траектории рабочего органа определяются геометрией контуров и поверхностей объектов работ (например, на рис. 1.20 показана форма лопатки газотурбинного двигателя). Криволинейные пространственные траектории удобно задавать в параметрической форме:

$$\vec{X} = \vec{X}(\lambda) \quad (0 \leq \lambda \leq \lambda_{\max}), \quad (2.1)$$

где $\vec{X}$ – вектор, описывающий положение рабочего органа в выбранном декартовом базисе программирования (см. рис. 1.10); λ – путь, пройденный рабочим органом (скаляр, называемый лонгальным параметром).

Требуется, чтобы погрешность отработки траектории (см. рис. 1.28) не превышала допустимого значения:

$$\delta \leq \delta_{\text{доп}}; \quad |\Delta\alpha| \leq \Delta\alpha_{\text{доп}}; \quad \left| \frac{v}{v_{\text{ном}}} - 1 \right| \leq \Delta v_{\text{доп}}; \quad |F| \leq F_{\text{доп}}. \quad (2.2)$$

Система неравенств (2.2) задает также ограничения на погрешности ориентации ($\Delta\alpha$) рабочего органа, допустимое отклонение ($\Delta v_{\text{доп}}$) фактической скорости движения (v) от номинального значения ($v_{\text{ном}}$), ограничение на предельную величину развиваемой силы ($F_{\text{доп}}$).

Для синтеза системы управления мехатронными машинами удобно использовать показатели добротности [75]:

$$D_v = \frac{v_{\max}}{\delta_{\text{доп}}}; \quad D_a = \frac{v_{\max}^2}{\delta_{\text{доп}} R_{\min}}; \quad D_F = \frac{F_{\max}}{\delta_{\text{доп}}}. \quad (2.3)$$

Здесь D_v , D_a , D_F – соответственно показатели добротности по скорости, ускорению и силе; $v_{\max}$, $F_{\max}$ – максимальные значения соответственно контурной скорости и силы; $R_{\min}$ – минимальный радиус кривизны траектории.

На втором этапе проектирования формируется структура мехатронных модулей со схемой энергетических и информационных потоков, затем – на третьем этапе проводится конструирование всех модулей и мехатронной машины в целом. Применяя процедуры функционально-структурного и структурно-конструктивного анализа, разработчик оценивает проектные варианты, стремясь добиться высокого уровня интеграции элементов. Таким образом, задача проектирования заключается в нахождении наилучшего соответствия между заданной функцией и техническим исполнением.

Построение функциональной, структурной и конструктивной моделей позволяет применять в мехатронике методы и средства автоматизированного анализа, проектирования и конструирования.

Заключительный этап рассматриваемой процедуры состоит в планировании и оптимизации функциональных движений мехатронной машины. Результатом этого этапа является создание программ движения совокупности мехатронных модулей. Разработанные способы моделирования и оптимизации движений для многомерных мехатронных систем представлены в дальнейшем.

Следует отметить, что все проектные этапы имеют циклический характер, что подчеркнуто наличием обратных стрелок на рис. 2.4. Например, на втором этапе прямая задача состоит в определении структуры модулей по заданной функциональной модели. Но верна и обратная закономерность, когда структурные модификации приводят к изменению функциональных возможностей системы.

Для реализации разработанного подхода к проектированию интегрированных мехатронных модулей разработаны *три метода интеграции*. Методы интеграции можно классифицировать по характеру объединения составляющих устройств и способу решения "проблемы интерфейсов" проектировщиком и производителем мехатронных модулей и систем. Каждый из методов может применяться как самостоятельно, так и в комбинации с другими методами, поскольку они реализуются на различных этапах проектирования.

Первый метод состоит в построении интегрированных мехатронных модулей и машин путем исключения из их структуры промежуточных преобразователей и соответствующих интерфейсов. Это наиболее глубокий уровень интеграции, позволяющий получать мехатронные решения, полностью соответствующие пониманию синергизма в определении мехатроники. Исключение многоступенчатого преобразования энергии и информации в мехатронных модулях создает фундаментальную основу для достижения высокой точности и быстродействия, компактности и надежности мехатронных машин.

Второй метод предполагает аппаратно-конструктивное объединение устройств различной физической природы *в едином корпусе* многофункционального мехатронного модуля. Все структурные блоки встраиваются в единый конструктив вместе с другими устройствами, поэтому для пользователя такие модули движения, по сути, представляются едиными изделиями.

Третий метод интеграции отражает современную тенденцию при построении

машин нового поколения, которая заключается в *переносе функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным* (электронным, компьютерным и информационным) устройствам. Интеллектуальные устройства, в отличие от механических элементов придают системе гибкость, поскольку их легко перепрограммировать под новую задачу. При этом их цена постоянно снижается, а функциональные возможности быстро расширяются. Использование данного метода позволяет минимизировать механическую сложность мехатронной системы.

Лекция

Тема 1.3.6. Методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем (Метод исключения промежуточных преобразователей и интерфейсов)

ВОПРОСЫ

1. Метод исключения промежуточных преобразователей и интерфейсов.
2. Примеры проектирования решений для мехатронных модулей.

ЛИТЕРАТУРА

12. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с. 98-107).
13. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5).

1. Метод исключения промежуточных преобразователей и Интерфейсов

Целью этого метода интеграции является минимизация структурной сложности мехатронных модулей исключением промежуточных преобразователей. При проектировании из традиционной структуры исключается по крайней мере один промежуточный блок и соответствующие интерфейсы. При этом сохраняется функциональное преобразование, выполняемое мехатронным модулем в целом, его входные и выходные переменные. Эта цель может быть достигнута на втором этапе проектирования мехатронных систем (см. рис. 2.4), когда ведется синтез структуры модулей.

Инструментарием для поиска структурных синергетических решений в мехатронике служит методика функционально-структурного анализа проектных решений.

Известны два основных подхода к построению моделей сложных технических систем. Первый заключается в *функциональном определении* рассматриваемой системы через ее поведение по отношению к внешним объектам и внешней среде. Второй подход основан на *структурном представлении* системы и связей между ее элементами. Исследование и оптимизация взаимосвязей между функцией и структурой системы лежит в основе функционально-структурного подхода, который мы применяем к задачам мехатроники.

Определение мехатроники, может быть отнесено к структурному типу, так как мехатронная система описывается через три ее внутренние подсистемы (механическая, электронная и компьютерного управления) или, другими словами, как "белый ящик".

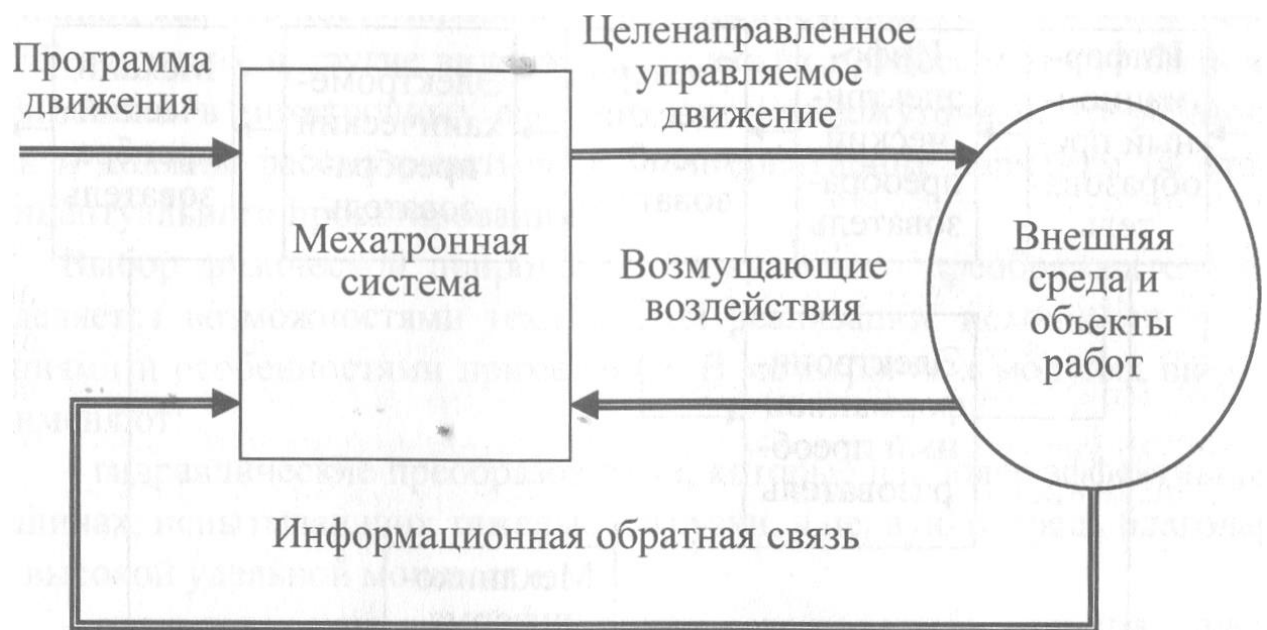


Рис. 2.5. Функциональное представление мехатронной системы

Для методически корректного проектирования необходимо рассмотреть функциональную организацию мехатронной системы (МС). Функциональное представление МС с определенными входными и выходными переменными (модель типа "черный ящик") показано на рис. 2.5. Главная функциональная задача мехатронной системы заключается в преобразовании информации о программе движения в целенаправленное управляемое движение ее конечного звена.

Программа движения может быть задана компьютером верхнего уровня управления или в случае дистанционного управления - человеком-оператором (см. рис. 1.25). Управляемое движение осуществляется звеньями механического устройства, причем конечное звено - рабочий орган взаимодействует с внешней средой. В процессе движения на механическое устройство действуют внешние силы со стороны объектов работ (например, силы резания при шлифовальных и фрезерных операциях, контактные силы и моменты при роботизированной сборке). Информационная обратная связь необходима для оценки в режиме реального времени текущего состояния управляемой системы и внешней среды.

Разумеется, выделенная основная функция не является единственной для мехатронных систем. Некоторые дополнительные функции, такие как: реконфигурация системы, обмен сигналами и информацией с другим технологическим оборудованием, самодиагностика, также должны быть реализованы для ее эффективной и надежной работы. Но именно выполнение заданного функционального движения является главной функцией, которая определяет поведение МС во внешней среде.



Рис. 2.6. Функциональная модель мехатронного модуля

Функциональное представление мехатронного модуля в форме "черного ящика" (см. рис. 2.5) содержит два информационных входа (программа движения и информационная обратная связь), дополнительный механический вход (силы реакции внешней среды) и один выход - целенаправленное механическое движение.

Следовательно, в общем случае функциональная схема мехатронного модуля может быть построена как информационно-механический преобразователь.

Для физической реализации мехатронного информационно-механического преобразования необходим внешний энергетический источник. На современной стадии развития мехатроники для этой цели в основном используют электрические источники энергии. Введя соответствующие электроэнергетические преобразования, получаем следующую функциональную модель мехатронного модуля (рис. 2.6).

Полученная функциональная модель в общем случае содержит семь базовых преобразователей, связанных энергетическими и информационными потоками.

Отметим, что электрическая энергия является только промежуточной энергетической формой между входной информацией и выходным механическим движением. Следовательно, электрическая подсистема отнюдь не является единственно возможной для выполнения главной функции, как это постулировано в приведенном определении мехатроники. Безусловно, и другие виды энергетических процессов могут быть использованы в мехатронных системах для промежуточных преобразований и должны рассматриваться как альтернативные варианты на этапе концептуального проектирования.

Выбор физической природы промежуточного преобразователя определяется возможностями технической реализации, исходными требованиями и особенностями применения. В мехатронных модулях широко применяют:

- гидравлические преобразователи, которые наиболее эффективны в машинах, испытывающих тяжелые нагрузки, в первую очередь благодаря их высокой удельной мощности;
- пневматические преобразователи, которые крайне просты, надежны и обладают высоким быстродействием;
- химические преобразователи применяются в биоприводах, аналогичных по принципу действия мускулам живых организмов;
- тепловые энергетические процессы используются в микромехатронных системах и основаны на использовании материалов с памятью формы;
- комбинированные преобразователи, основанные на энергетических процессах различной физической природы.

Итак, в мехатронном модуле следует реализовать семь функциональных преобразований (см. рис. 2.6). Три из них назовем моноэнергетическими (информационный, электрический и механический преобразователи), где входные и выходные переменные имеют одну и ту же физическую природу. Остальные четыре являются дуальными (двойственными), так как в них входные и выходные переменные принадлежат различным физическим видам. К этой группе относятся информационно-электрический и электромеханический преобразователи, расположенные в прямой цепи функциональной модели, а также электро-информационный и механико-информационный преобразователи в цепях обратной связи.

Структурная модель мехатронного модуля (ММ) должна отражать состав его элементов и связи между ними. В теории автоматического управления принято структурные модели графически представлять в виде блок-схем. Звенья обычно обозначают в виде прямоугольников с указанием входной и выходной переменных, а также передаточных функций.



Рис. 2.7. Структура традиционного электропривода с компьютерным управлением

В качестве исходной структуры ММ рассмотрим традиционный электропривод с компьютерным управлением (рис. 2.7).

Для дальнейшего анализа в представленной структурной схеме выделим управляющую и электромеханическую подсистемы. Структурная модель электропривода включает в себя следующие элементы:

- 1) устройство компьютерного управления (УКУ) движением, функциональной задачей которого является информационное преобразование (обработка цифровых сигналов, цифровое регулирование, расчет управляющих воздействий, обмен данными с периферийными устройствами);
- 2) цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), реализующий функцию информационно-электрического преобразования;

- 3) силовой преобразователь, обычно состоящий из усилителя мощности, широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и трехфазного инвертора (для асинхронных двигателей);
- 4) управляемый электродвигатель (переменного или постоянного тока), который выполняет электромеханическое преобразование;
- 5) механическое устройство, которое реализует заданное управляемое движение, и рабочий орган, взаимодействующий с внешними объектами;
- 6) устройство обратной связи, которое дает информацию о значениях электрических напряжений и токов в силовом преобразователе;
- 7) датчики обратной связи (по положению, скорости движения звеньев), выполняющие функцию механико-информационного преобразования;
- 8) интерфейсные устройства, обозначенные на блок-схеме как /0-/8.

В зависимости от физической природы входных и выходных переменных интерфейсные блоки могут быть как механическими, так и интеллектуальными преобразователями. Примерами механических интерфейсов являются передачи и трансмиссии, связывающие механическое устройство с двигателем (интерфейс 14) и датчиками обратной связи (Л, IS).

Интеллектуальные интерфейсы расположены на входах и выходах устройства компьютерного управления мехатронного модуля и предназначены для его сопряжения со следующими структурными элементами:

- ❖ компьютером верхнего уровня управления и другими модулями мехатронной системы (интерфейс 10);
- ❖ цифроаналоговым преобразователем (интерфейс /1) и далее с силовым преобразователем модуля (12);
- ❖ датчиками обратной связи (интерфейс /8), который в случае применения сенсоров с аналоговым выходным сигналом строится на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- ❖ устройствами обратной связи для контроля уровня электрических токов и напряжений в силовом преобразователе (интерфейс 16).

В традиционной приводной технике интерфейсы являются сепаратными устройствами. Поэтому их проектирование, изготовление и наладка становятся серьезной проблемой для разработчика привода, особенно когда требуется надежно соединять нестандартные и специализированные элементы различных производителей.

Мехатронные структуры отличаются высокой степенью интеграции элементов, причем эти решения закладываются уже на стадии проектирования и изготовления модулей и машин.

Сравнивая функциональную модель мехатронного модуля (см. рис. 2.6) и структурную модель традиционного электропривода (см. рис. 2.7), можно сделать вывод о том, что суммарное количество основных и интерфейсных блоков в структуре электропривода значительно превышает число выполняемых функциональных преобразований. Другими словами, можно говорить о структурной избыточности традиционного электропривода. Наличие избыточных блоков приводит к снижению надежности и точности технической системы, ухудшению ее массогабаритных и стоимостных показателей.

Задачей функционально-структурного анализа является поиск мехатронных структур, реализующих заданные функциональные преобразования с помощью минимального количества структурных блоков. Представленные решения основаны на совместном анализе функциональной модели мехатронного модуля и структуры традиционного электропривода. В качестве локальных точек интеграции мы будем рассматривать интерфейсы привода, обозначенные на рис. 2.7 как /0-/8.

Примеры проектных решений для мехатронных модулей, основанные на рассматриваемом методе интеграции элементов, приведены в табл. 2.3.

Мехатронное решение	Исключаемые промежуточные преобразователи		
	Функциональные преобразователи	Структурные блоки	Интерфейсы
Вентильный высокомоментный двигатель	Механический	Механическое устройство	I4
Мехатронный модуль с "бес-сенсорным" управлением	Механико-информационный	Датчики обратной связи	I7, I8
Интеллектуальный силовой преобразователь	Электроинформационный	Устройство обратной связи	I5

2. Примеры проектирования решений для мехатронных модулей

Рассмотрим подробнее мехатронные решения, представленные в таблице.

Применение вентильных высокомоментных двигателей (ВМД) позволяет заменить пару "двигатель + механический преобразователь движения" на один исполнительный элемент-двигатель. Здесь исключается механический преобразователь из функциональной модели (см. рис. 2.6) и, соответственно, механическое устройство и интерфейс /4 из традиционной структуры привода (см. рис. 2.7).

К основным преимуществам мехатронных модулей с ВМД относятся компактность и модульность конструкции, повышенные точностные характеристики привода благодаря отсутствию зазоров, кинематических погрешностей, упругих деформации звеньев, а также исключение трения в механической трансмиссии. В современных машинах используются ВМД как углового, так и линейного типов. Примеры построения мехатронных модулей на базе линейных высокомоментных двигателей показаны на рис. 1.6-1.8.

Для определения положения полюсов на роторе двигателя в конструкцию вентильного ВМД встраивают датчик положения (обычно датчик Холла). В исполнительных приводах информацию с этого датчика можно использовать и как сигнал позиционной обратной связи. Следовательно, применение ВМД со встроенными датчиками позволяет упростить не только исполнительную часть модуля, но и цепи обратной связи.

Построение мехатронных модулей с так называемым "бессенсорным" управлением означает исключение датчиков обратной связи вместе с соответствующими интерфейсами // и /8, которые традиционно выполняют функциональное механико-информационное преобразование. При этом информация о скорости и положении ротора двигателя определяется в устройстве компьютерного управления косвенными методами.

Данный способ позволяет существенно снизить стоимость изделия и повысить надежность его работы, радикально облегчить механическую конструкцию модуля, возложив задачу организации обратной связи на электронные и компьютерные устройства. Фактически в данном случае метод исключения промежуточных преобразователей сочетается с третьим методом интеграции (п. 2.4), который направлен на расширение функций интеллектуальных устройств в мехатронике.

Создание "бессенсорных" способов управления особенно актуально в настоящее время для мехатронных модулей на базе двигателей переменного тока, широкое применение которых сдерживалось отсутствием эффективных систем управления. Мировой рынок этих модулей оценивался в 2003 г. в 12 млрд долл. и прогнозируется его дальнейший рост (около 12 % в год) [79]. Столь большой интерес к

двигателям переменного тока вызван тем, что они обладают высоким показателем цена/качество по сравнению с машинами постоянного тока. Так, по данным обзора [80], только за последние десять лет цена единицы мощности асинхронных машин снизилась примерно в 10 раз, при этом компактность конструкции улучшилась в 15 раз.

На сегодняшний день разработано большое число методов косвенного определения скорости вращения ротора, с которыми можно ознакомиться в специальной литературе. Эти методы можно классифицировать по виду исходной информации и применяемым математическим моделям. В качестве исходных данных обычно берутся значения электрических напряжений и токов, протекающих в обмотках статора и/или ротора (рис. 2.8).

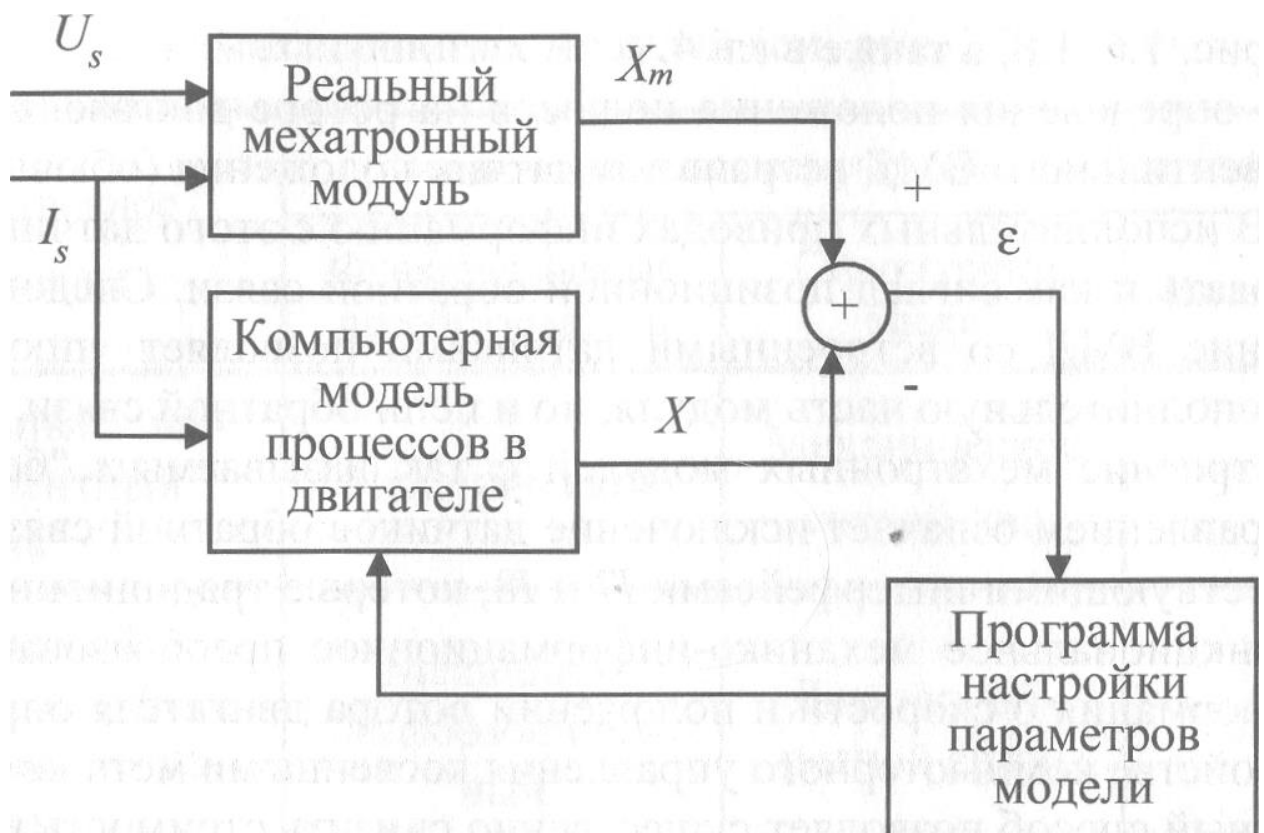


Рис. 2.8 Схема настройки системы "бессенсорного" управления:

U_s , I_s - соответственно входные напряжение и ток статора двигателя;

X_m , X - выходные переменные соответственно реального двигателя и компьютерной модели; ϵ - погрешность оценки

Наиболее распространенными являются три группы моделей, описывающих электромагнитные процессы в двигателях: аналитические модели в форме дифференциальных уравнений с фиксированными параметрами, адаптивные самона-

страиваемые модели и модели, построенные на базе интеллектуальных технологий (нейросетевые, нечеткая логика и т.д.). Практическая реализация методов "бессенсорного" управления стала возможна благодаря появлению быстродействующих цифровых вычислителей (см. п. 1.3).

Проблемы практической реализации метода "бессенсорного" управления связаны с построением адекватных компьютерных моделей для процессов, протекающих в двигателях. Характер этих процессов существенно различается для участков разгона и торможения, движения с номинальной скоростью и в зоне малых скоростей, на холостом ходу и при наличии внешних моментов. Необходимым условием работоспособности такой системы является организация всех вычислительных процедур в реальном масштабе времени.

В состав современных мехатронных модулей входят интеллектуальные силовые преобразователи (ИСП) (см. табл. 2.3), объединяющие электрическое и электро-информационное преобразования. Особенность ИСП состоит в том, что они содержат встроенные блоки микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций, - управление движением, защита в аварийных режимах и диагностика неисправностей. ИСП строят на базе полупроводниковых приборов нового поколения. Типичными представителями этих приборов являются силовые полевые транзисторы (MOSFET), биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), запираемые тиристоры с полевым управлением (MCT) (см. п. 1.3).

Использование ИСП в составе мехатронных модулей позволяет существенно снизить массогабаритные показатели силовых преобразователей, повысить их надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели.

Перспективные решения на базе рассмотренного метода интеграции основываются на применении гибридных производственных технологий и новых конструкционных материалов, общих для исполнительных и интеллектуальных компонентов.

Лекция

Тема 1.3.7. Методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем (Метод объединения элементов мехатронного модуля в едином корпусе)

ВОПРОСЫ

2. Метод объединения элементов мехатронного модуля в едином корпусе.

ЛИТЕРАТУРА

14. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с. 107-111).
15. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5).

1. Метод объединения элементов мехатронного модуля в едином корпусе

Целью второго метода интеграции является минимизация конструктивной сложности мехатронных модулей путем создания интегрированных мехатронных модулей, реализующих несколько функциональных и структурных преобразований. Эта цель может быть достигнута на третьем этапе проектирования мехатронных систем - этапе структурноконструктивного анализа (см. рис. 2.4). Структуру модуля, которая сформирована на предыдущем этапе, теперь считаем известной. Задача разработчика состоит в выборе конструктивных решений, реализующих заданный набор элементов и связей между ними.

Рассматриваемый метод интеграции заключается в аппаратноконструктивном объединении выбранных элементов и интерфейсов в едином корпусе. Технологической базой для данного метода интеграции является гибридная сборка узлов и элементов (см. п. 1.3). Аппаратное и конструктивное объединение элементов в единые модули должно обязательно сопровождаться разработкой интегрированного программного обеспечения.

Методическим ключом при поиске вариантов является рассмотрение интерфейсных блоков /0-/8 (см. рис. 2.7) в качестве локальных точек, где потенциально возможна интеграция элементов. Для получения высоко-

- а. Мехатронные модули, построенные методом объединения элементов в едином корпусе (см. рис. 2.7)**

Многофункциональные мехатронные модули	Функциональные преобразования	Встраиваемые элементы	
		Структурные блоки	Интерфейсы
Модули движения	Электромеханическое и механическое	Двигатель, механическое устройство	I4
Мехатронные модули движения	Электромеханическое, механическое и механико-информационное	Двигатель, механическое устройство, датчик обратной связи	I4, I7
Интеллектуальные мехатронные модули	Информационное, информационно-электрическое, электрическое, электро-механическое, механическое, электро-информационное и механико-информационное	УКУ, силовой преобразователь, двигатель, механическое устройство, датчики обратной связи, устройство обратной связи	I0...I8

интегрированных модулей можно рекомендовать при проектировании опираться сразу на несколько интерфейсных точек.

Группы мехатронных модулей, построение которых основано на втором методе интеграции, приведены в табл. 2.4. (Понятия модуля движения, мехатронного модуля и интеллектуального мехатронного модуля были введены в п. 1.2).

В корпусе модуля движения объединены исполнительный двигатель и механическое устройство, причем вал двигателя является элементом механического преобразователя движения. Модули движения реализуют электромеханическое и механическое функциональные преобразования; их проектирование основано на исключении интерфейса 14 как самостоятельного (с точки зрения пользователя) блока.

Примерами модулей движения могут служить: мотор-редуктор, мотор-колесо, мотор-шпиндель и мотор-барабан [17]. В состав современных модулей движения помимо двигателей и преобразователей движения входят и другие виды механических устройств - тормозные и люфтовыбирающие механизмы, направляющие и преобразователи движения. Так, мехатронный модуль фирмы

Dunkermotoren на базе асинхронного двигателя (см. рис. 1.32) содержит дополнительно тормозное устройство. НТЦ "Редуктор" (Санкт-Петербург) производит мотор-редукторы с планетарно-фрикционными вариаторами скорости. К модулям движения можно отнести также высокооборотные мотор-шпиндели, которые получены объединением ротора электродвигателя и вала инструмента (см. рис. 1.5).

Мехатронные модули движения являются многофункциональными изделиями, которые выполняют электромеханическое, механическое и механико-информационное преобразования (см. табл. 2.4). В едином корпусе модуля находятся: двигатель, механическое устройство и датчик обратной связи. Точками структурно-конструктивной интеграции этих элементов являются интерфейсы 14 и 11. Примером такого решения может служить мехатронный модуль фирмы Махон, представленный на рис. 1.9. В состав ротационного модуля входят: коллекторный электродвигатель, планетарный редуктор и фотоимпульсный датчик обратной связи (инкодер).

Главной особенностью современного этапа развития мехатроники является создание принципиально нового поколения модулей - интеллектуальных мехатронных модулей (ИММ). По сравнению с мехатронными модулями движения в конструкцию ИММ дополнительно встраиваются компьютерные устройства и силовые электронные преобразователи, что придает этим модулям интеллектуальные свойства и является их главным отличительным признаком.

Интеллектуальные мехатронные модули реализуют все семь функциональных преобразований, представленных на рис. 2.6. Структурноконструктивная интеграция в ИММ осуществляется по всем интерфейсным точкам (I0-I8).

В общем случае интеллектуальный мехатронный модуль состоит из следующих основных элементов:

- 1) электродвигатель (хотя возможно использование движителей и других типов, например гидравлических);
- 2) механическое устройство;
- 3) датчики и устройства обратной связи;
- 4) устройство компьютерного управления (УКУ);
- 5) электронный силовой преобразователь;
- 6) интерфейс I0 для связи УКУ с компьютером верхнего уровня управления, а также внутренние интерфейсы (I1-I8).

Рассмотрим основные преимущества, которые дает применение интеллектуальных мехатронных модулей:

Управление цифровых образовательных технологий

- способность ИММ выполнять сложные движения самостоятельно, без обращения к верхнему уровню управления, что повышает автономность модулей, гибкость и живучесть мехатронных систем, работающих в изменяющихся и неопределенных условиях внешней среды;
- упрощение коммуникаций между модулями и центральным устройством управления (вплоть до перехода к беспроводным коммуникациям), что позволяет добиваться повышенной помехозащищенности мехатронной системы и ее способности к быстрой реконфигурации;
- повышение надежности и безопасности мехатронных систем благодаря компьютерной диагностике неисправностей и автоматической защите в аварийных и нештатных режимах работы;
- создание на основе ИММ распределенных систем управления с применением сетевых методов, аппаратно-программных платформ на базе персональных компьютеров и соответствующего программного обеспечения;
- использование современных методов управления (программных, адаптивных, интеллектуальных, оптимальных) непосредственно на исполнительном уровне, что существенно повышает качество процессов управления в конкретных реализациях;
- интеллектуализация силовых преобразователей, входящих в состав ИММ, для реализации непосредственно в мехатронном модуле интеллектуальных функций по управлению движением, защите модуля в аварийных режимах и диагностики неисправностей;
- интеллектуализация сенсоров для мехатронных модулей позволяет добиться более высокой точности измерения, программным путем обеспечив в самом сенсорном модуле фильтрацию шумов, калибровку, линеаризацию характеристик вход/выход, компенсацию перекрестных связей, гистерезиса и дрейфа нуля.

Встраивание интеллектуальных устройств непосредственно в мехатронный модуль порождает и ряд ограничений. К ним следует отнести сложность модернизации, увеличение массогабаритных показателей модуля движения (по сравнению с приводами, где управляющие и электронные устройства вынесены в отдельные шкафы), а также существенные механические и температурные воздействия исполнительных устройств на встроенные электронные и компьютерные компоненты.

Пример ИММ представлен на рис. 1.33, в, это мехатронный модуль "Simodrive Posmo SI" фирмы Siemens. Отличительной чертой этого модуля является то, что силовой преобразователь и управляющее устройство конструктивно объединяются с двигателем типа 1FK6. С помощью штекерной техники осуществляется подключение цифровых входов и диагностических сигналов, а также электрическая связь между двигателем и силовым преобразователем. Связь с центральным устройством управления и другими модулями организуется через стандартную шину "PROFIBUS", соединение производится подготовленным кабелем с присоединительным фланцем.

Лекция

Тема 1.3.8. Методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем (Анализ мехатронных систем на основе показателя функционально-структурной интеграции)

ВОПРОСЫ

3. Алгоритм анализа мехатронной системы на основе показателя функционально-структурной интеграции.
4. Традиционная система управления манипулятора.
5. Структура управления робота на основе управляющих контроллеров.

ЛИТЕРАТУРА

16. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с.111-121).
17. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5).

1. Алгоритм анализа мехатронной системы на основе показателя функционально-структурной интеграции.

Методы интеграции элементов, рассмотренные в двух предыдущих методах, основаны на совместном анализе функциональной и структурной моделей мехатронных модулей. Принятый подход к проектированию мехатронных модулей и систем заключается в нахождении оптимального соответствия между функциональной и структурной моделями синтезируемой системы. С инженерной точки

зрения заданная последовательность функциональных преобразований может быть реализована различным набором структурных блоков. Процесс проектирования интегрированных мехатронных модулей и систем требует численных мер для оценки уровня интеграции элементов для обоснованного выбора среди вариантов решений. Предлагаемый показатель позволяет количественно оценивать функционально-структурной уровень интеграции, сравнивать и классифицировать различные мехатронные структуры на ранних этапах разработки.

Алгоритм анализа мехатронной системы на основе показателя функционально-структурной интеграции имеет следующий вид.

1. Структурная модель исследуемой системы представляется в виде связного ориентированного графа $G_S = G_S(U_S, V_S)$, где множество вершин V_S составляет структурные элементы системы, а множество ребер U_S отображает связи между ними. Для геометрического представления ориентированное ребро показывают в виде дуги со стрелкой, направление которой совпадает с направлением потока энергии или информации между соединяемыми вершинами.

2. Для построенной структурной модели G_S определяется число вершин графа N_S , равное числу сепаратных блоков, используемых в данном структурном варианте.

3. Функциональная модель мехатронной системы также строится в виде связного ориентированного графа $G_{F0} = G_{F0}(U_{F0}, V_{F0})$, где множество вершин V_{F0} графа образует функциональные преобразователи, а множество ребер U_{F0} отображает связи между ними.

4. Если в исходной функциональной модели две соседние вершины соответствуют одинаковым по типу функциональным преобразованиям, то они объединяются в одну вершину. В результате этой операции получаем сжатый функциональный граф $G_F = G_F(U_F, V_F)$, который содержит только оригинальные преобразователи.

5. Для сжатого функционального графа G_F определяют число вершин N_F , равное числу оригинальных функциональных преобразователей в исследуемой мехатронной системе.

6. Показатель функционально-структурной интеграции (ФСИ) для данной мехатронной системы рассчитывают как отношение

$$I^{FS} = N_F / N_S - 1. \quad (2.4)$$

Введенный показатель ФСИ представляет собой численную оценку уровня интеграции составляющих элементов. При проектировании интегрированных ме-

хатронных систем следует стремиться к повышению показателя ФСИ, т.е. реализовывать наибольшее количество функциональных преобразований минимально возможным числом структурных элементов. В этом смысле выгодно исключать промежуточные структурные преобразователи и самостоятельные интерфейсы, а также создавать многофункциональные мехатронные модули. Рассмотренные предыдущие два метода интеграции, дают путь к решению именно этих задач.

Оценим на основании введенного показателя ФСИ степень интеграции элементов в приведенных ранее примерах. Традиционный электропривод с компьютерным управлением (см. рис. 2.7) содержит 7 основных структурных блоков и 8 интерфейсов, которые выполняют 7 функциональных преобразований (см. рис. 2.6).



Рис. 2.6. Функциональная модель мехатронного модуля

Следовательно, только если все интерфейсы встроить в основные блоки, то имеем нулевое значение показателя ФСИ:

$$I^{FS} = N_F / N_S - 1 = 7 / 7 - 1 = 0.$$

В случае, когда хотя бы один интерфейс представляет собой сепаратный блок, получаем отрицательные величины показателя.

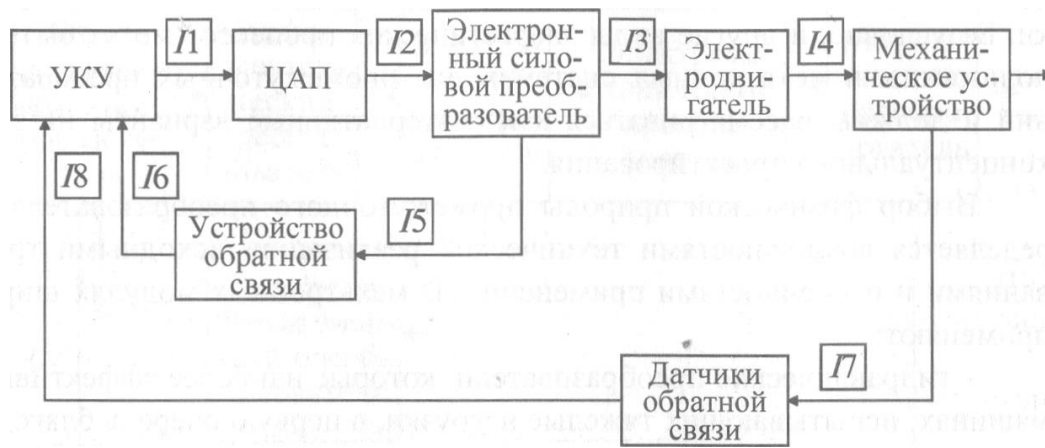


Рис. 2.7. Структура традиционного электропривода с компьютерным управлением

В общем случае показатель I^{FS} будет отрицательным для избыточных структур, где число отдельных структурных элементов в системе

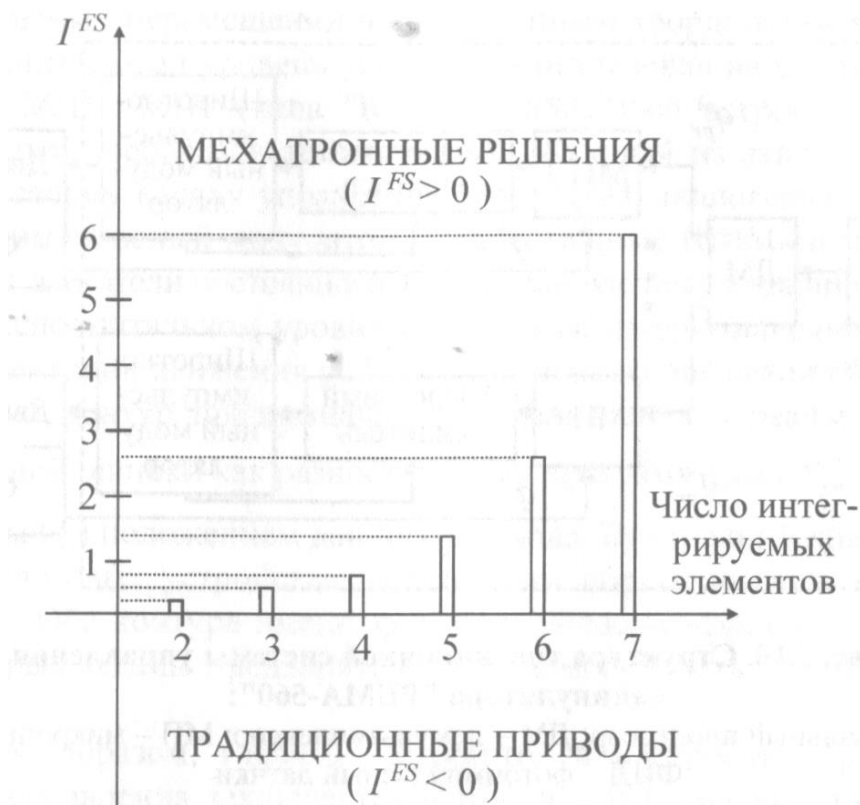


Рис. 2.9. Показатели функционально-структурной интеграции для традиционных приводов и мехатронных решений

превышает число заданных функциональных преобразований. Для мехатронных решений целесообразно принять за базовую степень интеграции значение $I^{FS}=0$ (рис. 2.9).

Базовая степень интеграции достигается при равенстве между числом требуемых функциональных преобразований и выполняющих их структурных блоков.

Другими словами, каждый из семи функциональных преобразователей (см. рис. 2.6) технически реализуется одним самостоятельным устройством.

Применение мехатронных решений, основанных на различных методах интеграции, позволяет получить структурные решения с положительными значениями показателя ФСИ (см. рис. 2.9). Зависимость показателя ФСИ от числа интегрируемых элементов при заданном числе функциональных преобразований имеет гиперболический характер. Особенно высокая степень интеграции достигается при объединении в мехатронном модуле более пяти элементов. Этому условию удовлетворяют интеллектуальные мехатронные модули, в которых максимум функциональных преобразований сосредоточен в едином (с точки зрения пользователя) структурном элементе.

2. Традиционная система управления манипулятора

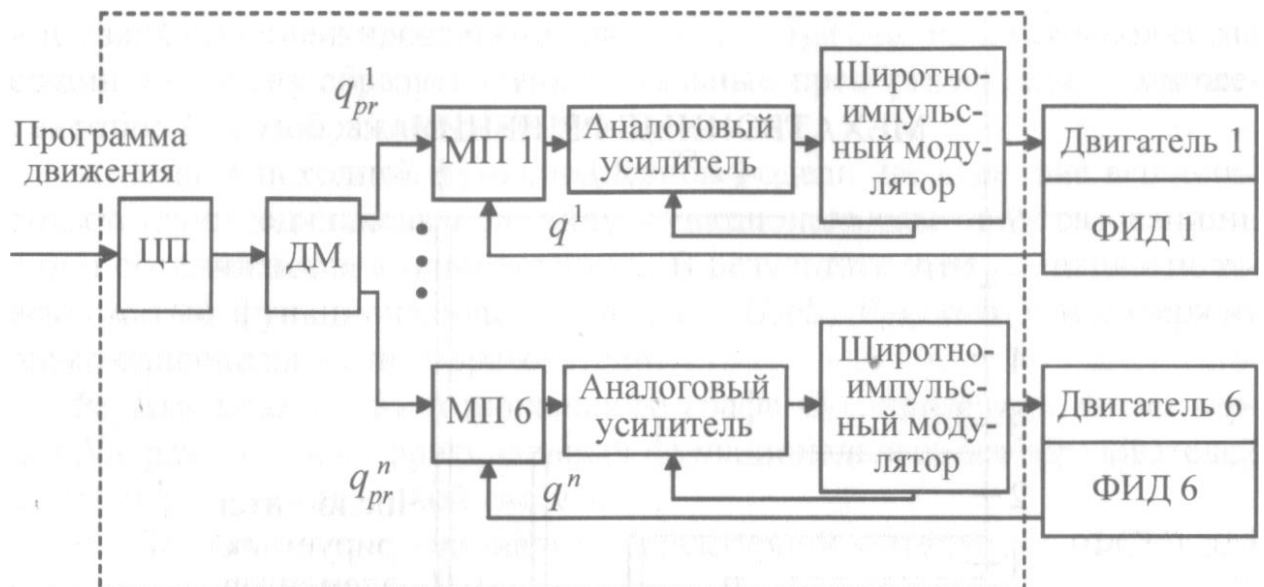


Рис. 2.10. Структура традиционной системы управления манипулятора "PUMA-560":

ЦП - центральный процессор; ДМ - демультиплексор; МП - микропроцессор;
ФИД - фотоимпульсный датчик

Введенный показатель ФСИ может быть рассчитан не только для мехатронного модуля полного состава, но и его отдельных подсистем. Рассмотрим в этой связи примеры проектирования и сравнительного анализа подсистем компьютерного управления для манипуляционного робота "PUMA-560". Эти разработки выполнены специалистами кафедры "Робототехника и мехатроника" МГТУ "СТАНКИН" совместно с коллегами из других организаций.

Манипулятор "PUMA-560", который входит в состав серийно выпускаемого промышленного робота РМ-01 обладает сложной антропоморфной кинематической схемой с шестью степенями подвижности (см. рис. 1.13). Робот оснащен электромеханическими приводами на базе двигателей постоянного тока с фотоимпульсными датчиками обратной связи. Устройство управления (в серийном варианте - типа "Сфера"), предназначенное для позиционного и контурного управления, имеет двухуровневую многопроцессорную архитектуру [68]. Структура традиционной системы управления для манипулятора "PUMA-560" представлена на рис. 2.10.

Верхний уровень системы управления содержит центральный процессор (DES LSI-11/02), который решает задачи тактического уровня управления (в первую очередь это работа с человеко-машинным интерфейсом и планирование траектории), а также демультиплексор, задающий программу перемещений по обобщенным координатам манипулятора. Исполнительный уровень управления реализован на шести микропроцессорах МП1...МП6 (типа "Rockwell 6503") со встроенными цифро-аналоговыми преобразователями (ЦАП). Каждый из этих микропроцессоров по своему каналу управления через ЦАП, аналоговый усилитель и широтно-импульсный модулятор выдает мощные ШИМ-сигналы на коллекторные двигатели постоянного тока, установленные в шарнирах робота.

На исполнительном уровне управления, предназначенном для отработки траектории движения робота, реализованы две петли обратной связи. Первый контур предназначен для вычисления в реальном времени позиционной ошибки как разности между программным (q_{pr}^i , $i = 1, \dots, n$) и текущим (q^i) положением данного привода. Внутренний контур построен на аналоговых устройствах и реализует обратную связь по скорости движения. Оба контура имеют фиксированные коэффициенты регуляторов, которые заданы предварительно и не могут быть изменены пользователем.

Таким образом, главный недостаток в построении традиционной системы управления заключается в том, что центральный процессор не участвует в отработке программной траектории. Это не позволяет учитывать в процессе управления важные для манипуляционных роботов динамические эффекты (взаимовлияние степеней подвижности, переменность приведенных моментов инерции звеньев, нелинейность кинематических и динамических моделей), что существенно ухудшает качество управления, особенно на низких и высоких скоростях.

Построим функциональную модель для традиционной системы управления роботом (рис. 2.11), ограничившись рассмотрением только управляющей подсистемы, так как исполнительная подсистема в данном исследовании не будет подвергаться изменениям.



Рис. 2.11. Функциональная модель традиционной системы управления манипулятора "PUMA-560"

В состав модели входят общий информационный преобразователь, а также три функциональных преобразователя по каждому из каналов управления (это информационный, информационно-электрический и электрический преобразователи). Эти функциональные преобразования в традиционной структуре (см. рис. 2.10) реализуются двумя модулями (центральный процессор и демультиплексор), которые являются общими для всех каналов управления, и тремя структурными блоками (МП, аналоговый усилитель и широтно-импульсный модулятор) дополнительно на каждый привод.

Следуя принятому алгоритму расчета, два последовательно соединенных информационных преобразователя при расчете считаем одним

функциональным преобразованием. Тогда показатель ФСИ для традиционной системы, имеющей n каналов управления, рассчитываем по формуле

$$I_1^{FS} = \frac{3n}{n(1+1+1)+2} - 1 = -\frac{2}{3n+2}. \quad (2.5)$$

Характерные численные значения показателя I_1^{FS} , для различного числа степеней подвижности робота приведены ниже:

Число каналов	1	2	3	4	5	6
$I_1^{FS}(n)$	-0,40	-0,25	-0,18	-0,14	-0,12	-0,1

Функция $I_1^{FS}(n)$ для положительных значений аргументов n представляет собой возрастающую гиперболу, которая достигает максимального значения $I_1^{FS}=0$ при бесконечно большом числе каналов управления.

Причем для любого числа каналов (в частности, при $n = 6$, что соответствует кинематике манипулятора "PUMA-560") получаем из (2.5) отрицательное значение показателя ФСИ. Следовательно, согласно предложенной классификации (см. рис. 2.9) рассмотренная традиционная структура системы управления содержит избыточное число модулей по отношению к базовому уровню и ее нельзя считать мехатронным (интегрированным) решением.

3. Структура управления робота на основе управляющих контроллеров

Дальнейшие разработки осуществлялись на основе функциональноструктурного подхода с целью реализации каждого из заданных функциональных преобразований на одном структурном модуле. Представленная в данном разделе система управления является совместной разработкой Будапештского технического университета и МГТУ "СТАНКИН" в рамках программы научно-технического сотрудничества между университетами [82]. Структурная интеграция элементов в традиционной системе управления робота проводилась по двум направлениям:

- 1) объединение аналогового усилителя и широтно-импульсного модулятора, что технически реализовано в виде усилителя-модулятора;
- 2) использование управляющего контроллера вместо демультиплексора и шести микропроцессоров с цифроаналоговыми преобразователями.

Структура разработанной системы управления представлена на рис. 2.12.

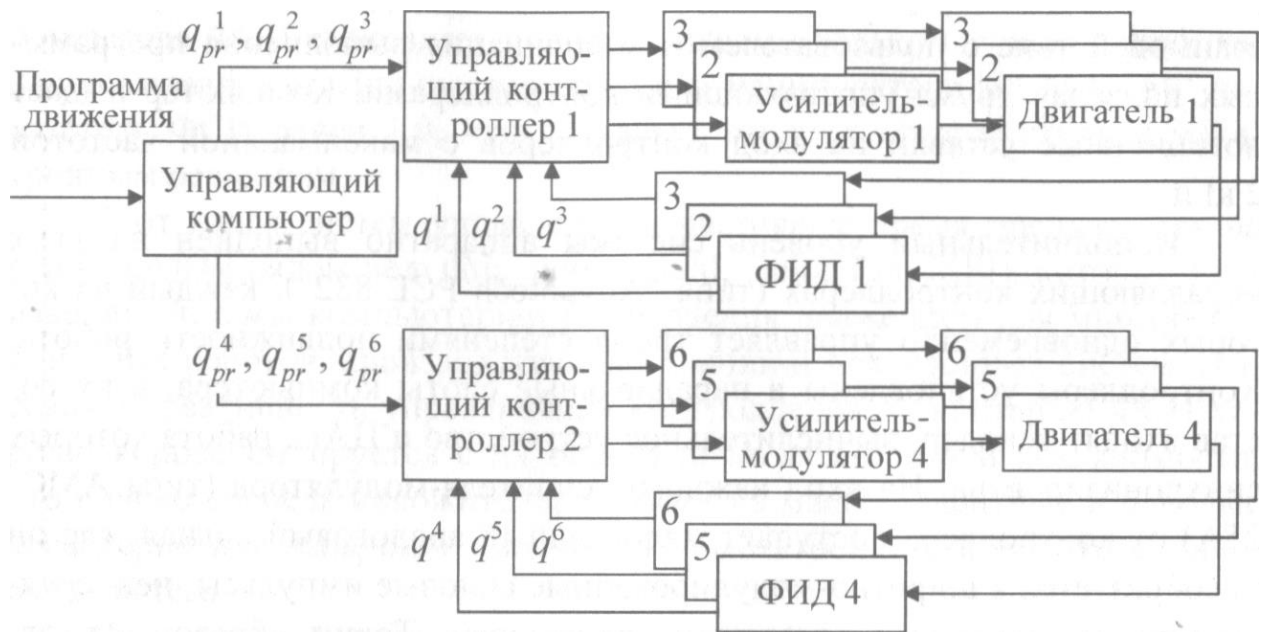


Рис. 2.12. Структура системы управления робота "PUMA-560" на основе управляющих контроллеров

Верхний уровень управления реализован на компьютере IBM PC (Pentium II), который выполняет две основные функции: оперативное взаимодействие с пользователем и координация выполнения программных подзадач двумя управляющими контроллерами. Компьютер выдает позиционные уставки на вход контроллеров с максимальной частотой 2 кГц.

Исполнительный уровень системы аппаратно выполнен на двух управляющих контроллерах (типа "Advantech PCL-832"), каждый из которых одновременно управляет тремя степенями подвижности робота. Контроллеры установлены в параллельные слоты компьютера, в их состав входят декодер, вычислительное устройство и ЦАП, работа которых синхронизирована. На вход каждого усилителя-модулятора (типа АМС- 25А) от контроллера поступает маломощный аналоговый сигнал, где он преобразуется в широтно-модулированные силовые импульсы, непосредственно управляющие вращением двигателей. Таким образом, управляющие контроллеры сочетают функции информационного и информационно-электрического преобразователей.

Важным преимуществом рассматриваемой системы (см. рис. 2.12) по сравнению с традиционной структурой (см. рис. 2.11) является доступ в реальном времени компьютера верхнего уровня к информации о текущем состоянии системы, что позволяет применять алгоритмы адаптивного управления движением.

Формула расчета показателя функционально-структурной интеграции для данной управляющей подсистемы для n каналов управления имеет вид

$$I_2^{FS} = \frac{3n}{1+2+n} - 1 = \frac{2n-3}{n+3}. \quad (2.6)$$

Зависимость показателя ФСИ от числа степеней подвижности манипулятора представляет собой участок возрастающей гиперболы, которая в пределе стремится к показателю $I_{\max} = 2$. Характерные численные значения функции $I^{FS}(n)$ в диапазоне $n = [1, 6]$ приведены ниже.

Число каналов	1	2	3	4	5	6
$I_2^{FS}(n)$	-0,25	+0,20	+0,50	+0,71	+0,86	+1,00

Таким образом, рассматриваемая структура неэффективна (показатель отрицателен) для однокоординатной системы (при $n = 1$), и значения показателя ФСИ становятся положительными только начиная с двух каналов управления. Для шестистепенного манипулятора "PUMA-560" показатель ФСИ равен 1,0, что позволяет отнести эту структуру к мехатронным решениям.

Этот класс систем управления в настоящее время предлагается на рынке целым рядом ведущих фирм (Ggilil, Delta Таи, MEI), которые производят системы компьютерного управления движением для многокоординатных роботов, производственных машин и мехатронных систем. Высокая эффективность управляющих контроллеров по критерию ФСИ хорошо коррелируется с их оценками по стоимости и компактности, что в свою очередь положительно влияет на массогабаритные и ценовые характеристики конечной продукции - мехатронных и робототехнических систем.

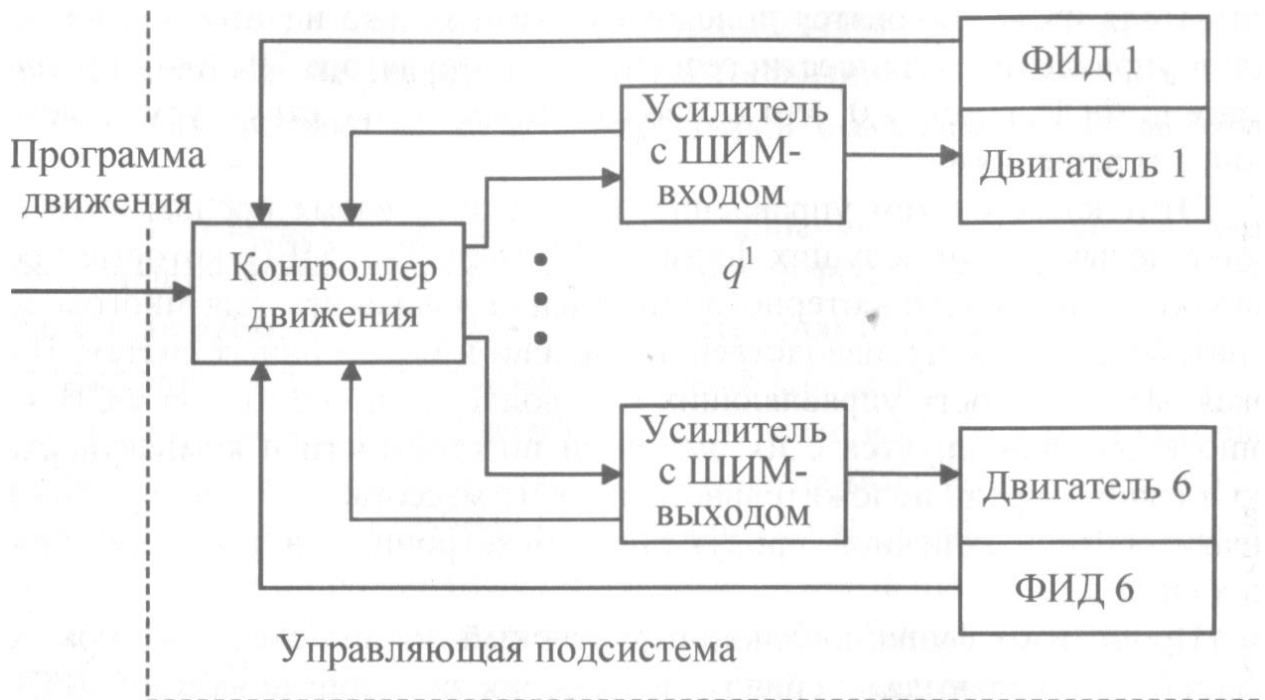
Продолжим функционально-структурный анализ системы управления робота с целью дальнейшего повышения значений показателя ФСИ. Проектирование системы управления нового уровня представляется целесообразным сосредоточить на двух главных точках интеграции:

- 1) реализация всех функций информационного преобразователя в едином структурном модуле;
- 2) сосредоточение функции информационно-электрического преобразования в одном структурном блоке.

Таким образом, в предлагаемой системе робот является единым объектом управления, а не набором отдельных звеньев. С прикладной точки зрения указанные решения позволяют также устранить два существенных недостатка, присущих рассмотренным выше системам: наличие аналоговой связи между контроллером и усилителем-модулятором и замыкание контуров скоростной и токовой обратных связей в усилителе. В производственных условиях интерфейсы аналогового типа значительно уменьшают помехозащищенность и робастность системы управления.

Один из возможных вариантов системы управления, где реализованы указанные решения, представлен на рис. 2.13.

Ядром разработанной системы управления является контроллер движения (КД), который выполняет все заданные информационные преобразования. В состав системы входят также усилитель с широтноимпульсным входом и фотоимпульсные датчики обратной связи.



Важнейшим преимуществом данной системы управления является участие КД как в планировании траектории робота, так и в отработке программного движения. Это позволяет применять *современные методы интеллектуального и адаптивного управления роботами и манипуляторами*. Контроллер движения в представленном варианте реализован как аппаратно-программное сочетание цифрового сигнального процессора (DSP-processor) и блоков FPGA (Field Programmable

Gate Arrays). В системе исключено цифроаналоговое преобразование сигналов, так как на выходе блоков FPGA сразу формируется широтно-модулированный сигнал, который, по сути, имеет цифровое представление.

Функцию информационно-электрического преобразования выполняет усилитель с ШИМ-входом. ШИМ-сигнал, поступающий от контроллера движения, может иметь только два уровня (высокий и низкий) и при этом является маломощным, что принципиально отличает данную схему от традиционных широтно-импульсных модуляторов.

Показатель функционально-структурной интеграции для рассматриваемой системы (см. рис. 2.13) в общем случае (для n каналов управления) имеет вид

$$I_3^{FS} = \frac{3n}{1+n} - 1 = \frac{2n-1}{n+1}. \quad (2.7)$$

Численные значения функции $I_3^{FS}(n)$, которая, как и в предыдущем случае, является гиперболой, приведены ниже.

Число каналов	1	2	3	4	5	6
$I_3^{FS}(n)$	+0,5	+1,0	+1,25	+1,4	+1,5	+1,57

Для шестистепенного робота получили $I_3^{FS} = 1,57$, т.е. наибольшее значение показателя ФСИ из всех рассмотренных вариантов построения системы управления.

Очевидно, что все аспекты анализа, классификации и проектирования столь сложных систем, как мехатронные, не могут быть оценены единственным численным критерием. Тем не менее, введенный показатель ФСИ дает возможность сравнивать структуры мехатронных систем и определять уровень достигнутой интеграции для конкретного технического решения.

Лекция

Тема 1.3.9. Методы построения интегрированных мехатронных модулей и систем (Метод переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства)

ВОПРОСЫ

1. Метод переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с.121-132).
2. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5).

Метод переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства

Большой интерес представляет распределение функций между структурными элементами мехатронной системы. Современная тенденция при построении машин нового поколения заключается в переносе функциональной нагрузки от механических узлов к интеллектуальным (электронным, компьютерным и информационным) компонентам, которые легко перепрограммируются под новую задачу и при этом являются относительно дешевыми. Использование данного метода интеграции позволяет минимизировать механическую сложность мехатронной системы.

На рис. 2.14 представлен характерный график, который отражает динамику этого процесса в производственных машинах за 30 лет, начиная с 1970-х годов. Анализ показывает, что еще в начале 90-х годов XX века подавляющее большинство функций машины (более 70 %) реализовывалось механическим путем. Однако сейчас механические устройства все чаще становятся узким местом в сложных машинах. Это объясняется их недостаточной функциональной гибкостью, наличием трения, люфтов и упругостей в передачах, все возрастающей стоимостью изготовления.

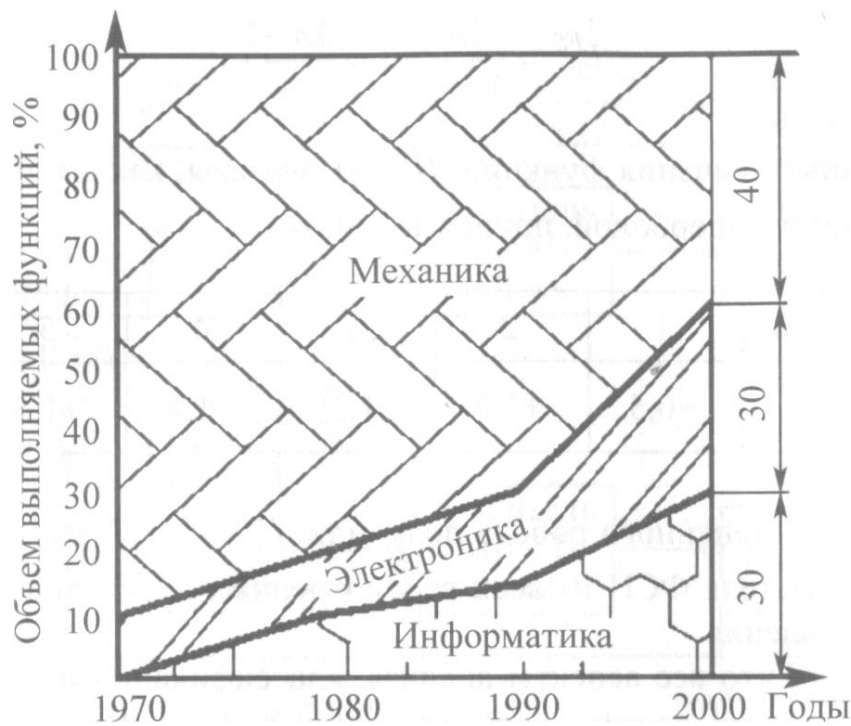


Рис. 2.14. Распределение функциональной нагрузки в современных производственных машинах

Поэтому в последующие десятилетия происходило постепенное вытеснение механических узлов сначала электронными, а затем и компьютерными блоками. Производители отдают предпочтение упрощенным механическим решениям, но со сложными интеллектуальными системами управления. В настоящее время в мехатронных системах объем функций (а соответственно и стоимость) распределен между механическими, электронными и компьютерными компонентами практически поровну. При этом доля компьютерной части возросла за последнее 10-летие вдвое, и есть все основания прогнозировать сохранение этой тенденции в технике будущего.

Мехатронный подход предполагает не дополнение, а замещение функций, традиционно выполняемых механическими элементами системы, на электронные и компьютерные блоки. Если одна и та же функция может быть реализована устройствами различной физической природы, то разработчик системы должен руководствоваться технологическими и организационно-экономическими критериями.

В методе функционально-структурной организации был показан пример переноса функциональной нагрузки на интеллектуальные устройства: это способ бессенсорного управления мехатронными модулями. Другим примером может служить метод электронной редукции, когда управляемый исполнительный механизм отслеживает движение задающего устройства (рис. 2.15).

По сути метод электронной редукции является аналогом способа копирующего управления, который был разработан и широко используется для дистанционно управляемых роботов и манипуляторов [16, 31]. Коэффициент редукции определяет отношение скоростей между степенями подвижности задающего (master) и исполнительного (slave) устройств. Значение коэффициента устанавливается программным путем и допускается его коррекция в процессе движения системы.

Для количественного анализа и оценки мехатронных модулей и систем введем специальную меру - показатель распределения функциональной нагрузки (РФН). Показатель РФН позволяет оценить объем функциональной нагрузки, которую несет каждый из структурных элементов или блоков в исследуемой системе. Чем выше значение данного показателя, тем большее влияние оказывает данный элемент на качество системы в целом, т.е. ее стоимость, надежность и другие комплексные характеристики. Показатель РФН является численной мерой, которая определяет важность структурной единицы (элемента, группы элементов, подсистемы) на основе наличия и числа ее связей с другими элементами системы. Чем выше ранг данного узла, тем большую функциональную нагрузку он несет, тем больше он влияет на качество системы в целом.

В данном вопросе используется метод анализа значимости структурных элементов, разработанный на основе теории графов и матриц [39, 40, 42, 69]. Алгоритм вычисления рангов структурных элементов и анализ распределения функциональной нагрузки внутри системы имеет следующий вид.

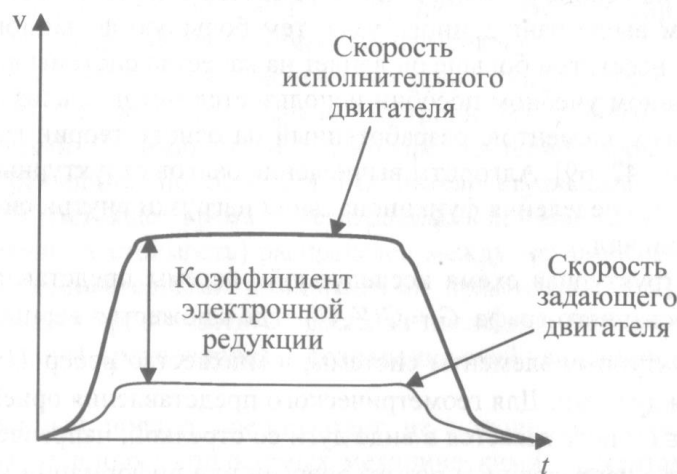
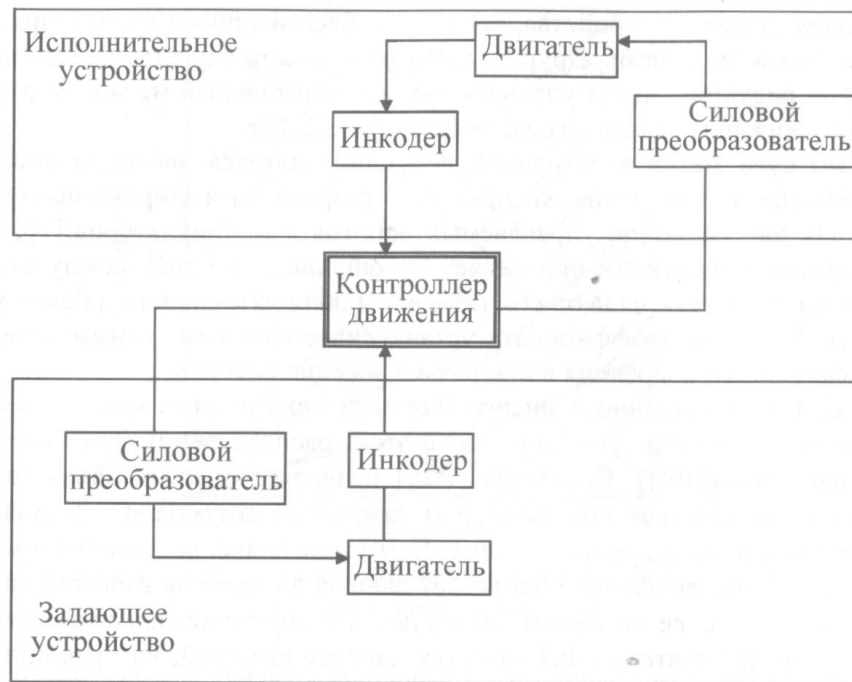


Рис. 2.15. Система управления движением на основе метода электронной редукции

1. Структурная схема исследуемой системы представляется в виде ориентированного графа $G = G(V, U)$, где множество вершин V составляет структурные элементы системы, а множество ребер U отображает связи между ними. Для геометрического представления ориентированное ребро $u \in U$ показывается в виде дуги со стрелкой, направление которой совпадает с направлением потока энергии или информации между соединяемыми вершинами. Рассматриваются только связанные графы, в которых для любой пары вершин $(v_i, v_j) \in V$, $(i, j = 1, \dots, n)$ существует соединяющий их путь.

2. Для построенного графа формируется матрица смежности $A = A(V, U)$.

Пусть структура системы содержит n вершин $(X_1, X_2, \dots, X_n) \in V$, соединенных m ребрами $(u_1, u_2, \dots, u_m) \in U$. Тогда получаем матрицу A размером $(n \times n)$, которая состоит из нулей и единиц. Элемент матрицы $a_{ij} = 1$, если граф содержит ребро $u_{ij} \in U$, направленное от вершины X_i к j -му узлу. В противном случае принимается, что $a_{ij} = 0$. Число единичных элементов в матрице A будет равно числу ребер.

3. Определяем матрицу R по следующей формуле [39]:

$$R = A + A^2 = A(E + A), \quad (2.8)$$

где A – матрица смежности; E – единичная матрица.

4. Ранг элемента X_i определяется как сумма элементов i -й строки матрицы R :

$$\text{rang} X_i = \sum_{j=1, n} r_{ij}. \quad (2.9)$$

Таким образом, ранг структурного элемента представляет собой векторную норму первого порядка матрицы R в пространстве C^n (n - мерное вещественное пространство). Иногда такой вектор еще называется манхэттенским вектором, т.е. его ранг рассчитывается суммированием элементов в строках матрицы.

5. Показатель РФН для структурного элемента X_i определяется выражением

$$I_i^{DFL} = \frac{\text{rang } X_i \cdot 100\%}{\sum_{i=1, \dots, n} \text{rang } X_i}. \quad (2.10)$$

Как следует из формулы (2.10), значение этого показателя определяется в процентном соотношении и нормализуется таким образом, что сумма показателей РФН всех элементов системы единична для любого исходного графа, т.е.

$$\sum_{i=1, \dots, n} I_i^{DFL} = 1.$$

Такая нормализованная форма удобна для сравнительного анализа распределения функциональной нагрузки в системах различной сложности и с различными типами структуры.

5. Расчет общего показателя РФН группы элементов, входящих в определенную подсистему $g \in G$, производится суммированием показателей РФН составляющих элементов.

Например, если заданная группа g состоит из k элементов $V \in (X_1, X_2, \dots, X_k)$, тогда показатель РФН группы получается как сумма k показателей:

$$I_g^{DFL} = \sum_{i=1, \dots, k} I_i^{DFL}. \quad (2.11)$$

Для оценки функциональной нагрузки целесообразно определить среднее значение показателя РФН для элементов данной группы:

$$\bar{I}_g = I_g^{DFL} / k. \quad (2.12)$$

7. Ранжирование элементов мехатронной системы производится на основе значений их показателей РФН и делается заключение о распределении функциональной нагрузки в исследуемой системе.

Представленную методику расчета показателя РФН рассмотрим на примере трех вариантов системы управления робота "PUMA", которые были изложены ранее (см. рис. 2.10-2.13). Структура исследуемой системы включает в себя как управляющую подсистему, так и электромеханическую часть (электродвигатель и фотоимпульсные датчики обратной связи), которая будет неизменной при выполнении всего анализа. Полученные значения показателей РФН рассчитаны для трех вариантов построения подсистемы управления. Графы, представляющие структурные модели рассматриваемых систем, показаны на рис. 2.16, 2.17, 2.18.

Граф G_1 , который соответствует традиционной системе управления, имеет наибольший размер: он содержит 32 вершины ($n = 32$) и 43 ребра ($m = 43$). Для графа G_2 , разработанного для системы второго уровня интеграции, имеем $n = 21$ и $m = 26$. Наименьшее число структурных элементов (а следовательно, и вершин), содержит граф G_3 для системы управления на базе контроллера движения ($n = 19$, $m = 30$).

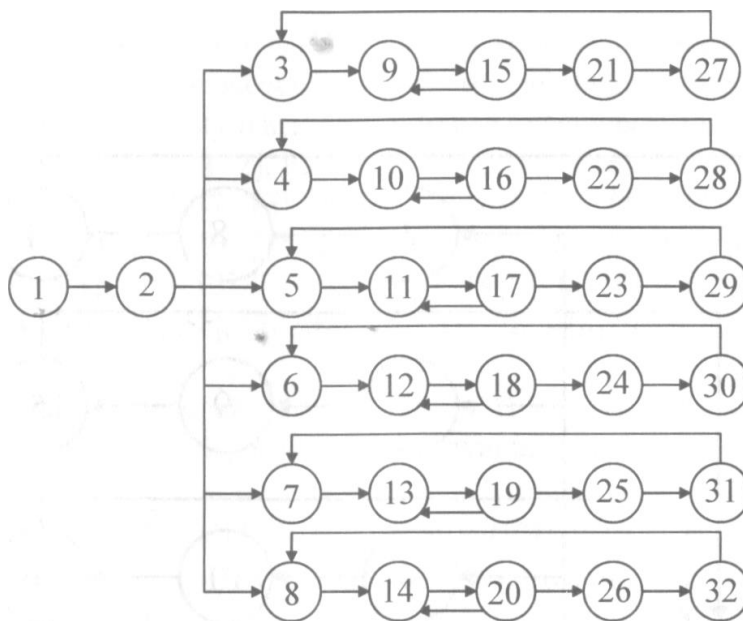


Рис. 2.16. Структурная модель традиционной системы управления манипулятора "PUMA-560":

1 - центральный процессор; 2 - демультиплексор; 3-8 - микропроцессоры; 9-14 - аналоговые усилители; 15-20 - широтно-импульсные модуляторы; 21-26 - двигатели; 27-32 - фотоимпульсные датчики обратной связи

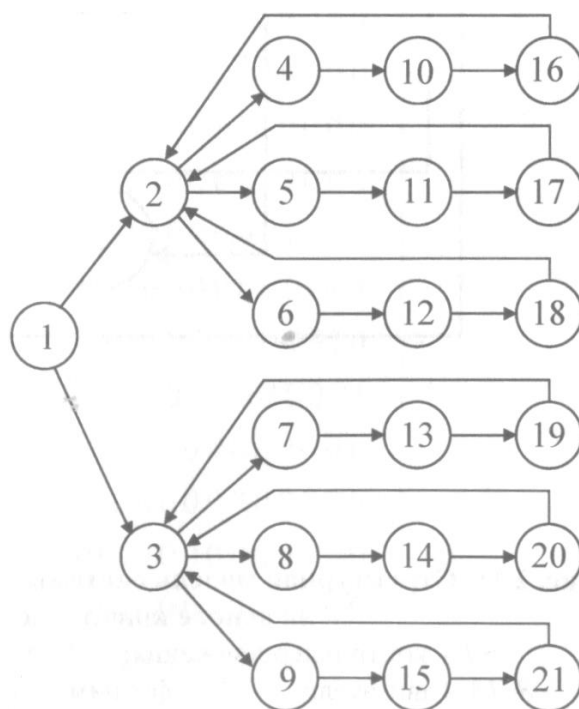


Рис. 2.17. Структурная модель системы управления робота "PUMA-560" на основе управляющих контроллеров:

1 - управляющий компьютер; 2,3- управляющие контроллеры;

4-9 - усилители-модуляторы; 10-15 - двигатели; 16-21 - фотоимпульсные датчики обратной связи

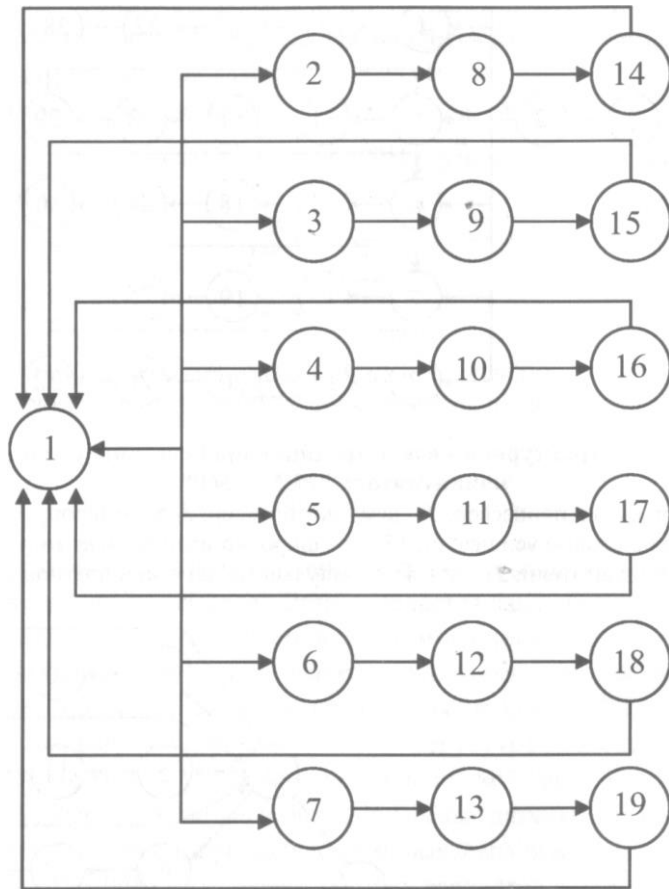


Рис. 2.18. Структурная модель системы управления робота "PUMA-560" на основе контроллера движения:

1 – контроллер движения; 2–7 – усилители с ШИМ-входом;
8–13 – двигатели; 14–19 – фотоимпульсные датчики обратной связи

Матрица соответствия $A_1(32 \times 32)$ для графа G_1 содержит 1024 элемента, из которых 42 являются единичными (по числу ребер в графе G_1), остальные элементы – нулевые. Единичные значения имеют следующие элементы матрицы A_1 : [1, 2], [2, 3], [2, 4], [2, 5], [2, 6], [2, 7], [2, 8], [3, 9], [4, 10], [5, 11], [6, 12], [7, 13], [8, 14], [9, 15], [10, 16], [11, 17], [12, 18], [13, 19], [14, 20], [15, 9], [15, 21], [16, 10], [16, 22], [17, 11], [17, 23], [18, 12], [18, 24], [19, 13], [19, 25], [20, 14], [20, 26], [21, 27], [22, 28], [23, 29], [24, 30], [25, 31], [26, 32], [27, 3], [28, 4], [29, 5], [30, 6], [31, 7], [32, 8].

Матрицы соответствия $A_1(32 \times 32)$, $A_2(21 \times 21)$ и $A_3(19 \times 19)$ для графов соответственно G_1 , G_2 , G_3 имеют следующий вид:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 01100000000000000000 \\ 00011100000000000000 \\ 00000011100000000000 \\ 00000000010000000000 \\ 00000000010000000000 \\ 00000000000100000000 \\ 00000000000010000000 \\ 00000000000001000000 \\ 00000000000000100000 \\ 00000000000000010000 \\ 00000000000000001000 \\ 00000000000000000100 \\ 00000000000000000010 \\ 00000000000000000001 \\ 01000000000000000000 \\ 01000000000000000000 \\ 01000000000000000000 \\ 00100000000000000000 \\ 00100000000000000000 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 01111110000000000000 \\ 10000001000000000000 \\ 10000000100000000000 \\ 10000000010000000000 \\ 10000000001000000000 \\ 10000000000100000000 \\ 10000000000010000000 \\ 00000000000001000000 \\ 00000000000000100000 \\ 00000000000000010000 \\ 00000000000000001000 \\ 00000000000000000100 \\ 00000000000000000010 \\ 00000000000000000001 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \\ 10000000000000000000 \end{bmatrix}$$

Далее определяем матрицы R_1 , R_2 и R_3 , которые задаются выражениями:

$$R_1 = A_1 + A_1^2, \quad R_2 = A_2 + A_2^2, \quad R_3 = A_3 + A_3^2,$$

где A_i – матрица смежности графа G_i ($i = 1, 2, 3$).

В соответствии с (2.11) показатели РФН были определены для всех элементов исследуемых структурных вариантов на основе полученных матриц R_i ($i = 1, 2, 3$). Результаты расчета показаны на рис. 2.19.

Особый интерес представляет анализ функциональной нагрузки, которую несут компьютерные компоненты мехатронных систем. В традиционной системе управления (см. рис. 2.16, 2.19, а) центральный процессор и демультиплексор являются наиболее нагруженными элементами, в

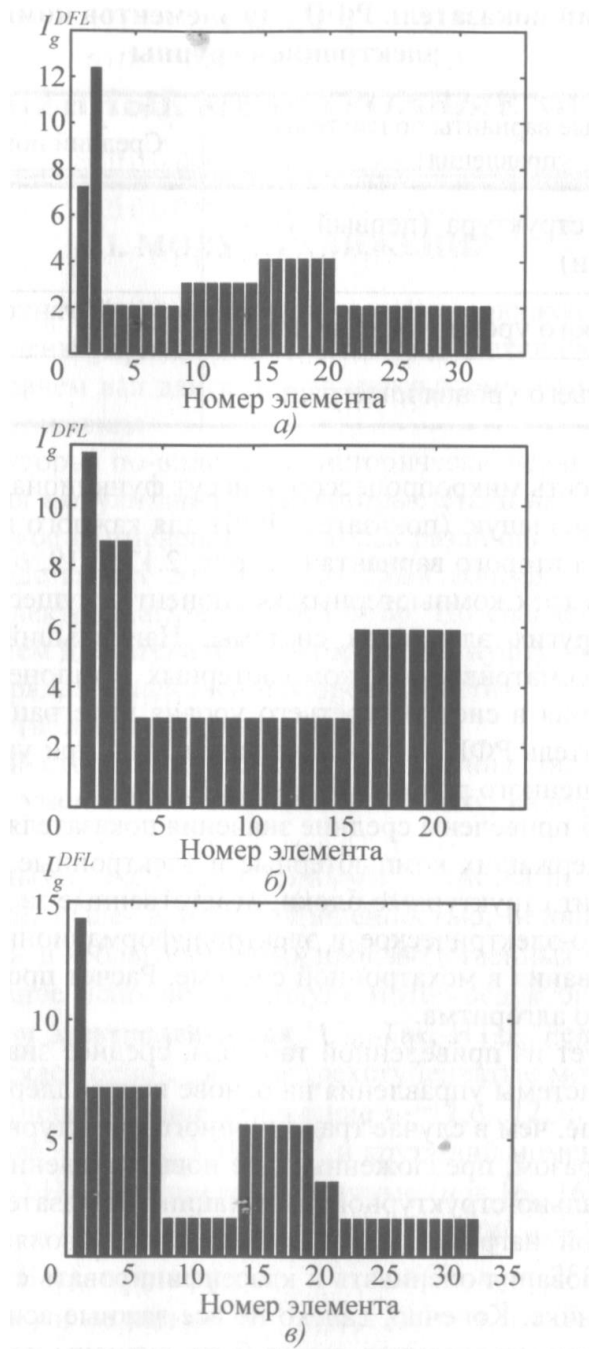


Рис. 2.19. Показатели распределения функциональной нагрузки для элементов:
а – традиционной системы управления; *б* – системы управления на основе управляющих контроллеров; *в* – системы управления на основе контроллера движения

2.5. Средний показатель РФН для элементов компьютерной и электронной группы

Структурные варианты подсистемы управления	Средний показатель РФН, %
Традиционная структура (первый уровень интеграции)	7,6
Структура второго уровня интеграции	12,4
Структура третьего уровня интеграции	21,3

то время как шесть микропроцессоров несут функциональную нагрузку в несколько раз меньшую (показатель РФН для каждого из них составляет около 2 %). Для второго варианта (см. рис. 2.17, 2.19, б) показатель РФН для каждого из трех компьютерных компонентов существенно превосходит нагрузку других элементов системы. Наибольший показатель РФН среди всех рассматриваемых компьютерных компонентов имеет контроллер движения в системе третьего уровня интеграции (см. рис. 2.18, 2.19, в). Показатель РФН этого блока равен 14% при управлении движением шестистепенного робота.

В табл. 2.5 приведены средние значения показателя РФН для группы элементов, содержащих компьютерные и электронные компоненты. Эта группа содержит структурные блоки, ответственные за информационное, информационно-электрическое и электроинформационное функциональные преобразования в мехатронной системе. Расчет проводился по (2.13) рассмотренного алгоритма.

Как следует из приведенной таблицы, среднее значение показателя РФН для подсистемы управления на основе контроллеров движения почти в 3 раза выше, чем в случае традиционного структурного варианта.

Таким образом, предложенные две новые численные меры - критерий функционально-структурной интеграции и показатель распределения функциональной нагрузки - в совокупности позволяют на начальном этапе проектирования оценивать и классифицировать структурные решения в мехатронике. Конечно, далеко не все важные аспекты такой сложной системы, как мехатронная, могут быть оценены несколькими числовыми показателями. Тем не менее, становится возможным сравнивать и анализировать важные структурные характеристики системы на стадиях разработки концепции системы и проектирования ее составных частей.

Лекция

Тема 1.3.10. Математическое моделирование и оптимизация движений мехатронных систем (Тензорно-геометрический метод построения математических моделей многозвенных машин)

ВОПРОСЫ

1. Построение тензорно-геометрической модели для кинематического анализа многозвенных машин.
2. Построение тензорно-геометрической модели для анализа упругих свойств многозвенных машин.
3. Построение тензорно-геометрической модели для динамического анализа многозвенных машин.

ЛИТЕРАТУРА

18. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с.183-196).
19. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5).

Введение

Современное поколение мехатронных машин и систем, предназначенных для выполнения новых служебных и функциональных задач, отличается рядом характерных особенностей. К ним относятся: нелинейность кинематической структуры, выполнение движений по криволинейным траекториям в пространстве и сложные законы перемещения во времени, функционирование в изменяющихся и неопределенных внешних средах.

Проблематика построения математических моделей мехатронных машин определяется следующими основными положениями.

8) Многомерность системы.

В мехатронных системах нового поколения наиболее распространены универсальные механизмы, которые обеспечивают управляемое перемещение по шести степеням подвижности. Однако все чаще находят применение кинематические структуры с избыточностью для выполнения операций в средах с препятствиями либо в реконфигурируемых системах.

Б. Взаимосвязанность движений звеньев.

Многосвязность системы означает, что движение каждого звена кинематически и динамически влияет на движение остальных звеньев. Данное взаимовлияние происходит через механическое устройство, объект работ и источник энергии. К тому же для многих технологических задач параметры внешних воздействий, приложенных к рабочему органу, заранее не определены.

9) *Нелинейность координатного базиса.*

Опыт применения производственных и специальных машин с гибридной и параллельной кинематикой выявил существенные трудности, которые возникают у инженерно-технического персонала при их установке, программировании и обслуживании. Переменность параметров в нелинейных уравнениях может приводить к потере управляемости системой в особых (сингулярных) конфигурациях. С точки зрения пользователя, наибольшую проблему представляют трансформации движений рабочего органа из обобщенной системы координат в декартовую систему. Задача управления машиной состоит в исполнении желаемого движения рабочего органа, который целенаправленно действует на объект работ, испытывая при этом со стороны внешней среды возмущающее воздействие. Движение рабочего органа как конечного звена мехатронной машины обеспечивается взаимосвязанными перемещениями исполнительных приводов и звеньев механического устройства.

Г. *Неоднородность и анизотропия свойств машины.*

Мехатронные машины с нелинейным координатным базисом отличаются неоднородностью характеристик (кинематических, скоростных, динамических, упругих) в рабочей зоне. Это означает, что, например, желаемая скорость рабочего органа может быть достигнута только в ограниченной области рабочего пространства. Если объект работ расположен вне этой области, то машина не может выполнить заданную технологическую операцию. Различие свойств может проявляться не только в разных точках рабочей зоны, но и в разных направлениях (анизотропия свойств). Анизотропия накладывает существенные ограничения на взаимное расположение рабочего органа и объекта работ, например на сборочных операциях, где требуется приложить вектор силы в заданном направлении.

Д. *Необходимость решения задачи управления в пространстве и во времени.*

Программа движения мехатронных систем предусматривает выполнение функциональных движений машиной в пространстве и во времени. Необходимо рассчитать и оптимизировать траектории движения всех звеньев в обобщенных ко-

ординатах и рабочего органа - в декартовом пространстве. Для выполнения программы движения во времени должны быть определены и реализованы желаемые скорости, ускорения и развиваемые усилия для всех исполнительных приводов системы.

Характерной особенностью мехатронных систем является возможность разделения задач управления движением на пространственную и временную. Это означает, что траектория перемещения рабочего органа в пространстве и его контурная скорость могут планироваться отдельно и с использованием различных критериев оптимизации. Например, для робототехнологического комплекса механообработки, программа перемещения и ориентации инструмента в пространстве определяется по геометрической модели обрабатываемой детали. Скорость движения рабочего органа робота вдоль траектории должна быть выбрана с учетом специфики рабочего процесса: размеров и твердости материала заготовки, типа инструмента, а также технических возможностей приводов инструментальной головки и манипулятора.

Перечисленные особенности мехатронных машин обуславливают сложность построения их адекватных и при этом наглядных и удобных для синтеза управления математических моделей.

1. Построение тензорно-геометрической модели для кинематического анализа многозвенных машин

Тензорное исчисление очень удобно для изучения сложных многомерных объектов, поскольку оно имеет дело со свойствами, которые не зависят от выбора координатной системы.

Тензорный анализ основан на исследовании *инвариантов*, которыми называются объекты, остающиеся неизменными при преобразованиях координат [62]. Инвариант можно описать в заданной координатной системе некоторым уравнением. Это уравнение изменит свою форму при изменении координатного базиса, но сам инвариант остается неизменным. Тензорный анализ дает законы вычисления и связи между координатами инварианта при переходе от одного базиса к другому.

Именно поэтому тензорный анализ стал эффективным методом аналитической механики и неевклидовой геометрии, теории упругости механики и сплошных сред [2, 33, 59, 62]. Проблема трансформации координат является ключевой и для

мехатроники, особенно при анализе многозвенных машин со сложными координатными базисами.

Проектирование мехатронных систем является сложной многофакторной проблемой выбора и оптимизации принимаемых решений. На сегодняшний день теоретический фундамент не позволяет раскрыть все возникающие в процессе проектирования закономерности и связи и окончательные решения принимаются разработчиком зачастую на основе его опыта и видения задач. Поэтому крайне важным является представление ему информации о свойствах многозвенной мехатронной машины в наглядной геометрической форме. Сочетание методов тензорного анализа, матричного исчисления и многомерной геометрии дает такую возможность. Мы будем описывать свойства многозвенных систем в *форме характеристических поверхностей, привязанных к отдельным точкам их рабочей зоны*.

Рассмотрим метод построения математических моделей мехатронных машин, которые описывают их кинематические, динамические и упругие свойства на основе тензорно-геометрического анализа соответствующих инвариантов.

1. Построение тензорно-геометрической модели для кинематического анализа многозвенных машин

В качестве кинематического инварианта для анализа движений мехатронных машин выберем квадрат модуля скорости концевой точки машины - ее рабочего органа. С технологической точки зрения модуль скорости рабочего органа - это важная величина, которая задается при программировании движений мехатронных машин, выполняющих операции механообработки, сварки, покраски и т.п. Эта величина является инвариантом, т.е. ее значение одинаково в любой системе координат.

В декартовых координатах кинематический инвариант I_k вычисляется простейшим образом:

$$I_k = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2,$$

где v_x , v_y , v_z - проекции вектора скорости на оси декартовой системы координат. Однако в мехатронных машинах исполнительные приводы приводят в движения звенья, поэтому прикладной интерес представляет анализ скоростных возможностей машины в обобщенных координатах. Для перехода к обобщенной системе координат воспользуемся известным соотношением для n -звенного механизма:

$$\vec{v} = J \frac{d\vec{q}}{dt}, \quad (5.1)$$

где $v = (v_x, v_y, v_z)$ - вектор-столбец (3×1) скорости рабочего органа в

декартовой системе координат; $\frac{d\vec{q}}{dt}$ - вектор-столбец ($n \times 1$) обобщенных скоростей механизма; J - матрица Якоби размерности ($3 \times n$).

Тогда в обобщенных координатах выбранный кинематический инвариант рассчитывается по формуле

$$I_k = \vec{v}^T = \left(\frac{d\vec{q}}{dt} \right)^T (J^T J) \left(\frac{d\vec{q}}{dt} \right), \quad (5.2)$$

где J^T - транспонированная матрица Якоби. Пример вычисления элементов прямой и транспонированной матриц для двухзвенного манипулятора "SCARA" дан в Приложении [1].

Основу полученного выражения составляет матрица манипулятивности $M (n \times n)$, введенная проф. Т. Йошикава:

$$M = (J^T J). \quad (5.3)$$

Например, для двухзвенного манипулятора типа "SCARA" матрица манипулятивности M имеет следующий вид:

$$M = J^T J = \begin{bmatrix} L_1^2 + 2L_1L_2 \cos q_2 + L_2^2 & L_1L_2 \cos q_2 + L_2^2 \\ L_1L_2 \cos q_2 + L_2^2 & L_2^2 \end{bmatrix}$$

Характерно, что элементы матрицы M зависят только от второй обобщенной координаты q_2 и длин звеньев.

В общем случае для многозвенной машины кинематический инвариант в обобщенных координатах определяется формулой

$$I_K = \left(\frac{d\vec{q}}{dt} \right)^T M \left(\frac{d\vec{q}}{dt} \right). \quad (5.4)$$

Полученное выражение можно представить как симметричную квадратичную форму обобщенных скоростей

$$I_K = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} \frac{dq_i}{dt} \frac{dq_j}{dt}. \quad (5.5)$$

Квадратичные формы допускают геометрическую интерпретацию при помощи характеристических поверхностей. В общем случае для симметричных квадратичных форм характеристическая поверхность имеет форму n -мерного эллипсоида. Уравнение эллипсоида для выбранного кинематического инварианта имеет вид

$$\vec{U}^T M \vec{U} = 1, \quad (5.6)$$

где $\vec{U}$ – вектор, задающий направление движения в пространстве.

Для двухзвенного механизма получаем эллипс, построенный в обобщенной системе координат, центр которого расположен в точке рабочей зоны с координатами (q_1, q_2) , где определена матрица Якоби (рис. 5.1). Квадрат расстояния от центра эллипса до его поверхности можно найти по формуле

$$1/R^2 = [\cos \beta, \sin \beta] M [\cos \beta, \sin \beta]^T, \quad (5.7)$$

где β – угол, задающий направление движения.

Тогда длины малой и большой полуосей эллипса будут обратно пропорциональны соответственно максимальному и минимальному собственным числам матрицы M :

$$R_{\min} = 1/\sqrt{\lambda_{\max}}; \quad R_{\max} = 1/\sqrt{\lambda_{\min}}. \quad (5.8)$$

Формула (5.8) справедлива и для общего случая n -мерного эллипсоида. Представление кинематического тензора в виде многомерного эллипсоида (будем для краткости называть его "эллипсоидом кинематики" мехатронной машины) позволяет дать наглядную геометрическую интерпретацию задачи поиска и выбора оптимального направления движения.

Примем, что оптимальным с кинематической точки зрения является направление, при котором достигается максимальная скорость рабочего органа при фиксированной норме обобщенных скоростей. Другими словами, необходимо найти направление, где можно добиться максимального эффекта по скорости рабочего органа при заданных "скоростных затратах" в степенях подвижности машины. В такой постановке задачи оптимизации мехатронная машина рассматривается как преобразователь обобщенных скоростей в скорость ее концевой точки - рабочего органа.

Рассмотрим математическую постановку этой задачи. Решение ищется в заданной точке рабочей зоны, следовательно, вектор обобщенных координат полагаем известным. Критерием оптимизации является значение кинематического инварианта (5.4). Условием поиска решения является постоянство нормы обобщенных скоростей. В последующих выводах принимается единичное значение данной нормы:

$$\left(\frac{d\vec{q}}{dt} \right)^T \left(\frac{d\vec{q}}{dt} \right) = 1. \quad (5.9)$$

Требуется найти направление движения рабочего органа, которое доставляет максимум выбранному критерию оптимальности при условии (5.9).

Для плоской задачи (см. рис. 5.1) направление движения определяется углом ориентации β вектора скорости.



Рис. 5.1. Эллипсоид кинематики мехатронной машины

Из выражения (5.4) для кинематического инварианта следует, что оптимальным будет направление собственного вектора матрицы манипулятивности M , которому соответствует максимальное собственное число этой Матрицы. На основании (5.8) определяем, что искомое направление задается углом β_{opt} для малой полуоси эллипса кинематики. Учитывая симметрию эллипсоида, получаем два решения поставленной задачи (см. рис. 5.1).

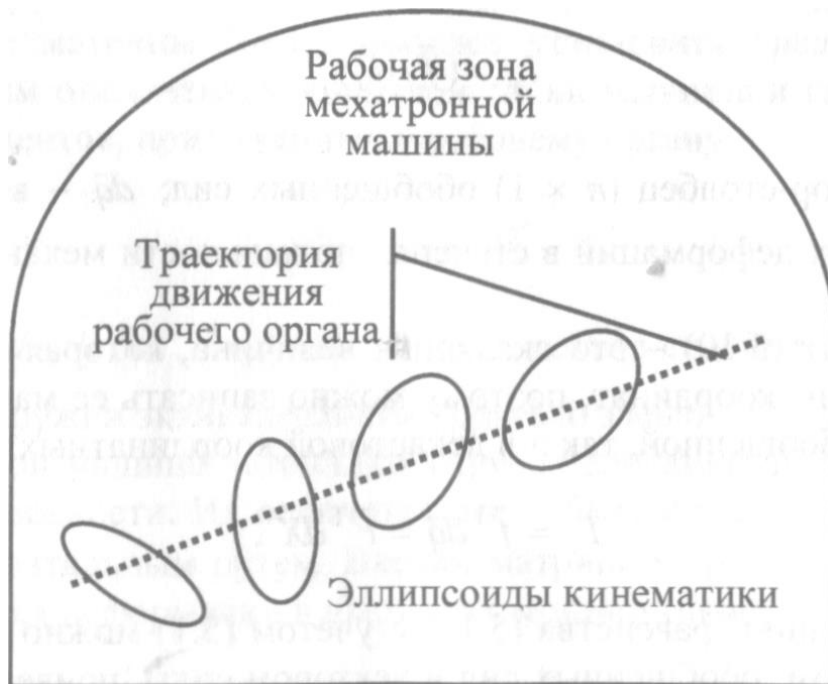


Рис. 5.2. Скоростная карта рабочей зоны

С помощью семейства характеристических поверхностей можно построить скоростную карту рабочей зоны мехатронной машины (рис. 5.2). В дальнейшем эту карту можно использовать для расчета траекторий движения в соответствии со скоростными ограничениями или критериями, обусловленными технологическим процессом, а также для планирования оптимальных по времени траекторий.

2. Построение тензорно-геометрической модели для анализа упругих свойств многозвенных машин

Необходимость анализа упругих свойств мехатронных машин возникает при автоматизации операций, где рабочий орган находится в силовом контакте с объектом работ. К числу таких операций можно отнести, например, механообработку и сборку [77]. При механообработке для обеспечения заданной размерной точности деталей необходимо, чтобы погрешность отработки траектории мехатронной машины не превышала допустимого значения. Доминирующим фактором, определяющим эту погрешность, является упругая деформация механических звеньев и преобразователей движения.

Для анализа податливости мехатронных машин построим тензорную модель, описывающую упругие свойства механического устройства. Рассмотрение ограничим рамками линейной теории и малыми упругими деформациями. Инвариантом для анализа упругих характеристик мехатронных машин может служить работа обобщенных сил на малых перемещениях:

$$I_y = (\vec{f} \cdot d\vec{q}) \quad (5.10)$$

где $\vec{f}$ - вектор-столбец ($n \times 1$) обобщенных сил; $d\vec{q}$ - вектор-столбец ($n \times 1$) упругих деформаций в степенях подвижности механического устройства.

Инвариант (5.10) - это скалярная величина, которая не зависит от выбора системы координат, поэтому можно записать ее матричное выражение как в обобщенной, так и в декартовой координатных системах:

$$I_y = \vec{f}^T d\vec{q} = \vec{F}^T d\vec{X}. \quad (5.11)$$

На основании равенства (5.11) с учетом (5.1) можно вывести связь между вектором обобщенных сил и вектором силы, приведенным к концевой точке мехатронной машины:

$$\vec{f} = \mathbf{J}^T \vec{F}^* \quad (5.12)$$

где $\vec{F} = \text{col}[F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]$ - вектор-столбец (6×1), объединяющий компоненты главного вектора и главного момента действующих сил, заданный в декартовой системе координат; $\mathbf{J}^1$ - транспонированная матрица Якоби размерности ($n \times 6$).

Построим модель реального механического устройства как совокупность абсолютно жесткого механизма с идентичной кинематикой и эквивалентного упругого звена (ЭУЗ). ЭУЗ представляет собой условную многомерную пружину, привязанную к концевой точке механического устройства. Таким образом, абсолютно жесткий механизм моделирует кинематические характеристики машины, а ЭУЗ - ее податливость, условно сосредоточенную в конечном звене. С технологической точки зрения наибольший интерес представляют упругие свойства машины в концевой точке, так как именно здесь и происходит силовое взаимодействие рабочего органа и объекта работ.

Эквивалентное упругое звено можно описать диагональной матрицей $\mathbf{C}_{\text{ЭУЗ}}$ (6×6):

$$\mathbf{C}_{\text{ЭУЗ}} = \text{diag} [C_x, C_y, C_z, C_{\text{ш}}, C_{\text{ay}}, C_{\text{az}}]. \quad (5.13)$$

Элементами этой матрицы являются коэффициенты жесткости "пружин" ЭУЗ: три пружины сжатия-растяжения (с коэффициентами C_x, C_y, C_z) и три пружины кручения (с коэффициентами $C_{\text{ш}}, C_{\text{ay}}, C_{\text{az}}$).

Введение матрицы ЭУЗ позволяет установить следующую связь между упругим отклонением концевой точки машины и главным вектором сил и моментов, приложенных к рабочему органу:

$$F = C_{эуз} dX, \quad (5.14)$$

где $dX = col[dx, dy, dz, da_x, da_y, da_z]$ - вектор-столбец (6 x 1) малых деформаций пружин эквивалентного упругого звена.

В реальной машине источники упругих деформаций находятся в ее степенях подвижности. Их величины могут быть определены расчетным или экспериментальным путем. Введем матрицу упругости C [$n \times n$], которая описывает деформации в шарнирах механического устройства:

$$\vec{f} = C dq, \quad (5.15)$$

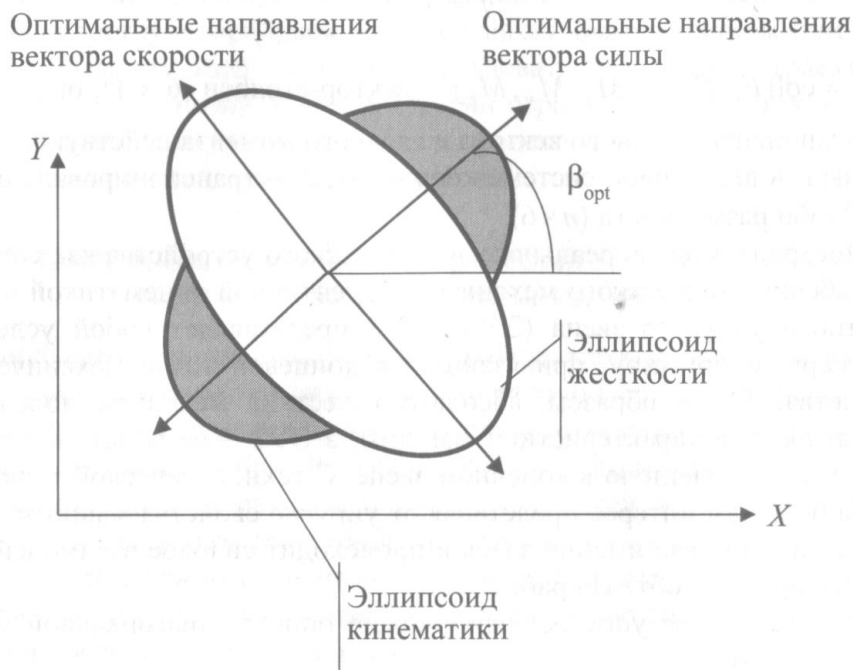


Рис. 5.3. Эллипсоид жесткости мехатронной машины

где $\vec{f}$ – вектор-столбец $(n \times 1)$ обобщенных упругих сил; $d\vec{q}$ – вектор-столбец $(n \times 1)$ упругих деформаций в степенях подвижности машины.

Из выражений (5.14) и (5.15) с учетом (5.12) получаем следующую матричную зависимость:

$$C_{\text{ЭУЗ}} = J^{-T} C J^{-1}, \quad (5.16)$$

где J^{-T} – транспонированная обратная матрица Якоби.

Таким образом, формула (5.16) позволяет определить матрицу ЭУЗ по известной матрице C в заданной конфигурации мехатронной машины. Выражения для обратной и транспонированной матриц манипулятора типа "SCARA" приведены в Приложении.

Матрице (5.16) можно поставить в соответствие характеристическую поверхность – эллипсоид жесткости (рис. 5.3). Уравнение эллипсоида жесткости имеет вид

$$\vec{U}^T C_{\text{ЭУЗ}} \vec{U} = 1. \quad (5.17)$$

Эллипсоид жесткости позволяет определить жесткость механического устройства, приведенную к его концевой точке, в любом интересующем направлении:

$$C_{\text{ЭУЗ}} = \vec{e}^T C_{\text{ЭУЗ}} \vec{e}, \quad (5.18)$$

где $\vec{e}$ – единичный вектор, в направлении которого определяется жесткость машины.

Направления главных осей эллипсоида жесткости задают собственные векторы матрицы $C_{\text{ЭУЗ}}$, а величины его полуосей определяются ее собственными числами. Центр эллипсоида расположен в фиксированной точке рабочей зоны. В общем случае размеры и ориентация эллипсоида жесткости зависят от координат рабочего органа. Как и в случае кинематического анализа (см. рис. 5.1), с помощью эллипсоида жесткости можно решать аналогичные задачи выбора оптимальных силовых направлений (см. рис. 5.3).

Важно отметить, что при принятых допущениях собственные векторы матриц манипулятивности (5.3) и эквивалентной жесткости (5.16) взаимно ортогональны. Это значит, что в направлении, которое оптимально с точки зрения развиваемой скорости, механическая система будет иметь наименьшую жесткость. Следовательно, при механообработке объект желательно размещать вдоль малой оси эллипсоида скорости. Тогда в касательном направлении система будет податливой, а в нормальном к траектории – предельно жесткой. Это позволит минимизировать

упругие отклонения рабочего органа от программной траектории, вызванные действием сил резания.

По аналогии с механическим многомерным устройством подход к построению модели на базе эквивалентного упругого звена можно применить для построения моделей и других частей мехатронной машины (например, инструментальной головки) [18]. В результате формируются математическая и компьютерная модели сложной технологической системы мехатронная машина - рабочий орган - инструмент - рабочий процесс.

3. Построение тензорно-геометрической модели для динамического анализа многозвенных машин

Для построения динамической модели в качестве инварианта выбираем полную кинетическую энергию многозвенного механизма. Кинетическая энергия является скалярной величиной, исследование и анализ которой лежит в основе целого ряда динамических моделей, глубоко разработанных в робототехнике и аналитической механике.

В общем случае для n-звенной машины удвоенная кинетическая энергия (динамический инвариант) в обобщенных координатах определяется формулой

$$2T = I_d = \left(\frac{d\vec{q}}{dt} \right)^T I \left(\frac{d\vec{q}}{dt} \right) \quad (5-19)$$

где I - тензор инерции (пхл) многозвенного механизма.

Получим выражение для динамического инварианта на примере двухзвенного манипулятора, работающего в полярной системе координат (рис. 5.4). Полная кинетическая энергия рассматриваемой механической системы состоит из двух слагаемых:

$$T = T_a + T_p, \quad (5.20)$$

где T_a , T_p - кинетическая энергия манипуляционного механизма и нагрузки.

Кинетическая энергия нагрузки определяется по формуле

$$T_p = 1/2 m_p v_p^2 + 1/2 I_p \omega_p^2, \quad (5.21)$$

где m_p - масса нагрузки; v_p - линейная скорость центра масс нагрузки; I_p - момент инерции нагрузки; ω_p - угловая скорость вращения нагрузки. Перечисленные переменные определяются следующим образом:

$$v_p = \dot{r}, \quad \omega_p = \dot{\varphi}, \quad I_p = m_p r^2.$$

Кинетическая энергия манипуляционного механизма определяется по формуле

$$T_a = 1/2 m_a v_c^2 + 1/2 I_a \omega_a^2, \quad (5.22)$$

где m_a - масса манипулятора; v_c - линейная скорость центра масс C манипулятора; I_a - момент инерции манипулятора; ω_a - угловая скорость вращения манипулятора.

Линейная и угловая скорости представляют собой обобщенные скорости механизма:

$$V_c = \frac{dr}{dt} = \dot{r}, \quad \omega_a = \dot{q}_2.$$

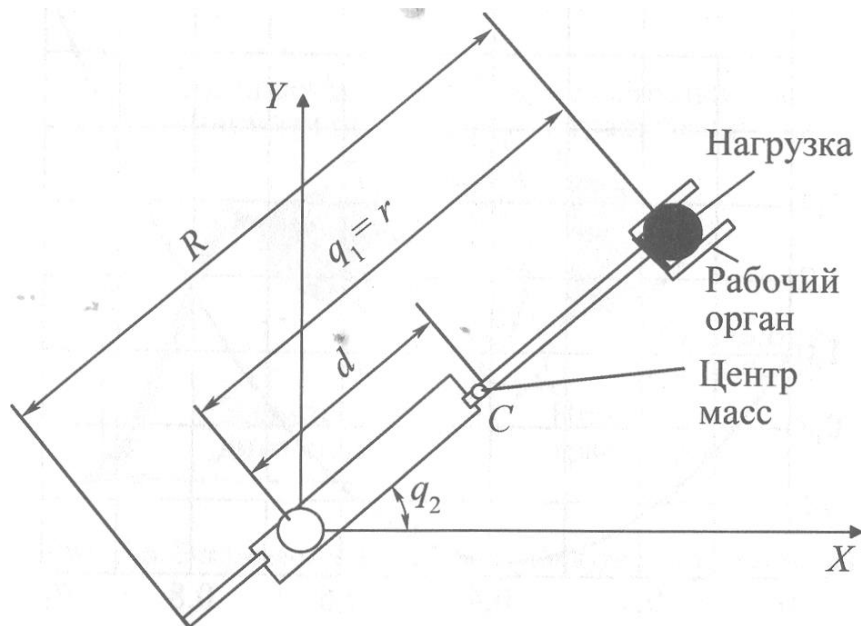


Рис. 5.4. Двухзвенный манипулятор с полярной системой координат

Момент инерции манипулятора относительно начала координат (рис. 5.4) можно рассчитать по формуле

$$I_a = I_C + m_a d^2 = \frac{m_a R^2}{12} + m_a \left(r - \frac{R}{2} \right)^2 = m_a \left(\frac{R^2}{3} + r^2 - rR \right),$$

где d — расстояние от центра масс до начала координат.

Складывая составляющие (5.21) и (5.22), получаем выражение для полной кинетической энергии в обобщенной системе координат:

$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{q}_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{q}_2)^2, \quad (5.23)$$

где m_1, m_2 – эквивалентные массы, приведенные к соответствующим обобщенным координатам.

Эквивалентные массы для рассматриваемого манипулятора можно вычислить по формулам:

$$\begin{aligned} m_1 &= m_a + m_p; \\ m_2 &= (m_a + m_p) q_1^2 + (-m_a R) q_1 + \frac{1}{3} m_a R^2. \end{aligned} \quad (5.24)$$

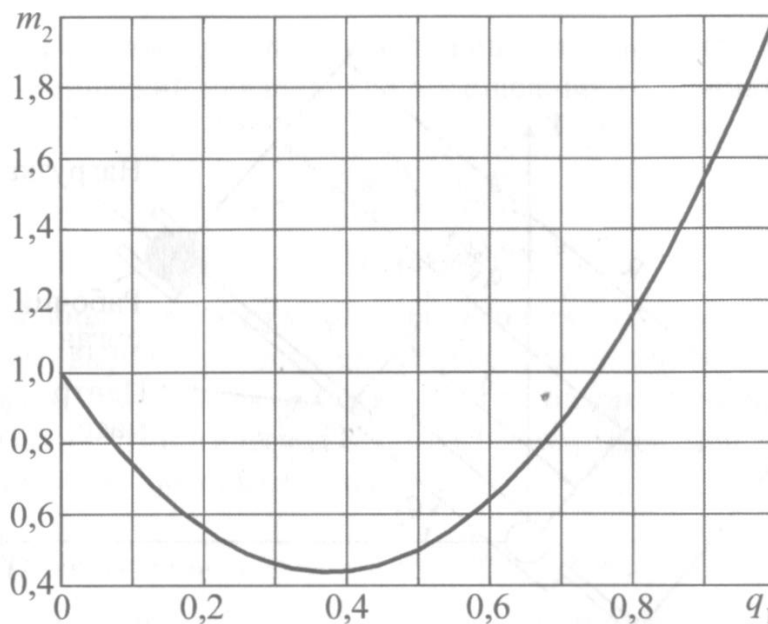


Рис. 5.5. Эквивалентные массы для двухзвенного манипулятора

Характерно, что масса m_2 является переменной величиной, которая зависит от обобщенной координаты q_1 – расстояния от полюса рабочего органа до начала координат. График зависимости, который построен для заданного набора параметров, представлен на рис. 5.5.

Тензор инерции для рассматриваемого манипулятора имеет следующую форму:

$$I = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2(q_1) \end{bmatrix}. \quad (5.25)$$

В общем случае для многозвенной машины динамический инвариант (5.19) можно представить как симметричную квадратичную форму обобщенных скоростей:

$$I_d = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij} \frac{dq_i}{dt} \frac{dq_j}{dt}, \quad (5.26)$$

где I_{ij} – элементы тензора инерции I ($n \times n$) механического устройства.

Матрице (5.26) можно поставить в соответствие характеристическую поверхность, которую назовем эллипсоидом динамики. Уравнение эллипсоида динамики в общем случае для n -степенной машины имеет вид

$$\bar{U}^T I \bar{U} = 1. \quad (5.27)$$

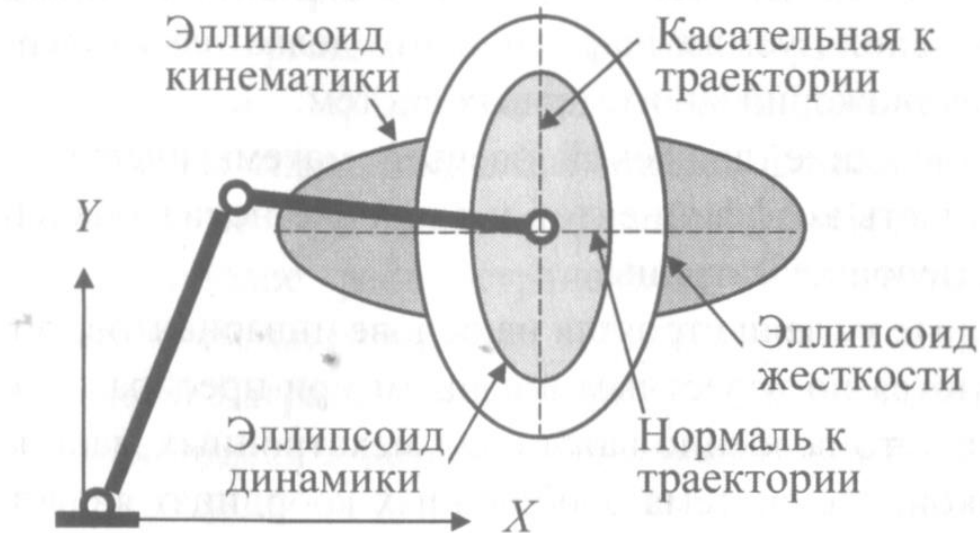


Рис. 5.6. Эллипсоид динамики мехатронной машины

Эллипсоид динамики описывает инерционные свойства механического устройства в данной точке рабочей зоны и в интересующем направлении движения (рис. 5.6). Большая ось эллипсоида указывает направление, в котором машина имеет минимальный момент инерции. Именно это направление движения наиболее выгодно с динамической точки зрения. При этом планировать движение можно с учетом кинематических, упругих и динамических характеристик машины в их совокупности. Так, на рис. 5.6 представлен оптимальный вариант взаимного расположения эллипсоидов кинематики, жесткости и динамики для операции механообработки заданного контура.

Динамический инвариант можно записать не только в обобщенной, но и в декартовой системе координат. С учетом выражения (5.1) из (5.19) следует

$$I_d = 2T = \bar{v}^T I_3 \bar{v}, \quad (5.28)$$

где $I_3 = J^{-T} I J^{-1}$ – эквивалентный тензор инерции многосвязного механизма.

Структура полученного тензора I_3 аналогична матрице эквивалентного упругого звена (5.16). Таким образом, совокупность трех тензоров – тензора кинематики

(5.2), тензора жесткости (5.11) и тензора динамики (5.19) - позволяет построить комплексную математическую модель, которая описывает кинематические, упругие и динамические характеристики мехатронной машины.

Основные преимущества тензорно-геометрического подхода:

1. Форма модели не зависит от числа степеней подвижности механизма и типов используемых шарниров, что делает ее универсальной для моделирования движений многомерных систем.

2. Взаимовлияние движений звеньев математически описывается через переменность коэффициентов и введение недиагональных элементов в соответствующие матрицы.

3. Тензорные модели строятся на основе инвариантов, поэтому легко трансформируются по известным правилам при преобразовании координатного базиса. Это особенно важно для мехатронных машин с нелинейной кинематикой, где система обобщенных координат является сложной и неудобной для программирования движений.

4. Геометрическая форма представления тензоров в виде характеристических поверхностей позволяет разработчику наглядно оценивать неоднородность и анизотропию свойств машины и оптимизировать ее движения, учитывая совокупность кинематических, динамических и жестко- стных характеристик.

Определенные ограничения в применении тензорно-геометрического подхода обусловлены тем, что введенные инварианты вычисляются в заданных точках рабочей зоны. Таким образом, это локальные оценки свойств мехатронных машин. Для анализа глобальных движений можно строить карты, как показано на рис. 5.2, которые представляют собой семейство характеристических поверхностей в опорных точках траектории. Ориентация, форма и размеры характеристических эллипсоидов в общем случае являются переменными и описывают неоднородность и анизотропию свойств многомерных машин. Для формирования непрерывных моделей рекомендуется использовать параметрический подход, изложенный в следующей лекции.

Лекция

Тема 1.3.11. Математическое моделирование и оптимизация движений мехатронных систем (Параметрические модели динамики многосвязных механизмов)

ВОПРОСЫ

1. Динамическая модель с лонгальным параметром.
2. Динамическая модель многостепенного механизма на базе кинетического параметра.
3. Метрический коэффициент: понятие способа вычисления, геометрическая интерпретация.

ЛИТЕРАТУРА

20. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с.196-211).
21. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5).

1. Динамическая модель с лонгальным параметром

Многие автоматизированные технологические операции требуют контурного управления движением многосвязной мехатронной машины по заданной траектории. К ним относятся: дуговая сварка, лазерная и водоструйная резка, зачистка заусенцев на сложных профилях. При синтезе движений мехатронных машин на операциях этого класса необходимо учитывать динамические факторы, которые обусловлены силовым взаимодействием рабочего органа с объектом работ, а также взаимовлиянием степеней подвижности. Эффективность решения задачи контурного управления во многом определяется выбранной формой математической модели многостепенной машины как управляемого объекта.

Одним из наиболее распространенных формализмов для задач управления движением многомерных систем является модель динамики на основе уравнений Лагранжа второго рода. Для n-степенного механизма математическая модель в лагранжевой форме имеет вид

$$I(\vec{q}) \frac{d^2 \vec{q}}{dt^2} + h\left(\vec{q}, \frac{d\vec{q}}{dt}\right) = \vec{Q}, \quad (5.29)$$

где n – число степеней подвижности механизма; $\bar{q}, \frac{d\bar{q}}{dt}, \frac{d^2\bar{q}}{dt^2}$ – векторы $(n \times 1)$ соответственно обобщенных координат, скоростей и ускорений; $I(\bar{q})$ – матрица инерции механизма, зависящая от его конфигурации; $h\left(\bar{q}, \frac{d\bar{q}}{dt}\right)^s$ – вектор $(n \times 1)$ центробежных и кориолисовых сил; $\bar{Q}$ – вектор $(n \times 1)$ обобщенных сил, приложенных к звеньям механизма.

В частности, для манипулятора с полярной системой координат (см. рис. 5.4) уравнение динамики (5.29) имеет вид

$$\begin{cases} a_{11} \frac{d^2 q_1}{dt^2} + a_{12} \left(\frac{dq_2}{dt} \right)^2 = Q_1; \\ a_{21} \frac{d^2 q_2}{dt^2} + a_{22} \left(\frac{dq_1}{dt} \right) \left(\frac{dq_2}{dt} \right) = Q_2, \end{cases} \quad (5.30)$$

где коэффициенты уравнения задаются выражениями:

$$\begin{aligned} a_{11} &= m_1; & a_{12} &= -m_1 q_1 + \frac{1}{2} m_a R; \\ a_{22} &= m_2; & a_{21} &= 2m_1 q_1 - m_a R. \end{aligned}$$

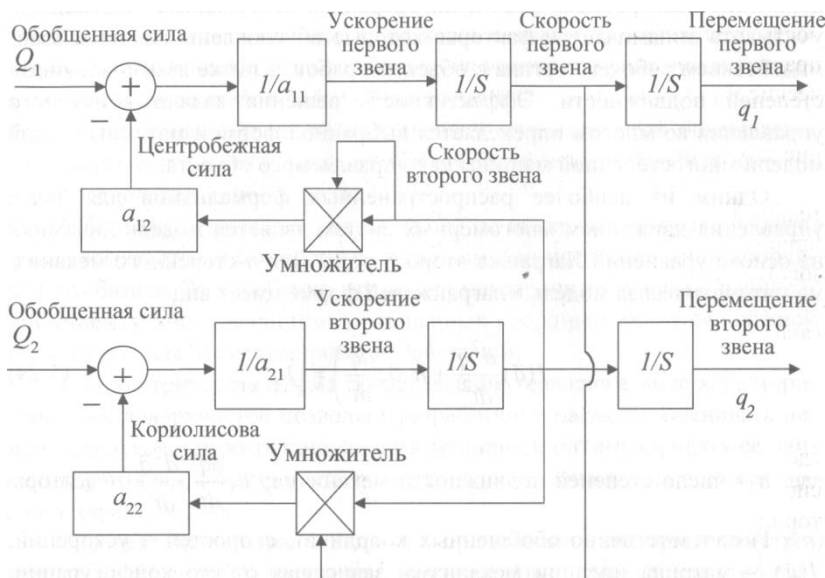


Рис. 5.7. Блок-схема динамической модели двухзвенного манипулятора

Первые слагаемые в уравнениях (5.30) представляют собой силы инерции, пропорциональные приведенным массам m_1 и m_2 соответствующих звеньев, кото-

рые определяются формулами (5.24). Блок-схема моделирования движений манипулятора с полярной системой координат приведена на рис. 5.7. Между степенями подвижности робота существует динамическое взаимовлияние, проявляющееся через действие центробежной силы на первое звено и кориолисовой - на второе звено робота, которые зависят от обобщенных координат и скоростей движения.

Математическая модель в форме (5.29) удобна для синтеза регуляторов исполнительных приводов, так как устанавливает непосредственную связь между векторами обобщенных сил и ускорений. Однако для задач контурного управления она не вполне адекватна по следующим причинам:

- 1) при программировании движений мехатронных машин закон движения удобно задавать не в обобщенной, а в декартовой системе координат;
- 2) система лагранжевых уравнений описывает машину как совокупность отдельных (хотя и взаимосвязанных) подсистем, в то время как в практических приложениях наибольший интерес представляют динамические характеристики машины как единого объекта;
- 3) высокая размерность систем уравнений затрудняет ее использование для вычислений в реальном времени;
- 4) реализация алгоритмов динамического управления на исполнительном уровне зачастую технически невозможна, так как регуляторы приводов настраиваются фирмой-изготовителем и недоступны для пользователей.

Для построения параметрической модели траекторию рабочего органа следует задать как функцию скалярного параметра (рис. 5.8):

$$\bar{X}(\lambda) = [x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda), \alpha_x(\lambda), \alpha_y(\lambda), \alpha_z(\lambda)], \quad (5.31)$$

где X - вектор положения и ориентации рабочего органа в декартовой системе координат; λ - путь, пройденный рабочим органом вдоль траектории ($0 \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$).

Три компоненты вектора X составляют декартовы координаты характеристической точки рабочего органа, а три остальные задают эйлеровы углы, описывающие его ориентацию как твердого тела в декартовом пространстве. Скаляр λ в дифференциальной геометрии называется лон-гальным параметром.

Например, для полярного манипулятора, рабочий орган которого перемещается по прямолинейной траектории (рис. 5.9), параметрические функции (5.31) имеют следующий вид:

$$\begin{cases} x(\lambda) = x_0 + \lambda \cos \beta, \\ y(\lambda) = y_0 + \lambda \sin \beta, \end{cases} \quad (5.32)$$

где x_0, y_0 – координаты начальной точки траектории (при $\lambda = 0$); β – угол наклона траектории к оси X .

Параметрическую траекторию вида (5.31), решив обратную задачу о положении, можно описать в обобщенной системе координат. В общем случае для n -степенного механизма получаем вектор-столбец параметрических функций

$$\vec{q}(\lambda) = \text{col}[q_1(\lambda), q_2(\lambda), \dots, q_n(\lambda)], \quad (5.33)$$

где q_i – обобщенные координаты механизма ($i = 1, \dots, n$).

Так, в рассматриваемом примере (см. рис. 5.9) для траектории вида (5.32) имеем следующие зависимости для обобщенных координат:

$$\begin{cases} q_1(\lambda) = \sqrt{x^2(\lambda) + y^2(\lambda)} = \sqrt{(x_0^2 + y_0^2) + 2(x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta)\lambda + \lambda^2}, \\ q_2(\lambda) = \arctg \left[\frac{y(\lambda)}{x(\lambda)} \right] = \arctg \left[\frac{y_0 + \lambda \sin \beta}{x_0 + \lambda \cos \beta} \right]. \end{cases} \quad (5.34)$$

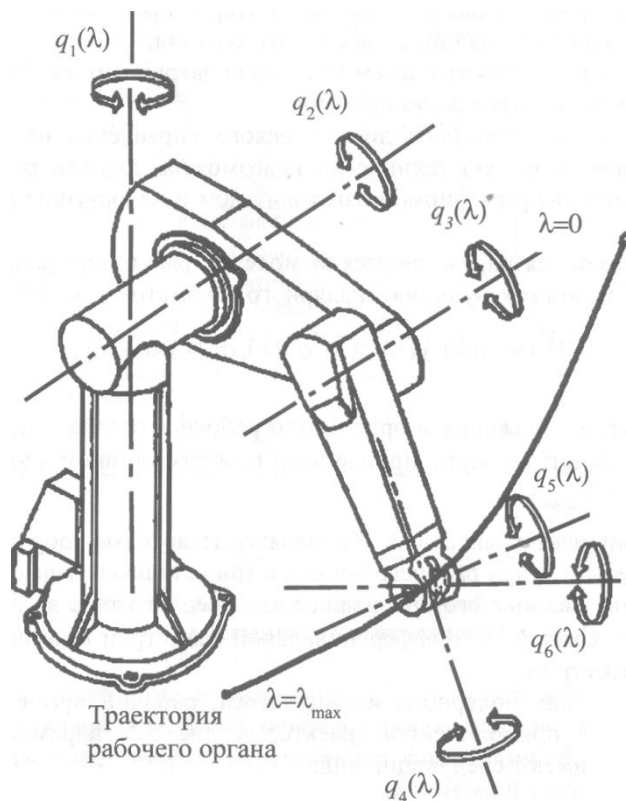


Рис. 5.8. Параметрическое представление траектории рабочего органа робота

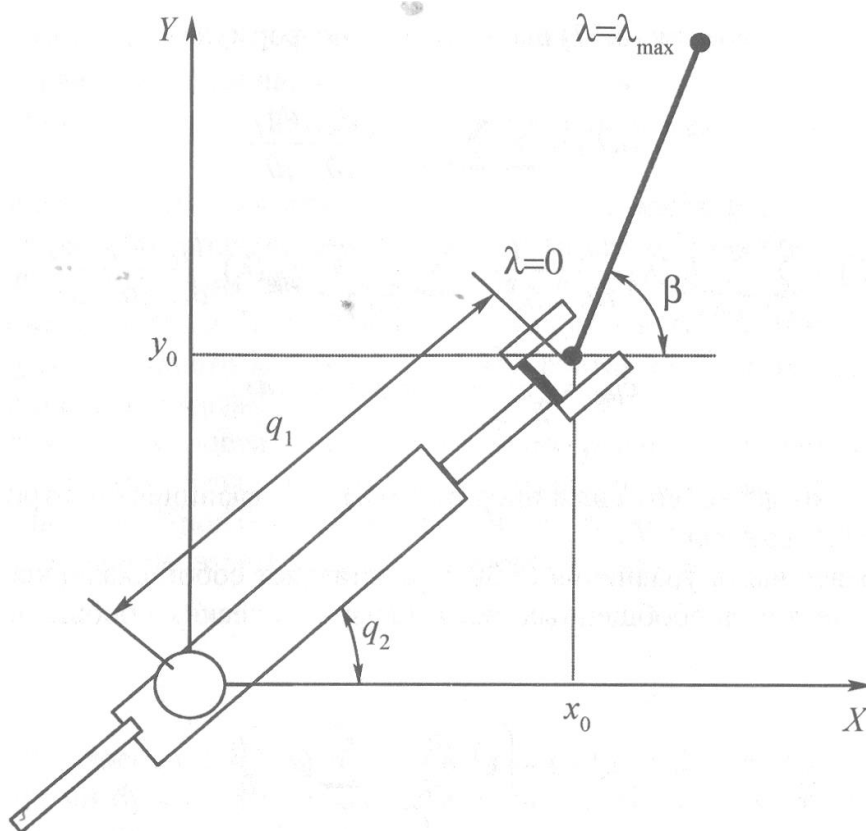


Рис. 5.9. Прямолинейная траектория движения рабочего органа для двухзвенного манипулятора

Если функции (5.33) являются дважды дифференцируемыми по параметру λ , то получаем параметрические векторные функции для обобщенных скоростей и ускорений многозвенного механизма:

$$\frac{dq_i}{dt} = \frac{dq_i}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dt} = \frac{dq_i}{d\lambda} \dot{\lambda}; \quad (5.35)$$

$$\frac{d^2 q_i}{dt^2} = \frac{d^2 q_i}{d\lambda^2} (\dot{\lambda})^2 + \frac{dq_i}{d\lambda} \ddot{\lambda}. \quad (5.36)$$

В общем случае параметрическая модель динамики многозвенного механизма на основе лонгального параметра имеет вид нелинейного дифференциального уравнения второго порядка:

$$a(\lambda) \ddot{\lambda} + b(\lambda) \dot{\lambda} = Q(\lambda). \quad (5.37)$$

Члены уравнения (5.37) вычисляются по формулам:

$$a(\lambda) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij}(\lambda) \frac{dq_i}{d\lambda} \frac{dq_j}{d\lambda};$$

$$b(\lambda) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij}(\lambda) \frac{dq_i}{d\lambda} \frac{d^2 q_j}{d\lambda^2} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n c_{ijk}(\lambda) \frac{dq_i}{d\lambda} \frac{dq_j}{d\lambda} \frac{dq_k}{d\lambda}, \quad (5.38)$$

$$c_{ijk} = \frac{1}{2} \frac{\partial I_{ij}}{\partial q_k} \quad (i, j, k = 1, \dots, n),$$

где $a(\lambda)$ – коэффициент силы инерции; $b(\lambda)$ – коэффициент центробежной и кориолисовой сил.

Правая часть уравнения (5.38) представляет собой скалярное произведение векторов обобщенных сил и параметрических обобщенных скоростей:

$$Q(\lambda) = \left(\vec{Q} \cdot \frac{d\vec{q}}{d\lambda} \right) = \sum_{i=1}^n Q_i \frac{dq_i}{d\lambda}. \quad (5.39)$$

Таким образом, динамический анализ n -степенного механизма сводится к решению одного дифференциального уравнения вида (5.37), в чем и состоит основное преимущество параметрических моделей. Использование в математических моделях лонгального параметра, который кажется наиболее естественным при программировании контурных движений, требует вычисления коэффициентов инерциальной, центробежной и кориолисовой сил вида (5.38). В системах управления реального времени, алгоритмы работы которых строятся на базе динамических моделей, организация таких процедур представляет серьезную вычислительную проблему.

2/Динамическая модель многостепенного механизма на базе кинетического параметра

Форма и соответственно сложность коэффициентов уравнения динамики вида (5.37) определяется выбранным параметром. В качестве параметра можно принять любую знакопостоянную функцию переменных состояния системы, которая:

- имеет положительную производную по времени;
- является стационарной функцией;
- инвариантна к системе координат, используемой для ее вычисления.

Таким образом, лонгальный параметр λ удовлетворяет перечисленным требованиям, однако не является единственно возможным. Так, акад. Г.С. Поспеловым для задач управления летательными аппаратами разработаны системы "с регулируемым ходом часов". В этих системах используется параметр $\lambda = H / v$, где H, v соответственно высота и скорость подъема аппарата.

Радикально упростить параметрическое уравнение динамики многозвенной системы позволяет введение параметра, предложенного проф. Дж.Л. Синджем. Производная по времени этого параметра (s) определяется полной кинетической энергией движущейся системы

$$\frac{ds}{dt} = \sqrt{2T} . \quad (5.40)$$

Методология построения динамических моделей с данным параметром, который будем называть кинетическим, базируется на геометрической идее риманова пространства в приложении к задачам динамики.

В первую очередь следует подчеркнуть принципиальное методологическое отличие описания движения в тензорно-геометрическом методе от подходов, основанных на лагранжевом формализме. В предисловии к трактату "Аналитическая механика" (1788) Ж.-Л. Лагранж писал: "В этой работе совершенно отсутствуют какие бы то ни было чертежи. Излагаемые мною методы не требуют ни построений, ни геометрических или механических рассуждений; они требуют только алгебраических операций, подчиненных планомерному и однообразному ходу. Все любящие анализ с удовольствием убедятся в том, что механика становится новой областью анализа..."

Геометрический подход к динамике стоит на противоположных позициях, которые сформулированы Дж.Л. Синджем: "Мы воскрешаем геометрический дух, столь тщательно изгнанный из работ Лагранжа и Гамильтона, и наглядно представляем себе движение системы, причем как движение единственной точки риманова n -мерного пространства".

Обзор первых работ в этой области дан в основополагающей книге проф. Дж.Л. Синджа [59], более детально подход изложен в книгах по аналитической механике (например, [33]). В статье [113] математическая модель на основе данного параметра была использована для выбора квазиоптимальных траекторий и оценки времени перемещения манипулятора по заданному контуру.

Рассмотрим структуру указанного риманова пространства. Его элементами являются множество кинематически и динамически допустимых состояний мехатронной машины. Метрика пространства определяется из условия равенства мгновенных значений кинетической энергии изображающей точки и кинетической энергии многозвенного механизма в каждой точке пространства.

Удвоенная кинетическая энергия исполнительного механизма при условии голономных и стационарных связей определяется как положительно определенная квадратичная форма обобщенных скоростей:

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 = 2T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij} \frac{dq_i}{dt} \frac{dq_j}{dt}. \quad (5.41)$$

Выражение (5.41) совпадает с определением введенного динамического инварианта (5.26). Следовательно, квадрат метрики риманова пространства и динамический инвариант связаны соотношением

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 = I_d. \quad (5.42)$$

Движению многостепенной машины в обобщенных координатах ставится в динамическое соответствие движение условной изображающей точки (рис. 5.10). Это тело единичной массы, перемещающееся в римановом пространстве. Кинетическая энергия изображающей точки определяется формулой

$$T_p = \frac{1}{2} \left(\frac{d\vec{r}_p}{dt} \cdot \frac{d\vec{r}_p}{dt} \right). \quad (5.43)$$

где $\vec{r}_i$ – векторы координатного базиса риманова пространства R^n .

Вектор скорости изображающей точки задается как сумма векторов

$$\frac{d\vec{r}_p}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \frac{dq_i}{dt}, \quad (5.44)$$

где $\vec{r}_i$ – векторы координатного базиса риманова пространства R^n .

Система базисных векторов строится на основе равенства выражений (5.41) и (5.43) в локальных точках пространства. Откуда определяются модули и взаимная ориентация векторов базиса:

$$\begin{cases} |\vec{r}_i| = \sqrt{I_{ii}}; \\ \cos(\vec{r}_i, \vec{r}_j) = \frac{I_{ij}}{\sqrt{I_{ii} I_{jj}}}, \end{cases} \quad (5.45)$$

где I_{ij} – элементы тензора инерции $I (n \times n)$ многозвенного механизма.

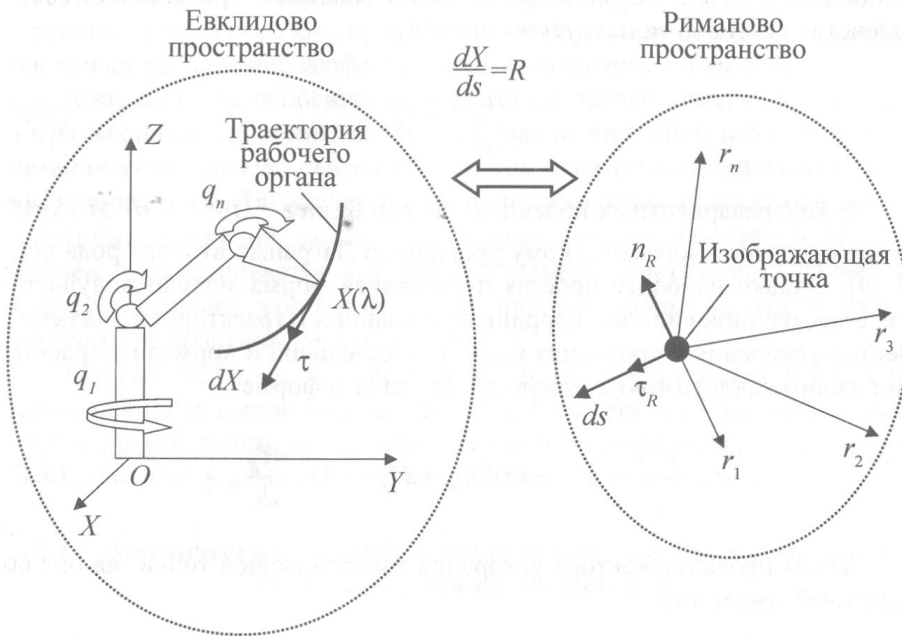


Рис. 5.10. Эквивалентность евклидова и риманова пространства при представлении движений многозвенных механизмов

Таким образом, в общем случае базисные векторы являются неединичными и неортогональными, так как элементы матрицы инерции зависят от конфигурации механизма. Поэтому модули и ориентация векторов базиса изменяются в процессе перемещения машины, что определяет риманов (нелинейный) характер метрики (5.40).

Уравнение динамики, описывающее движение изображающей точки единичной массы в форме второго закона Ньютона, представляет собой равенство векторов силы и ускорения [45]:

$$\frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} = \vec{Q}. \quad (5.46)$$

В контравариантных проекциях на оси базиса $r_i (i = 1, \dots, n)$ это уравнение сводится к классическому уравнению Лагранжа второго рода вида (5.29). Однако

наиболее простая и наглядная форма модели получается для естественной системы координат, связанной с траекторией движения. Вектор ускорения в проекциях на орты касательной и нормали к траектории изображающей точки можно представить в форме

$$\frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} = \ddot{s} \vec{\tau}_R + (\dot{s})^2 \vec{n}_R = \ddot{s} \vec{\tau}_R + (\dot{s})^2 \frac{d\vec{\tau}_R}{ds}. \quad (5.47)$$

Тогда проекция вектора ускорения изображающей точки на орт касательной имеет вид

$$\ddot{s} = \left(\vec{Q} \cdot \frac{d\vec{q}}{ds} \right) = \sum_{i=1}^n \left(Q_i \frac{dq_i}{ds} \right). \quad (5.48)$$

Рассмотрим особенности и преимущества динамической модели с кинетическим параметром. Для этого сопоставим параметрические уравнения динамики (5.48) и (5.37). Структура уравнения (5.48) существенно проще: оно не содержит кориолисовой силы (коэффициент $b = 0$), а коэффициент силы инерции является единичным. Последнее утверждение следует из общей формулы (5.38) для коэффициента $a(\lambda)$ при подстановке в нее выражения (5.41) для римановой метрики:

$$a(s) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij} \frac{dq_i}{ds} \frac{dq_j}{ds} \equiv 1. \quad (5.49)$$

Коэффициент $b(\lambda)$, как следует из зависимостей (5.38), для произвольного параметра λ определяет скорость изменения коэффициента $a(\lambda)$ вдоль траектории. Следовательно, при постоянном значении коэффициента $a(s) = 1$ коэффициент $b = 0$, т.е. вектор кориолисовой силы ортогонален вектору скорости изображающей точки в римановом пространстве. Таким образом, применение кинетического параметра вообще исключает вычисление коэффициентов в уравнении динамики.

Методическая особенность подхода на основе кинетического параметра заключается в том, что исследование движения многостепенной механической системы сводится к анализу динамики материальной точки единичной массы. Такой подход особенно эффективен при планировании контурных движений, когда многомерная машина, состоящая из цепи звеньев, рассматривается как единый объект управления. Полученное дифференциальное уравнение имеет простую форму и классическую структуру математического решения.

Однако проблема заключается в том, что изображающая точка условна, она не является физической точкой мехатронной машины. Поэтому для практического применения данного подхода необходимо установить связь между римановым и евклидовым пространствами.

3. Метрический коэффициент: понятие, способы вычисления, геометрическая интерпретация

При рассмотрении контурных движений метрика dX евклидового пространства представляет собой расстояние между двумя бесконечно близкими точками траектории рабочего органа (см. рис. 5.10). Квадрат данной метрики определяется в векторно-матричной форме следующим образом:

$$\{dx\}^2 = dq^T M dq, \quad (5.50)$$

где $dq = \text{col}(dq_1, dq_2, \dots, dq_n)$ - вектор приращений обобщенных координат механизма; $M = J^T J$ - матрица манипулятивности (5.3).

Формула для метрики риманова пространства R^n следует из выражения кинетического параметра (5.41):

$$(ds)^2 = 2T = d\vec{q}^T I d\vec{q}. \quad (5.51)$$

Коэффициенты квадратичных форм (5.50) и (5.51) являются переменными величинами, так как элементы матриц манипулятивности M и инерции I зависят от значений обобщенных координат.

Введем понятие метрического коэффициента как отношение метрик евклидового и риманова пространств:

$$R = \frac{dX}{ds}. \quad (5.52)$$

Рассмотрим способы расчета метрического коэффициента. С точки зрения тензорного анализа этот коэффициент представляет собой отношение кинематического и динамического инвариантов. Действительно, это следует из формул (5.2) и (5.42):

$$R = \frac{dX/dt}{ds/dt} = \sqrt{\frac{I_k}{I_d}}. \quad (5.53)$$

Для вычисления метрического коэффициента в обобщенных координатах подставим выражения для указанных инвариантов (5.5) и (5.41) в формулу (5.53):

$$R = \frac{d\vec{q}^T M d\vec{q}}{d\vec{q}^T I d\vec{q}}. \quad (5.54)$$

Таким образом, основываясь на теории матриц [8, 69], данные метрики представляют собой отношения Рэля и могут быть вычислены как отношения двух квадратичных форм, представленных в виде скалярных произведений.

Перейдем к расчету в декартовой системе координат. Выражение для кинематического инварианта в базовых декартовых координатах имеет вид

$$I_k = v^2, \quad (5.55)$$

где v – модуль вектора скорости рабочего органа в данной точке траектории.

Динамический инвариант в декартовых координатах вычисляется следующим образом:

$$I_d = d\vec{q}^T I d\vec{q} = (J^{-1} \vec{v})^T I (J^{-1} \vec{v}) = \vec{v}^T (J^{-T} I J^{-1}) \vec{v}, \quad (5.56)$$

где $J^{-T} = (J^{-1})^T$ – транспонированная обратная матрица Якоби.

Вектор скорости рабочего органа направлен по касательной к траектории (см. рис. 5.10) и может быть представлен таким образом:

$$\vec{v} = v \vec{\tau}, \quad (5.57)$$

где $\vec{\tau}$ – орт касательной к траектории рабочего органа.

Подставим выражение (5.57) в уравнение (5.56) для динамического инварианта:

$$I_d = v^2 \left[\vec{\tau}^T (J^{-T} I J^{-1}) \vec{\tau} \right]. \quad (5.58)$$

Подставляя зависимости (5.55) и (5.58) в (5.53), получаем следующее выражение для вычисления метрического коэффициента в декартовых координатах:

$$R = \frac{1}{\sqrt{\vec{\tau}^T H \vec{\tau}}}, \quad (5.59)$$

где $H = J^{-T} I J^{-1}$ – обобщенный тензор инерции многостепенного механизма.

Определение метрического коэффициента по формуле (5.59) допускает геометрическую интерпретацию при помощи характеристической поверхности. Обобщенному тензору инерции H можно поставить в соответствие эллипсоид, центр симметрии которого расположен в текущей точке траектории рабочего органа (рис. 5.11). Уравнение этого эллипсоида имеет вид

$$\vec{U}^T H \vec{U} = 1, \quad (5.60)$$

где $\vec{U}$ – вектор, соединяющий центр эллипсоида с точками его поверхности.

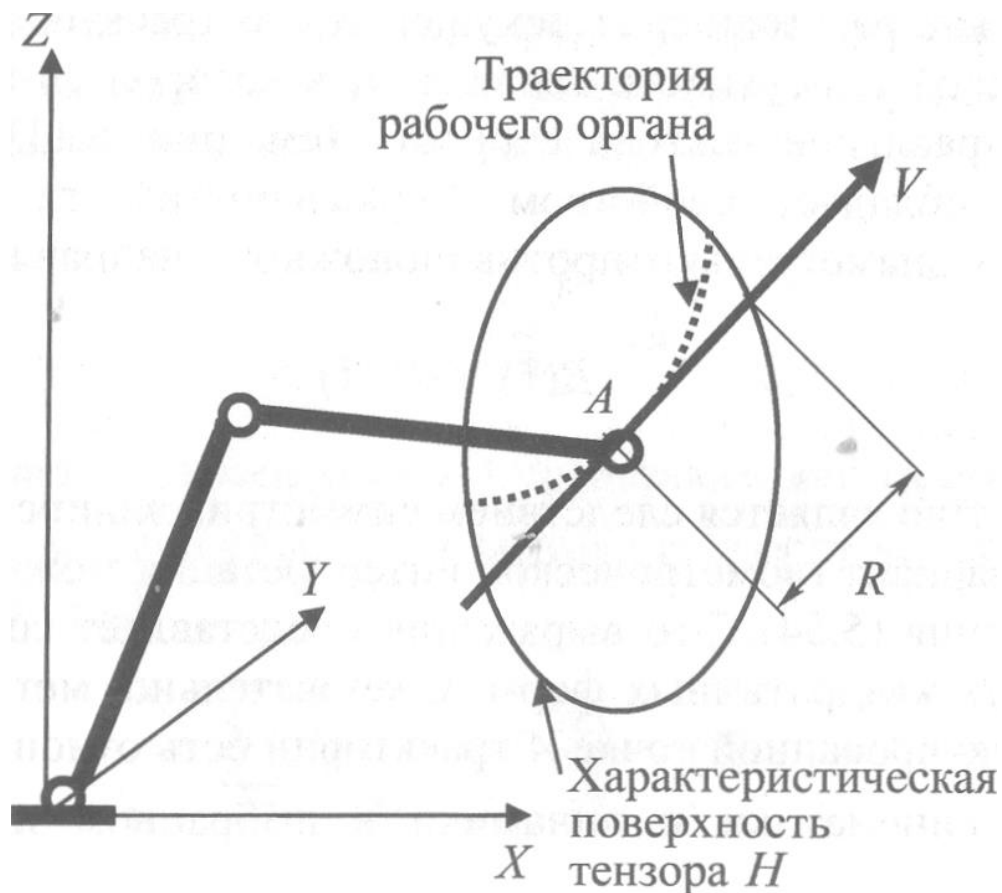


Рис. 5.11. Характеристический эллипсоид обобщенного тензора инерции механизма

Как следует из формул (5.8), квадраты длин полуосей эллипсоида обратно пропорциональны собственным числам соответствующей матрицы. Тогда, учитывая выражение (5.59), метрический коэффициент R можно найти как расстояние от текущей точки траектории до точки характеристической поверхности тензора H , в которой ее пересекает луч, имеющий направление вектора скорости (см. рис. 5.11). Метрический коэффициент обладает свойством "зеркальности", т.е. его значения для прямого и диаметрально противоположного направлений движения равны:

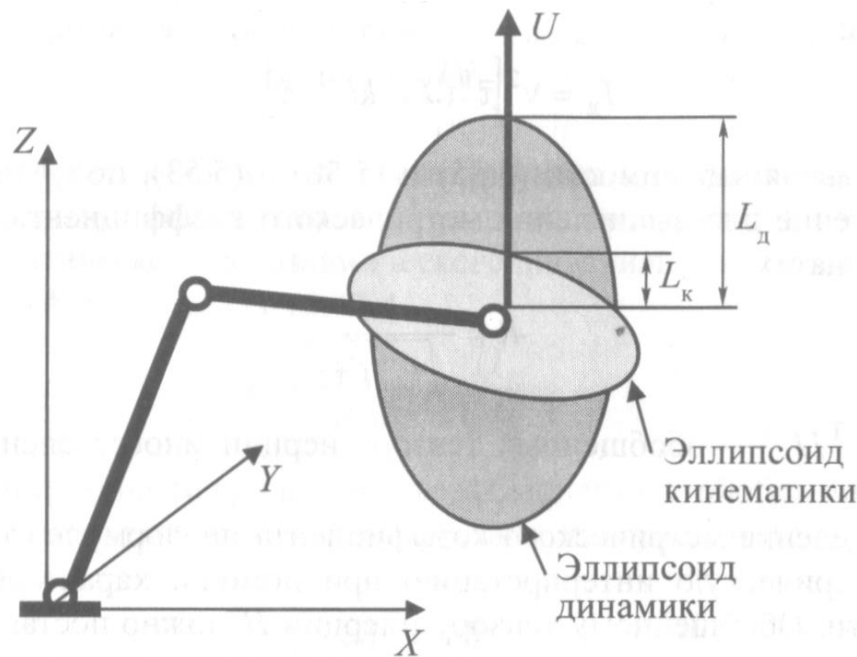


Рис. 5.12. Геометрическая интерпретация метрического коэффициента

$$R(\vec{\tau}) = R(-\vec{\tau}) . \quad (5.61)$$

Это свойство является следствием симметрии эллипсоида инерции.

Другой вариант геометрической интерпретации можно дать на основании выражения (5.54). Это выражение представляет собой отношение Рэля для двух квадратичных форм. Следовательно, метрический коэффициент в фиксированной точке **A** траектории есть отношение длин осей эллипсоидов кинематики и динамики в выбранном направлении **U** (рис. 5.12):

$$R_A(\vec{U}) = \frac{L_k}{L_d} . \quad (5.62)$$

Выделим основные свойства метрического коэффициента.

1. Коэффициент является инвариантом, так как его величина не зависит от выбранной для расчета системы координат.
2. Значения **R** не зависят от модуля вектора **U**, поэтому удобно использовать векторы с единичной нормой.
3. Диапазон изменения коэффициента ограничен предельными собственными числами рассматриваемых квадратичных форм:

$$\mu_{\min} \leq R_A \leq \mu_{\max} . \quad (5.63)$$

4. Задача ортогональности главных осей характеристических эллипсоидов (см. рис. 5.3, 5.6) сводится к определению экстремумов метрического коэффициента, собственных чисел и собственных векторов соответствующих матриц.

Лекция

Тема 1.3.12. Математическое моделирование и оптимизация движений мехатронных систем (Синтез оптимальных движений многозвенных систем)

ВОПРОСЫ

1. Оптимизация контурных движений многозвенных механических систем по критерию быстродействия.
2. Оптимизация контурных движений многозвенных механических систем по энергетическому критерию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с.211-216).
2. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5).

Введение

Для синтеза оптимальных законов движения построим динамическую модель многозвенного механизма в параметрической форме на основе введенных кинетического параметра и метрического коэффициента.

Воспользуемся энергетической формой уравнения динамики механических систем, согласно которой скорость изменения кинетической энергии равна мощности приложенных сил [45]:

$$\frac{dT}{dt} = \sum_{j=1}^n F_j \frac{dx_j}{dt} . \quad (5.64)$$

Правую часть уравнения (5.64) представим как скалярное произведение главного вектора силы $\vec{F}$ и вектора скорости концевой точки механической системы:

$$\sum_{j=1}^n F_j \frac{dx_j}{dt} = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{X}}{dt} = F_{\tau} \dot{\lambda} ,$$

где F_{τ} – проекция главного вектора силы на касательную к траектории рабочего органа; $\dot{\lambda}$ – контурная скорость концевой точки.

Левую часть уравнения (5.64), используя определение кинетического параметра (5.40), можно представить в следующей форме:

$$\frac{dT}{dt} = \dot{s} \ddot{s}. \quad (5.65)$$

Тогда, основываясь на определении метрического коэффициента (5.52), уравнение динамики многосвязного механизма (5.64) приводится к виду

$$R^{-1} \ddot{s} = F_{\tau}. \quad (5.66)$$

Дифференциальное уравнение (5.66) является аналогом второго закона Ньютона, которое описывает контурное движение изображающей точки. При этом эквивалентная масса этой точки, как следует из (5.66), обратно пропорциональна метрическому коэффициенту. Значение коэффициента R зависит от конфигурации механической системы и направления ее движения в пространстве.

1. Оптимизация контурных движений многосвязных механических систем по критерию быстродействия

Для построения оптимальных по критерию быстродействия законов контурного движения воспользуемся полученным уравнением динамики многосвязной механической системы в форме (5.66).

Результирующий вектор силы, действующий на рабочий орган, является векторной суммой

$$\vec{F} = \vec{F}_M + \vec{F}_E,$$

где $\vec{F}_M$ – приведенная к концевой точке сила, развиваемая исполнительными приводами; $\vec{F}_E$ – вектор внешних сил.

Тогда проекция вектора силы на касательную к траектории рабочего органа является скалярной суммой двух соответствующих компонент (рис. 5.13):

$$F_{\tau} = (\vec{F}_M \vec{\tau}) + (\vec{F}_E \vec{\tau}) = F_{M\tau} + F_{E\tau}.$$

Определим контурное ускорение как производную контурной скорости рабочего органа по времени:

$$\ddot{\lambda} = \frac{dR}{dt} \dot{s} + R \ddot{s} = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\lambda} (\dot{\lambda})^2 + R \ddot{s}. \quad (5.67)$$

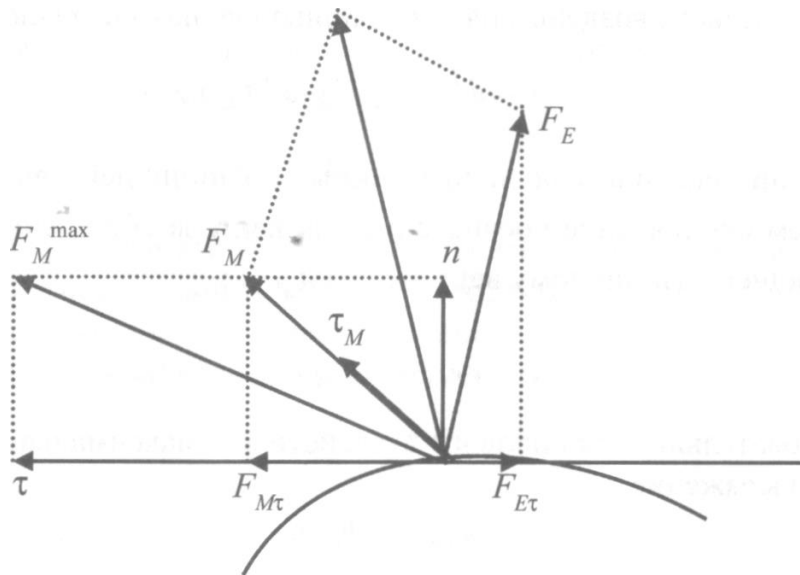


Рис. 5.13. Схема сил, действующих на рабочий орган

Предположим, что производная метрического коэффициента существует во всех точках траектории. Тогда максимальное значение контурного ускорения в заданной точке траектории можно найти по следующей формуле:

$$\ddot{\lambda}_{\max} = \left[\frac{1}{R} \frac{dR}{d\lambda} \right] (\dot{\lambda})^2 + R \ddot{s}_{\max}. \quad (5.68)$$

Метрический коэффициент может быть рассчитан заранее для всех программных траекторий и конфигураций механической системы. Для расчетов по формуле (5.68) необходимо знать максимальное параметрическое ускорение $\ddot{s}_{\max}$.

Для определения этой величины обратимся к уравнению динамики (5.66). Воспользуемся известным соотношением

$$\vec{f} = J^T \vec{F} = J^T (\vec{F}_M + \vec{F}_E), \quad (5.69)$$

где $\vec{f}$ – вектор обобщенных сил, приложенных в степенях подвижности механизма; J^T – транспонированная матрица Якоби.

Начнем рассмотрение со случая, когда внешние силовые воздействия отсутствуют ($\vec{F}_E = 0$). В этом случае вектор обобщенных сил для заданного силового воздействия блока приводов находится по формуле

$$\vec{f} = J^T \vec{F}_M = F_M (J^T \vec{\tau}_M), \quad (5.70)$$

где $\vec{\tau}_M$ – единичный вектор, направленный по линии действия силы $\vec{F}_M$.

Введем специальное обозначение для вектора обобщенных сил, соответствующего единичному вектору силы $\vec{F}_M$:

$$\vec{e}_F = J^T \vec{\tau}_M .$$

Следовательно, для силового воздействия с максимальным модулем получаем выражение

$$\vec{f} = F_M^{\max} \vec{e}_F .$$

Величины обобщенных сил, развиваемых исполнительными приводами, ограничены предельными значениями:

$$f_j^{\min} \leq f_j \leq f_j^{\max} \quad (j = 1, \dots, n). \quad (5.71)$$

Если предположить, что проекции вектора $\vec{e}_F$ положительны, то получим следующую систему ограничений для максимальной силы:

$$LB_j \leq F_M^{\max} \leq UB_j \quad (j = 1, \dots, n). \quad (5.72)$$

Из системы ограничений (6.72) выбираем граничные значения:

$$F_M^{\max} = \min(UB_j) = \min(f_j^{\max} e_{Fj}^{-1});$$

$$F_M^{\min} = \max(LB_j) = \max(f_j^{\min} e_{Fj}^{-1}).$$

Полученные выражения позволяют найти граничные величины для касательных проекций вектора сил $\vec{F}_M$:

$$F_{M\tau}^{\max} = F_M^{\max} (\vec{\tau} \cdot \vec{\tau}_M); \quad F_{M\tau}^{\min} = F_M^{\min} (\vec{\tau} \cdot \vec{\tau}_M). \quad (5.73)$$

Таким образом, для расчета необходимо знать направление действия силы относительно заданной траектории, т.е. взаимную ориентацию векторов $\vec{\tau}$ и $\vec{\tau}_M$.

Искомые предельные значения параметрического ускорения для участков разгона и торможения будут иметь вид

$$\ddot{s}_{acc} = F_{M\tau}^{\max} R; \quad \ddot{s}_{dec} = F_{M\tau}^{\min} R. \quad (5.74)$$

Если в процессе выполнения технологической операции мехатронная машина имеет силовой контакт с объектом работ, то при синтезе движений необходимо учитывать внешние силовые воздействия. Эти воздействия на исполнительные приводы можно определить по формуле

$$\vec{f}_E = J^T \vec{F}_E, \quad (5.75)$$

где $\vec{f}_E = (f_{1E}, f_{2E}, \dots, f_{nE})$ – вектор-столбец $(n \times 1)$ обобщенных сил, обусловленных возмущающим силовым воздействием.

Представим неравенства (5.71) в следующем виде:

$$f_j^{\min} - f_{jE} \leq f_j \leq f_j^{\max} - f_{jE} \quad (j = 1, \dots, n). \quad (5.76)$$

Дальнейший расчет проводится по выражениям (5.72) – (5.74), но для ограничений вида (5.76).

Подставив найденное по (5.74) значение максимального ускорения в формулу (5.68), можно определить максимальное значение контурного ускорения механической системы в заданной точке траектории. Интегрируя полученную функцию параметрического ускорения, получаем профиль оптимальной скорости вдоль программной траектории.

2. Оптимизация контурных движений многозвенных механических систем по энергетическому критерию

Одной из наиболее распространенных задач оптимизации движения многозвенных механических систем является синтез по критерию минимума энергетических затрат. Динамические модели на основе кинетического параметра позволяют находить оптимальные движения этого класса наиболее простым и эффективным путем.

Обратимся к определению метрического коэффициента (5.53). Из него следует, что энергетически выгодными являются траектории с наибольшим значением R и положительной производной dR/dk . На таких траекториях при фиксированной

величине кинетической энергии рабочий орган достигает большей контурной скорости.

Рассмотрим оптимизацию движений многозвенной механической системы, выполняющей контурную силовую операцию. В качестве критерия оптимизации выберем величину интерактивной механической энергии, передаваемой от мехатронной машины к объекту работ. Для расчета представим уравнение динамики в энергетической форме:

$$\frac{dT}{dt} = N_M(t) - N_E(t), \quad (5.77)$$

где $N_M(t)$ – мгновенное значение мощности, развиваемой системой исполнительных приводов; $N_E(t)$ – мгновенная интерактивная мощность, обусловленная взаимодействием рабочего органа с объектом работ.

Если не учитывать рассеяние энергии вследствие сил трения, то при фиксированном уровне мощности приводов величина интерактивная мощность будет максимальной ($N_M = N_E$), если движение будет происходить при постоянстве кинетической энергии механической системы ($T = T_0 = \text{const}$). С точки зрения динамики изображающей точки это означает постоянство кинетического параметра в процессе движения:

$$\dot{s} = \dot{s}_0 = \text{const}. \quad (5.78)$$

Используя определение метрического коэффициента, получаем для принятого критерия оптимизации следующий закон контурного управления:

$$\dot{\lambda} = \dot{s}_0 R(\lambda). \quad (5.79)$$

Таким образом, оптимальный профиль контурной скорости рабочего органа определяется параметрической функцией изменения метрического коэффициента вдоль заданной траектории.

Лекция

Тема 1.3.12. Математическое моделирование и оптимизация движений мехатронных систем (Синтез оптимальных движений многозвенных систем)

ВОПРОСЫ

1. Оптимизация контурных движений многозвенных механических систем по критерию быстродействия.
2. Оптимизация контурных движений многозвенных механических систем по энергетическому критерию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с.211-216).
2. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5).

Введение

Для синтеза оптимальных законов движения построим динамическую модель многозвенного механизма в параметрической форме на основе введенных кинетического параметра и метрического коэффициента.

Воспользуемся энергетической формой уравнения динамики механических систем, согласно которой скорость изменения кинетической энергии равна мощности приложенных сил [45]:

$$\frac{dT}{dt} = \sum_{j=1}^n F_j \frac{dx_j}{dt} . \quad (5.64)$$

Правую часть уравнения (5.64) представим как скалярное произведение главного вектора силы $\vec{F}$ и вектора скорости концевой точки механической системы:

$$\sum_{j=1}^n F_j \frac{dx_j}{dt} = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{X}}{dt} = F_{\tau} \dot{\lambda} ,$$

где F_{τ} – проекция главного вектора силы на касательную к траектории рабочего органа; $\dot{\lambda}$ – контурная скорость концевой точки.

Левую часть уравнения (5.64), используя определение кинетического параметра (5.40), можно представить в следующей форме:

$$\frac{dT}{dt} = \dot{s} \ddot{s} . \quad (5.65)$$

Тогда, основываясь на определении метрического коэффициента (5.52), уравнение динамики многозвенного механизма (5.64) приводится к виду

$$R^{-1} \ddot{s} = F_{\tau} . \quad (5.66)$$

Дифференциальное уравнение (5.66) является аналогом второго закона Ньютона, которое описывает контурное движение изображающей точки. При этом эквивалентная масса этой точки, как следует из (5.66), обратно пропорциональна метрическому коэффициенту. Значение коэффициента R зависит от конфигурации механической системы и направления ее движения в пространстве.

1. Оптимизация контурных движений многозвенных механических систем по критерию быстродействия

Для построения оптимальных по критерию быстродействия законов контурного движения воспользуемся полученным уравнением динамики многозвенной механической системы в форме (5.66).

Результирующий вектор силы, действующий на рабочий орган, является векторной суммой

$$\vec{F} = \vec{F}_M + \vec{F}_E ,$$

где $\vec{F}_M$ – приведенная к концевой точке сила, развиваемая исполнительными приводами; $\vec{F}_E$ – вектор внешних сил.

Тогда проекция вектора силы на касательную к траектории рабочего органа является скалярной суммой двух соответствующих компонент (рис. 5.13):

$$F_{\tau} = (\vec{F}_M \vec{\tau}) + (\vec{F}_E \vec{\tau}) = F_{M\tau} + F_{E\tau} .$$

Определим контурное ускорение как производную контурной скорости рабочего органа по времени:

$$\ddot{\lambda} = \frac{dR}{dt} \dot{s} + R \ddot{s} = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\lambda} (\dot{\lambda})^2 + R \ddot{s} . \quad (5.67)$$

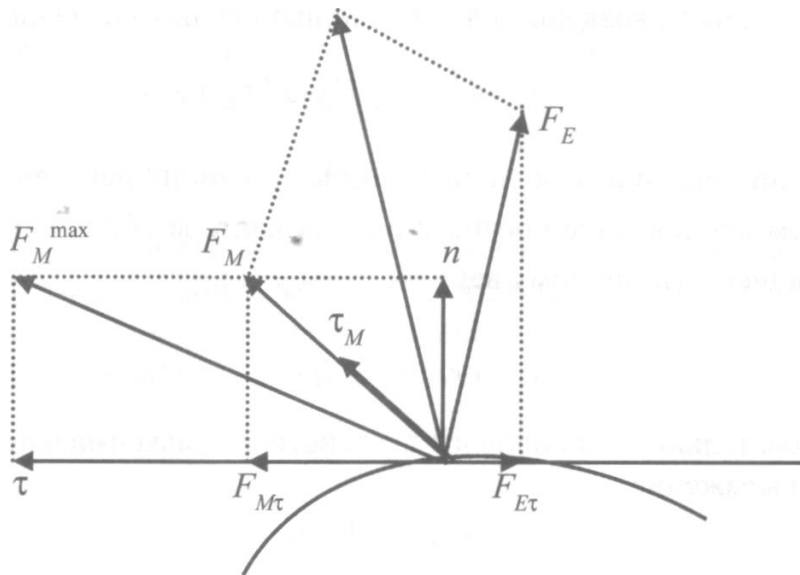


Рис. 5.13. Схема сил, действующих на рабочий орган

Предположим, что производная метрического коэффициента существует во всех точках траектории. Тогда максимальное значение контурного ускорения в заданной точке траектории можно найти по следующей формуле:

$$\ddot{\lambda}_{\max} = \left[\frac{1}{R} \frac{dR}{d\lambda} \right] (\dot{\lambda})^2 + R \ddot{s}_{\max}. \quad (5.68)$$

Метрический коэффициент может быть рассчитан заранее для всех программных траекторий и конфигураций механической системы. Для расчетов по формуле (5.68) необходимо знать максимальное параметрическое ускорение $\ddot{s}_{\max}$.

Для определения этой величины обратимся к уравнению динамики (5.66). Воспользуемся известным соотношением

$$\vec{f} = J^T \vec{F} = J^T (\vec{F}_M + \vec{F}_E), \quad (5.69)$$

где $\vec{f}$ – вектор обобщенных сил, приложенных в степенях подвижности механизма; J^T – транспонированная матрица Якоби.

Начнем рассмотрение со случая, когда внешние силовые воздействия отсутствуют ($\vec{F}_E = 0$). В этом случае вектор обобщенных сил для заданного силового воздействия блока приводов находится по формуле

$$\vec{f} = J^T \vec{F}_M = F_M (J^T \vec{\tau}_M), \quad (5.70)$$

где $\vec{\tau}_M$ – единичный вектор, направленный по линии действия силы $\vec{F}_M$.

Введем специальное обозначение для вектора обобщенных сил, соответствующего единичному вектору силы $\vec{F}_M$:

$$\vec{e}_F = J^T \vec{\tau}_M .$$

Следовательно, для силового воздействия с максимальным модулем получаем выражение

$$\vec{f} = F_M^{\max} \vec{e}_F .$$

Величины обобщенных сил, развиваемых исполнительными приводами, ограничены предельными значениями:

$$f_j^{\min} \leq f_j \leq f_j^{\max} \quad (j = 1, \dots, n). \quad (5.71)$$

Если предположить, что проекции вектора $\vec{e}_F$ положительны, то получим следующую систему ограничений для максимальной силы:

$$LB_j \leq F_M^{\max} \leq UB_j \quad (j = 1, \dots, n). \quad (5.72)$$

Из системы ограничений (6.72) выбираем граничные значения:

$$F_M^{\max} = \min(UB_j) = \min(f_j^{\max} e_{Fj}^{-1}) ;$$

$$F_M^{\min} = \max(LB_j) = \max(f_j^{\min} e_{Fj}^{-1}) .$$

Полученные выражения позволяют найти граничные величины для касательных проекций вектора сил $\vec{F}_M$:

$$F_{M\tau}^{\max} = F_M^{\max} (\vec{\tau} \cdot \vec{\tau}_M) ; \quad F_{M\tau}^{\min} = F_M^{\min} (\vec{\tau} \cdot \vec{\tau}_M) . \quad (5.73)$$

Таким образом, для расчета необходимо знать направление действия силы относительно заданной траектории, т.е. взаимную ориентацию векторов $\vec{\tau}$ и $\vec{\tau}_M$.

Искомые предельные значения параметрического ускорения для участков разгона и торможения будут иметь вид

$$\ddot{s}_{acc} = F_{M\tau}^{\max} R; \quad \ddot{s}_{dec} = F_{M\tau}^{\min} R. \quad (5.74)$$

Если в процессе выполнения технологической операции мехатронная машина имеет силовой контакт с объектом работ, то при синтезе движений необходимо учитывать внешние силовые воздействия. Эти воздействия на исполнительные приводы можно определить по формуле

$$\vec{f}_E = J^T \vec{F}_E, \quad (5.75)$$

где $\vec{f}_E = (f_{1E}, f_{2E}, \dots, f_{nE})$ – вектор-столбец $(n \times 1)$ обобщенных сил, обусловленных возмущающим силовым воздействием.

Представим неравенства (5.71) в следующем виде:

$$f_j^{\min} - f_{jE} \leq f_j \leq f_j^{\max} - f_{jE} \quad (j = 1, \dots, n). \quad (5.76)$$

Дальнейший расчет проводится по выражениям (5.72) – (5.74), но для ограничений вида (5.76).

Подставив найденное по (5.74) значение максимального ускорения в формулу (5.68), можно определить максимальное значение контурного ускорения механической системы в заданной точке траектории. Интегрируя полученную функцию параметрического ускорения, получаем профиль оптимальной скорости вдоль программной траектории.

2. Оптимизация контурных движений многозвенных механических систем по энергетическому критерию

Одной из наиболее распространенных задач оптимизации движения многозвенных механических систем является синтез по критерию минимума энергетических затрат. Динамические модели на основе кинетического параметра позволяют находить оптимальные движения этого класса наиболее простым и эффективным путем.

Обратимся к определению метрического коэффициента (5.53). Из него следует, что энергетически выгодными являются траектории с наибольшим значением R и положительной производной dR/dk . На таких траекториях при фиксированной

величине кинетической энергии рабочий орган достигает большей контурной скорости.

Рассмотрим оптимизацию движений многозвенной механической системы, выполняющей контурную силовую операцию. В качестве критерия оптимизации выберем величину интерактивной механической энергии, передаваемой от мехатронной машины к объекту работ. Для расчета представим уравнение динамики в энергетической форме:

$$\frac{dT}{dt} = N_M(t) - N_E(t), \quad (5.77)$$

где $N_M(t)$ – мгновенное значение мощности, развиваемой системой исполнительных приводов; $N_E(t)$ – мгновенная интерактивная мощность, обусловленная взаимодействием рабочего органа с объектом работ.

Если не учитывать рассеяние энергии вследствие сил трения, то при фиксированном уровне мощности приводов величина интерактивная мощность будет максимальной ($N_M = N_E$), если движение будет происходить при постоянстве кинетической энергии механической системы ($T = T_0 = \text{const}$). С точки зрения динамики изображающей точки это означает постоянство кинетического параметра в процессе движения:

$$\dot{s} = \dot{s}_0 = \text{const}. \quad (5.78)$$

Используя определение метрического коэффициента, получаем для принятого критерия оптимизации следующий закон контурного управления:

$$\dot{\lambda} = \dot{s}_0 R(\lambda). \quad (5.79)$$

Таким образом, оптимальный профиль контурной скорости рабочего органа определяется параметрической функцией изменения метрического коэффициента вдоль заданной траектории.

Лекция

Тема 1.3.13-14. Математическое моделирование и оптимизация движений мехатронных систем (Построение динамических моделей многостепенных роботов на основе метода нормализованных переменных)

ВОПРОСЫ

1. Нормализованные переменные и их физический смысл.
2. Уравнения динамики манипулятора в нормализованных переменных.
3. Пример построения математической модели избыточного манипулятора с учетом ограничения выходного сигнала силового преобразователя.

ЛИТЕРАТУРА

22. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с.216-230).
23. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5).

Введение

Традиционный, глубоко разработанный в теории робототехники подход предусматривает компоновку математической модели мехатронной системы как совокупности моделей ее отдельных частей (механической, электронной, управляющей, сенсорной и т.д.), объединенных в систему соответствующими связями. При этом связи между элементами модели в основном соответствуют аппаратным связям, технически реализованным в данной системе. При таком подходе полная размерность модели (следовательно, и вычислительная сложность компьютерного расчета) пропорциональна числу блоков и связей между ними.

С целью упрощения формы моделей исполнительных систем роботов, конструирования на их основе алгоритмов для управления в реальном времени, представляется логичным распространить синергетический принцип интеграции и на формирование математических моделей мехатронных модулей и систем. Один из возможных подходов к решению этой задачи рассматривается в данной лекции применительно к построению динамических моделей многостепенных манипуляционных роботов [53].

Манипуляционные роботы являются сложными мехатронными системами, включающими манипуляционный механизм, комплекс исполнительных приводов и компьютерное устройство управления. Оптимизация движений манипуляторов

предполагает количественное определение предельно достижимых показателей (например, максимальной силы и/или скорости рабочего органа, которые могут быть реализованы роботом в заданном направлении) при известных технических и технологических ограничениях.

С точки зрения подхода к решению задач этого класса можно выделить две основные группы методов анализа кинематических и динамических свойств манипуляторов.

1. Группа методов, в которых манипулятор рассматривается как сложный механизм без учета приводных ограничений на скорости или моменты. Основным инструментом исследования является тензорногеометрический метод. Фактически главным для всех методов исследования данной группы является то, что манипулятор рассматривается как передаточный механизм (трансмиссер), передающий скорости (ускорения, моменты) из сочленений на рабочий орган робота, воздействующий на окружающую среду.
2. Группа методов, в которых законы управления движением робота определяются с учетом ограничений (скоростных, моментных, энергетических) в исполнительных приводах. Основным инструментом анализа являются так называемые политопы - многогранники, ограничивающие области допустимых скоростей или сил в выбранной системе координат.

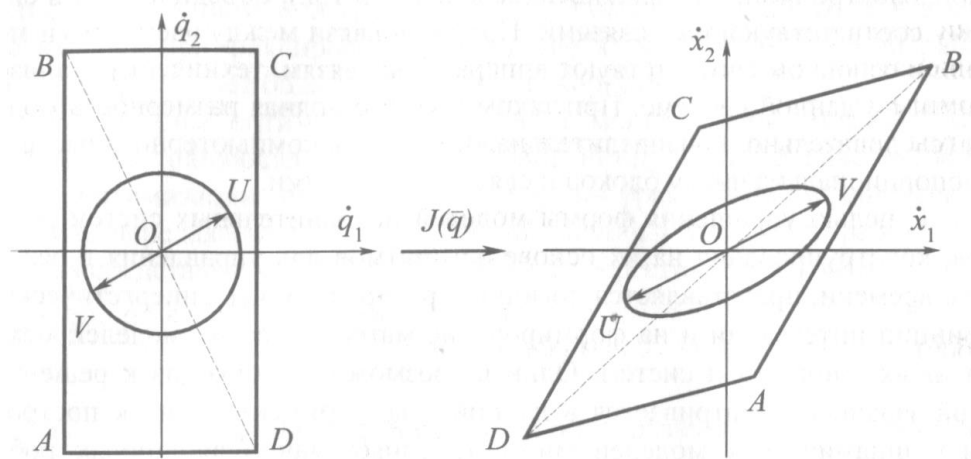


Рис. 5.14. Ограничения на скорости двухстепенного манипулятора в различных системах координат

Например, если рассматривать ограничения на скорости, развиваемые приводами двухстепенного манипулятора, то в фазовых координатах $\{dq_1/dt, dq_2/dt\}$ они будут изображаться некоторым прямоугольником $ABCD$. Отображая этот прямо-

угольник при помощи матрицы Якоби на декартовую координатную плоскость, получим соответствующий параллелограмм-политоп, представляющий собой область предельно допустимых скоростей концевой точки (рис. 5.14).

Учитывая методологические отличия указанных групп методов, их применение к решению прикладных дает различные результаты. Действительно, рассмотрим задачу нахождения направления, в котором концевая точка плоского двухзвеного манипулятора может развить максимальную линейную скорость при наличии ограничений скорости приводов.

На рис. 5.14 показаны виды политопы и эллипсоида кинематики на плоскостях обобщенных и декартовых скоростей соответственно. Направление OU является оптимальным согласно тензорно-геометрическому методу, в то время как OB - решение, даваемое политопным методом. Таким образом, политопный метод дает экстремальную, предельно возможную скорость. Действительно, точки B и D - самые удаленные от центра декартовой системы координат. Причем направление OB соответствует режиму движения, в котором приводы имеют равную относительную загрузку, т.е. отношение текущих скоростей к соответствующим максимальным – одинаково для всех приводов.

Предлагаемый ниже подход заключается в математическом описании манипулятора как единой мехатронной системы, где учитываются кинематика манипуляционного механизма, технические ограничения комплекса приводов, а также скоростные и силовые ограничения на режимы движения рабочего органа робота.

1. Нормализованные переменные и их физический смысл

Запишем выражения для скоростей и моментов (сил) в пространстве обобщенных координат в следующем виде:

$$\dot{q}_i = \frac{\dot{q}_i}{\dot{q}_{\max i}} \dot{q}_{\max i}, \quad Q_i = \frac{Q_i}{Q_{\max i}} Q_{\max i},$$

где $\dot{q}_i, \dot{q}_{\max i}$ – соответственно обобщенная скорость и ее максимальное значение, развиваемые приводом i -го сочленения; $Q_i, Q_{\max i}$ – соответственно момент (сила) и его максимальное значение, развиваемые приводом i -го сочленения.

В матричных обозначениях

$$\dot{\vec{q}} = Z_q \dot{\vec{q}}_n, \quad \vec{Q} = Z_Q \vec{Q}'_n, \quad (5.80)$$

где Z_q, Z_Q – диагональные матрицы максимальных значений соответственно скоростей и моментов (сил); $\dot{\vec{q}}_n, \vec{Q}'_n$ – соответственно векторы нормализованных скоростей и моментов (сил).

Из смысла нормализованных переменных следует, что

$$|\dot{q}_{n_i}| \leq 1, \quad |Q'_{n_i}| \leq 1.$$

Аналогично рассматривается и декартовое (операционное) пространство:

$$\dot{\vec{x}} = Z_x \dot{\vec{x}}_n, \quad \vec{F} = Z_F \vec{F}'_n. \quad (5.81)$$

$$|\dot{x}_{n_i}| \leq 1, \quad |F'_{n_i}| \leq 1.$$

Матрицы Z_x и Z_F описывают ограничения в операционном пространстве и поэтому могут быть использованы для задания технологических требований. Весовые матрицы Z_x, Z_q, Z_F, Z_Q в общем случае не

являются постоянными, и значения их элементов меняются при движении системы.

Матрицы Z_q и Z_Q отражают предельные возможности исполнительных приводов. Элементы этих матриц могут быть найдены аналитически или экспериментально (например, по методике, предложенной в статье [110]).

Рассмотрим взаимосвязь нормализованных скоростей в операционном пространстве и в пространстве обобщенных координат. Так как операционные и обобщенные скорости связаны через матрицу Якоби

$$\dot{\vec{x}} = J\dot{\vec{q}}$$

и учитывая (1), (2), получаем

$$Z_x \dot{\vec{x}}_n = J Z_q \dot{\vec{q}}_n.$$

Откуда

$$\dot{\vec{x}}_n = J_n \dot{\vec{q}}_n, \quad (5.82)$$

где

$$J_n \equiv Z_x^{-1} J Z_q. \quad (5.83)$$

Аналогичное выражение для нормализованных моментов (сил) имеет вид

$$\vec{Q}'_n = J'_n \vec{F}'_n, \quad (5.84)$$

где

$$J'_n \equiv Z_F J Z_Q^{-1}. \quad (5.85)$$

Назовем J_n и J'_n матрицами Якоби, нормализованными соответственно по скорости и по моменту (силе).

В соответствии с (1) и (2) нормализованные скорости могут быть представлены в следующем виде:

$$\dot{\vec{x}}_n = Z_x^{-1} \dot{\vec{x}}, \quad (5.86)$$

$$\dot{\vec{q}}_n = Z_q^{-1} \dot{\vec{q}}. \quad (5.87)$$

Введем новые переменные

$$\vec{F}_n = Z_x \vec{F}, \quad (5.88)$$

$$\vec{Q}_n = Z_q \vec{Q}. \quad (5.89)$$

Назовем величины $\dot{\vec{x}}_n$, $\dot{\vec{q}}_n$, $\vec{F}_n$, $\vec{Q}_n$ переменными, нормализованными по скорости.

Заметим, что переменные $(\dot{\vec{x}}_n, \dot{\vec{q}}_n)$ и $(\vec{F}_n, \vec{Q}_n)$ в операционном пространстве и в пространстве обобщенных координат связаны между собой через скоростной якобиан. Действительно, как легко проверить,

$$\vec{Q}_n = J_n^T \vec{F}_n, \quad (5.90)$$

в то время как для скоростей $\dot{\vec{x}}_n$, $\dot{\vec{q}}_n$ выполняется соотношение (5.82).

Аналогично назовем величины

$$\vec{F}'_n = Z_F^{-1} \vec{F}_n, \quad (5.91)$$

$$\vec{Q}'_n = Z_Q^{-1} \vec{Q}_n, \quad (5.92)$$

$$\dot{\vec{q}}'_n = Z_Q \dot{\vec{q}}_n, \quad (5.93)$$

$$\dot{\vec{x}}_n = Z_F \dot{\vec{x}}_n \quad (5.94)$$

переменными, нормализованными по силе.

В данном случае связь между соответствующими переменными в операционном пространстве и в пространстве обобщенных координат определяется выражениями

$$\dot{\vec{x}}_n = J'_n \dot{\vec{q}}'_n, \quad \vec{Q}'_n = J'_n \vec{F}'_n. \quad (5.95)$$

Выявим физический смысл нормализованных переменных.

1. Так как $\vec{Q}_n = Z_Q \vec{Q}'_n$, то $Q_{n_i} = q_{\max i} Q'_i$, т.е. Q_{n_i} – максимальная мгновенная мощность, развиваемая приводом i -го сочленения при заданном значении момента (силы) Q'_i .

2. $\dot{\vec{q}}'_n = Z_Q \dot{\vec{q}}_n$ или $\dot{q}'_{n_i} = Q_{\max i} \dot{q}_i$. Откуда $\dot{q}'_{n_i}$ – максимальная мгновенная мощность, развиваемая приводом i -го сочленения при заданном значении обобщенной скорости $\dot{q}_i$.

3. $\vec{F}_n = Z_F \vec{F}'_n$ или $F_{n_i} = x_{\max i} F'_i$, т.е. F_{n_i} – максимальная мгновенная мощность, которую разрешается приложить в операционном пространстве в направлении i -й координаты при заданном значении силы F'_i .

4. $\dot{x}_n = Z_F \ddot{x}$ или $\dot{x}'_{n_i} = F_{\max i} \dot{x}_i$, т.е. $\dot{x}'_{n_i}$ – максимальная мгновенная мощность, которую разрешается приложить в операционном пространстве в направлении i -й координаты при заданном значении скорости $\dot{x}_i$.

2. Уравнения динамики манипулятора в нормализованных переменных

Запишем уравнение динамики манипулятора в пространстве обобщенных координат:

$$A(\vec{q})\ddot{\vec{q}} + \vec{b}(\vec{q}, \dot{\vec{q}}) + \vec{g}(\vec{q}) = \vec{Q}, \quad (5.96)$$

где $A(\vec{q})$ – матрица инерции манипулятора; $\vec{b}(\vec{q}, \dot{\vec{q}})$ – вектор центробежных и кориолисовых сил; $\vec{g}(\vec{q})$ – вектор сил тяжести.

В дальнейших выкладках для упрощения записи будем опускать скобки, выражающие зависимость приведенных выше величин от обобщенных координат и скоростей.

Умножим уравнение (5.96) на весовую матрицу Z_q :

$$(Z_q A Z_q) Z_q^{-1} \ddot{\vec{q}} + Z_q \vec{b} + Z_q \vec{g} = Z_q \vec{Q}. \quad (5.97)$$

Продифференцируем соотношение (5.87):

$$\ddot{\vec{q}}_n = \dot{Z}_q^{-1} \dot{\vec{q}} + Z_q^{-1} \ddot{\vec{q}}.$$

Отсюда

$$(Z_q A Z_q) \ddot{\vec{q}}_n = (Z_q A Z_q) \dot{Z}_q^{-1} \dot{\vec{q}} + (Z_q A Z_q) Z_q^{-1} \ddot{\vec{q}}.$$

С учетом последнего равенства перепишем (5.97) в виде

$$(Z_q A Z_q) \ddot{\vec{q}}_n + (Z_q \vec{b} - Z_q A Z_q \dot{Z}_q^{-1} Z_q \dot{\vec{q}}_n) + Z_q \vec{g} = Z_q \vec{Q}.$$

Введем обозначения:

$$A_n = Z_q A Z_q, \quad (5.98)$$

$$\vec{b}_n = Z_q \vec{b} - A_n \dot{Z}_q^{-1} Z_q \dot{\vec{q}}_n, \quad (5.99)$$

$$\vec{g}_n = Z_q \vec{g}. \quad (5.100)$$

Тогда окончательно имеем

$$A_n \ddot{\vec{q}}_n + \vec{b}_n + \vec{g}_n = \vec{Q}_n. \quad (5.101)$$

Уравнение динамики манипулятора в операционном пространстве можно представить в виде [71]:

$$\Lambda(\vec{x})\ddot{\vec{x}} + \vec{\mu}(\vec{x}, \dot{\vec{x}}) + \vec{p}(\vec{x}) = \vec{F}, \quad (5.102)$$

где $\Lambda = J^{-T} A J^{-1}$ – операционная матрица инерции манипулятора; $\vec{\mu} = J^{-T} \vec{b} - \Lambda \dot{J} \dot{\vec{q}}$ – операционный вектор центробежных и кориолисовых сил; $\vec{p} = J^{-T} \vec{g}$ – операционный вектор сил тяжести.

Проведем все преобразования аналогично предыдущему пункту, но только уже с использованием матрицы Z_x .

Получим уравнение в переменных, нормализованных по скорости в операционном пространстве

$$\Lambda_n \ddot{\vec{x}}_n + \vec{\mu}_n + \vec{p}_n = \vec{F}_n, \quad (5.103)$$

где

$$\Lambda_n \equiv Z_x \Lambda Z_x, \quad (5.104)$$

$$\vec{\mu}_n \equiv Z_x \vec{\mu} - \Lambda_n \dot{Z}_x^{-1} Z_x \dot{\vec{x}}_n, \quad (5.105)$$

$$\vec{p}_n \equiv Z_x \vec{p}. \quad (5.105)$$

Для переменных, нормализованных по силе в пространстве обобщенных координат, проводим аналогичные выкладки, но с использованием матрицы Z_Q^{-1} :

$$A'_n \ddot{\vec{q}}'_n + \vec{b}'_n + \vec{g}'_n = \vec{Q}'_n, \quad (5.106)$$

где

$$A'_n = Z_Q^{-1} A Z_Q^{-1}, \quad (5.107)$$

$$\vec{b}'_n = Z_Q^{-1} \vec{b} - A'_n \dot{Z}_Q Z_Q^{-1} \dot{\vec{q}}_n, \quad (5.108)$$

$$\vec{g}'_n = Z_Q^{-1} \vec{g}. \quad (5.109)$$

Для переменных, нормализованных по силе в операционном пространстве, используем весовую матрицу Z_F^{-1} :

$$\Lambda'_n \ddot{x}'_n + \bar{\mu}'_n + \bar{p}'_n = \bar{F}'_n, \quad (5.110)$$

где

$$\Lambda'_n = Z_F^{-1} \Lambda Z_F^{-1}, \quad (5.111)$$

$$\bar{\mu}'_n = Z_F^{-1} \bar{\mu} - \Lambda'_n \dot{Z}_F Z_F^{-1} \dot{x}'_n, \quad (5.112)$$

$$\bar{p}'_n = Z_F^{-1} \bar{p}. \quad (5.113)$$

Матрицы $A_n, A'_n, \Lambda_n, \Lambda'_n$ являются матрицами инерции, $\bar{b}_n, \bar{b}'_n, \bar{\mu}_n, \bar{\mu}'_n$ – векторами центробежных и кориолисовых сил, а $\bar{g}_n, \bar{g}'_n, \bar{p}_n, \bar{p}'_n$ – векторами сил тяжести в соответствующих пространствах.

Анализируя полученные выражения, можно сделать вывод о том, что кинематические и динамические модели манипуляторов в нормализованной форме имеют привычный вид, идентичный традиционным моделям. При этом силовые и скоростные приводные ограничения учитываются при формировании модели через введение нормализованных переменных и матриц коэффициентов. Следовательно, разработанные критерии оптимизации алгоритмов планирования движений роботов могут применяться путем формальной замены переменных и весовых матриц.

3. Пример построения математической модели избыточного манипулятора с учетом ограничения выходного сигнала силового преобразователя

В качестве примера рассмотрим задачу синтеза управления движением манипулятора с учетом ограничений выходных сигналов силовых преобразователей приводов. Насыщение выходного усилителя даже в одном из приводов при выполнении сложного пространственного движения приводит к фактической неуправляемости робота по этой координате. Причиной возникновения такой ситуации может быть, например, неверная настройка ПИД-регулятора (особенно его интегральной

составляющей) в условиях значительных изменений параметров нагрузки. При синтезе управления многостепенными и тем более избыточными манипуляторами эта проблема должна быть решена на этапе планирования движения.

Рассмотрим известный метод скоростного управления движением манипуляторов RMRC (Resolved Motion Rate Control), изложенный в работе [114]. Для избыточного манипулятора, имеющего n степеней подвижности, в m -мерном операционном пространстве ($n > m$) вектор скорости концевой точки определяется выражением

$$\dot{\vec{x}} = J(\vec{q})\dot{\vec{q}}, \quad (5.114)$$

где $J(\vec{q})$ – матрица Якоби размерности $(m \times n)$; $\dot{\vec{q}}$ – вектор $(n \times 1)$ обобщенных скоростей, $\dot{\vec{x}}$ – вектор $(m \times 1)$ операционных скоростей.

Согласно методу RMRC управление манипулятором производится в соответствии с решением уравнения (5.114) относительно обобщенных скоростей:

$$\dot{\vec{q}} = J^{\#}(\vec{q})\dot{\vec{x}} - [E - J^{\#}(\vec{q})J(\vec{q})]\vec{\bar{\varphi}}, \quad (5.115)$$

где $J^{\#}(\vec{q})$ – псевдообратная матрица Якоби $(n \times m)$, которая определяется формулой $J^{\#} = J^T(JJ^T)^{-1}$; E – единичная матрица $(n \times n)$, $\vec{\bar{\varphi}}$ – произвольный вектор $(n \times 1)$, который может быть выбран в соответствии с используемым при оптимизации движения критерием качества.

Оптимальным решением, доставляющим минимум квадратичному критерию

$$\min \|\dot{\vec{q}}\| = \min \left(\sqrt{\dot{q}_1^2 + \dot{q}_2^2 + \dots + \dot{q}_n^2} \right), \quad (5.116)$$

будет вектор обобщенных скоростей манипулятора

$$\dot{\vec{q}} = J^{\#}(\vec{q})\dot{\vec{x}}. \quad (5.117)$$

Такой выбор критерия в рассматриваемой постановке задачи представляется вполне оправданным, так как минимизация нормы вектора обобщенных скоростей (38) может предотвратить насыщение усилителей. Однако, как показывает моделирование, этого не всегда удается добиться в конкретных случаях.

Для решения задачи перейдем к переменным, нормализованным по скорости. Для избыточных манипуляторов нормализованное выражение (5.116) имеет вид

$$\dot{\bar{q}}_n = J_n^\#(\bar{q})\dot{\bar{x}}, \quad (5.118)$$

где

$$J_n^\# = J_n^T (J_n J_n^T)^{-1} = Z_q J^T (J Z_q^2 J^T)^{-1}. \quad (5.119)$$

Из уравнений (5.118), (5.119) получаем оптимальную зависимость для вектора обобщенных скоростей

$$\dot{\bar{q}} = Z_q \dot{\bar{q}}_n = Z_q^2 J^T (J Z_q^2 J^T)^{-1} \dot{\bar{x}}. \quad (5.120)$$

Для доказательства оптимальности полученного решения воспользуемся классическим методом Лагранжа. В качестве критерия введем норму нормализованных обобщенных скоростей

$$\min \|\dot{\bar{q}}\|_{Z_q^{-2}} = \min \left(\sqrt{\left(\frac{\dot{q}_1}{\dot{q}_{1\max}} \right)^2 + \left(\frac{\dot{q}_2}{\dot{q}_{2\max}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\dot{q}_n}{\dot{q}_{n\max}} \right)^2} \right). \quad (5.121)$$

Тогда задача локальной оптимизации сводится к нахождению минимума функции $F = \dot{\bar{q}}^T Z_q^{-2} \dot{\bar{q}}$ при условии $J\dot{\bar{q}} - \dot{\bar{x}} = 0$.

Составим функцию Лагранжа:

$$F^* = \dot{\bar{q}}^T Z_q^{-2} \dot{\bar{q}} + \bar{\lambda} (J\dot{\bar{q}} - \dot{\bar{x}}),$$

где $\bar{\lambda}$ – вектор $(m \times 1)$ множителей Лагранжа.

Для нахождения условного экстремума функции F^* найдем производные и приравняем их к нулю:

$$\frac{\partial F^*}{\partial \dot{\bar{q}}} = 2Z_q^{-2} \dot{\bar{q}} + J^T \bar{\lambda} = 0; \quad (5.122)$$

$$\frac{\partial F^*}{\partial \bar{\lambda}} = J\dot{\bar{q}} - \dot{\bar{x}} = 0. \quad (5.123)$$

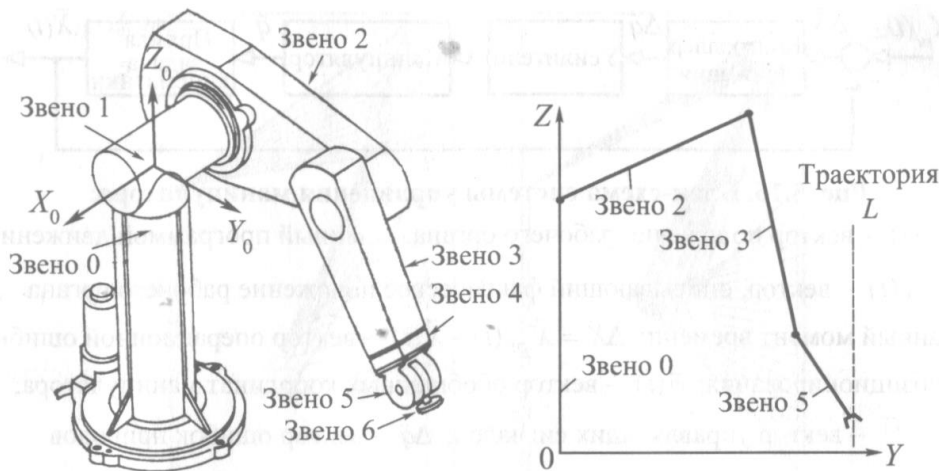


Рис. 5.15. Манипулятор "PUMA-560":

а – схема манипулятора; б – стержневая модель манипулятора

Из выражений (5.122) и (5.123) следует

$$\bar{\lambda} = -2(JZ_q^{-2}J^T)^{-1}\dot{\bar{x}}. \quad (5.124)$$

Подставляя (5.124) в (5.122), имеем полученную ранее методом нормализованных переменных зависимость (5.120), что доказывает оптимальность найденного решения.

Проиллюстрируем вышесказанное на примере трехзвенного манипулятора, движущегося в плоскости вдоль заданной траектории. Данный манипулятор является избыточным для поставленной задачи движения, так как для ее выполнения достаточно двух степеней подвижности.

Для того чтобы порядок геометрических и кинематических параметров модели соответствовал характеристикам реальных манипуляторов, выберем в качестве основы модели манипулятор "PUMA-560". Если пятое звено этого робота расположить в плоскости второго и третьего, то данная группа звеньев будет образовывать плоский трехзвенник. Эквивалентное стержневое представление данной системы изображено на рис. 5.15.

Длины звеньев манипулятора принимаются соответственно для 2-, 3- и 5-го звеньев: $l_2 = 0,434$ м, $l_3 = 0,431$ м, $l_5 = 0,297$ м.

Высота колонны (звена 0 на рис. 5.15, а) составляет $H = 0,66$ м.

Значения максимальных скоростей приводов определены экспериментально [110]: $\dot{q}_{2\max} = 1,5316$ рад/с; $\dot{q}_{3\max} = 3,9016$ рад/с; $\dot{q}_{5\max} = 9,3118$ рад/с.

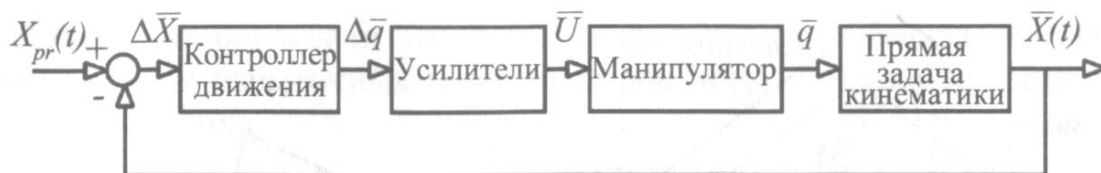


Рис. 5.16. Блок-схема системы управления манипулятора:

$\bar{X}_{pr}(t)$ – вектор положения рабочего органа, заданный программой движения;

$\bar{X}(t)$ – вектор, описывающий фактическое положение рабочего органа в данный момент времени; $\Delta\bar{X} = \bar{X}_{pr}(t) - \bar{X}(t)$ – вектор операционной ошибки позиционирования; $\bar{q}(t)$ – вектор обобщенных координат манипулятора;

$\bar{U}$ – вектор управляющих сигналов; $\Delta\bar{q}$ – вектор ошибок приводов

Типичная система управления манипулятора может быть схематично представлена блок-диаграммой, представленной на рис. 5.16.

Контроллер движения выполняет преобразование вектора операционной ошибки позиционирования $\Delta\bar{X}$, определяемой в декартовой системе координат, в вектор ошибок приводов $\Delta\bar{q}$ по формуле обращения, которая непосредственно следует из уравнения (5.114):

$$\Delta q = J^{-1} \Delta X,$$

где J^{-1} – обратная матрица Якоби.

Для исследования предложенного подхода используется матрица Якоби в комбинации с весовой матрицей максимальных скоростей приводов:

$$\delta\bar{q} = Z_q J_w^\# \delta\bar{x},$$

где $J_w^\# = Z_q J^T (J Z_q Z_q J^T)^{-1}$.

Сравнение производится с классическим алгоритмом, описываемым следующим уравнением:

$$\delta\bar{q} = J^\# \delta\bar{x},$$

где $J^\# = J^T (J J^T)^{-1}$.

Модель усилителя с зоной насыщения представлена типовой системой уравнений:

$$u_i = \begin{cases} \delta q_i, & |\delta q_i| \leq \dot{q}_{i \max}, \\ \dot{q}_{i \max} \text{sign}(\delta q_i), & |\delta q_i| > \dot{q}_{i \max}, \end{cases}$$

где u_i – напряжение, выдаваемое на обмотки i -го приводного двигателя.

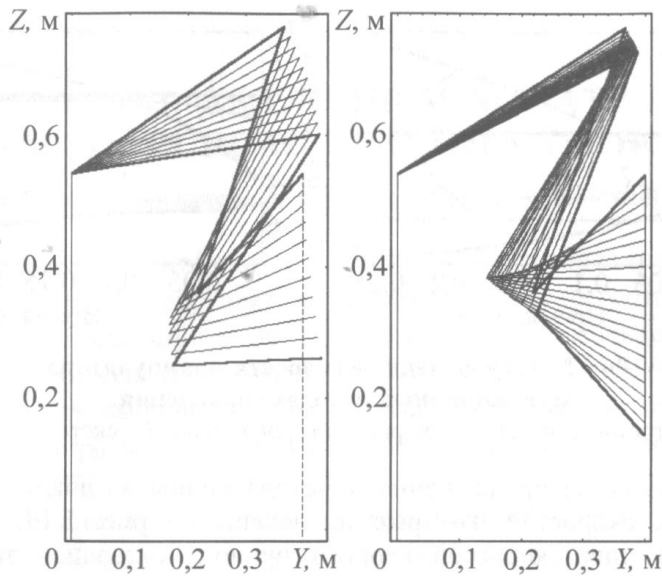


Рис. 5.17. Движение манипулятора вдоль программной траектории при различных методах управления:
а – классический метод; б – метод нормализованных переменных

Модель динамики приводов манипулятора была представлена следующей упрощенной системой n независимых дифференциальных уравнений:

$$0,01\ddot{q}_i + 0,1\dot{q}_i = u_i \quad (i = 1, \dots, n).$$

Траектория L концевой точки представляет собой отрезок прямой вертикальной линии (см. рис. 5.15), описываемой уравнением

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0,4 - 1,5t \end{pmatrix}, \quad 0 < t < 0,3 \text{ с},$$

что соответствует равномерному прямолинейному движению схвата с постоянной скоростью 1,5 м/с. Начальная конфигурация манипулятора была выбрана таким образом, чтобы конечное звено составляло угол $\pi/4$ с траекторией движения.

Приведенные ниже графики демонстрируют результаты моделирования. Как видно из рис. 5.17, при использовании предложенного метода управления манипулятор успешно проходит по заданной траектории с минимальной ошибкой позиционирования, график нормы которой показан на рис. 5.18 в сравнении с нормой ошибки, получающейся в результате применения классического метода.

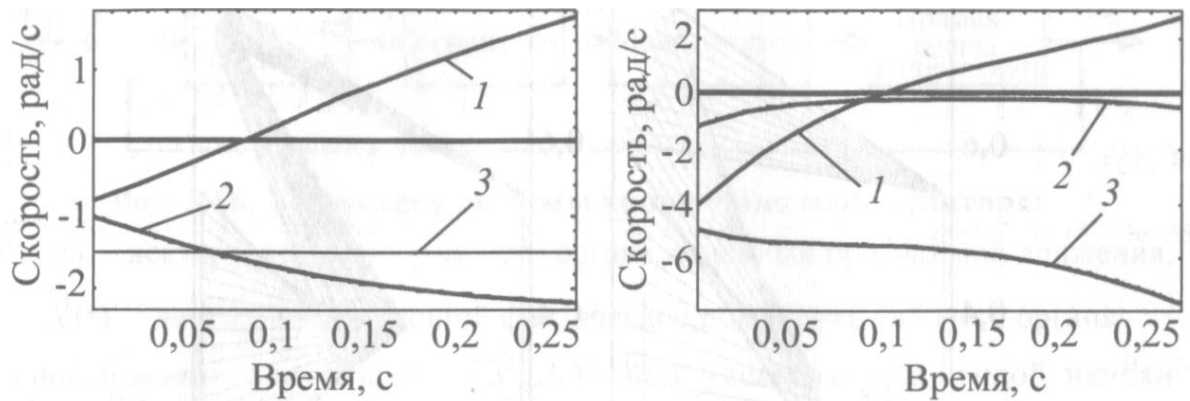


Рис. 5.18. Обобщенные скорости манипулятора при различных методах управления:

1 – скорость третьего звена; 2 – скорость второго звена; 3 – скорость пятого звена

Преимущества предложенного метода видны из анализа графиков обобщенных скоростей, которые приведены на рис. 5.19. Так, абсолютные значения скоростей второго привода оказались значительно меньше скоростей, получающихся при применении классического метода, где кривая скорости все время оказывалась за допустимой зоной и фактически переродилась в прямую линию из-за насыщения усилителя. Дополнительный анализ графиков показывает, что произошло это за счет более продуктивного использования возможностей приводов 3-го и 5-го звеньев: соответствующие скорости стали изменяться в гораздо более широких диапазонах.

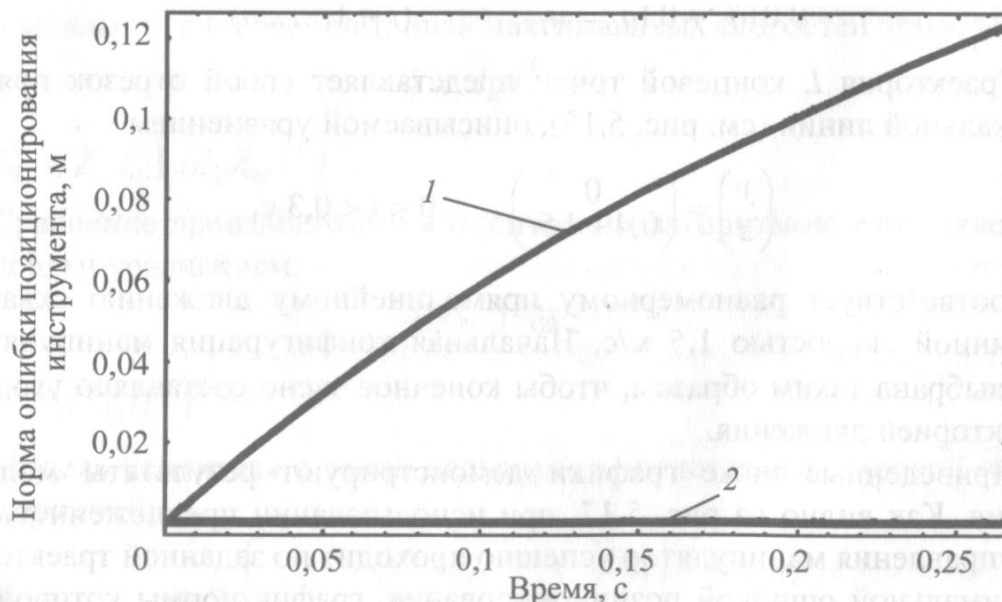


Рис. 5.19. Траекторная ошибка при различных методах управления:

1 – классический метод; 2 – метод нормализованных переменных

Лекция

Тема 1.3.15. Управление движением мехатронных систем на основе интернет-технологии

ВОПРОСЫ

1. Использование Интернет-технологий в мехатронике и робототехнике.
2. Обобщенная схема системы дистанционного управления мобильным роботом по сети Интернет.
3. Программы управления мобильным роботом в среде графического программирования LabVIEW.

ЛИТЕРАТУРА

24. Подураев Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. УП. – М.: Машиностроение, 2007. – 256 с. (Л2 с.230-245).
25. Подураев Ю.В. Основы мехатроники. УП. – МГТУ «Останкин», 2000. – 103 с. (Л5).

1. Использование Интернет-технологий в мехатронике и робототехнике.

Использование Интернет-технологий в мехатронике и робототехнике открывает новые перспективы в развитии распределенных систем управления и сбора данных. Задачи дистанционного мониторинга экспериментов и контроля удаленных технических систем с помощью Интернета могут быть выполнены с минимальными затратами практически в любой точке мира за счет широкого распространения и доступности глобальной сети [83].

Дистанционное управление мехатронными объектами с использованием Интернета подразумевает не только сбор данных при помощи информационно-измерительной аппаратуры, но и подачу управляющих воздействий на исполнительные элементы различных типов. Эта задача является, пожалуй, наиболее перспективной, но вместе с тем сложной для практической реализации. Анализ современных тенденций, а также ряда реально осуществленных проектов показывает, что Интернет является достаточно эффективным и удобным средством организации дистанционного управления техническими объектами, преимуществами которого являются:

- возможность организовать дистанционное управление реальными объектами и экспериментами практически из любой точки мира;

Управление цифровых образовательных технологий

- снижение затрат на создание специализированных каналов связи;
- возможность организации доступа широкого круга специалистов- экспертов, территориально удаленных друг от друга, к уникальному оборудованию в режиме реального времени.

Перспективные области применения Интернет-робототехники:

- ❖ дистанционное управление в условиях агрессивной окружающей среды (мобильные роботы);
- ❖ астрономия (создание роботизированных автономных телескопов);
- ❖ дистанционное образование (создание виртуальных лабораторий удаленного доступа);
- ❖ удаленное управление роботизированными ячейками и системами;
- ❖ индустрия развлечений (виртуальные визиты в музеи, соревнования по управлению Интернет-роботом и т.п.).

Применение роботов для проведения операций в труднодоступных и опасных средах выдвигает требования к созданию систем дистанционного управления мобильными роботами, использующих преимущества сети Интернет в качестве канала связи.

При использовании Интернета для целей дистанционного управления возникает целый ряд научно-технических проблем. Они связаны с оптимизацией взаимодействия web-сервера и системы управления роботом, необходимостью передачи больших объемов данных, нестабильностью удаленного соединения с оператором.

Таким образом, для эффективного использования перспектив, которые открывает применение глобальной сети в области управления техникой, необходимо разработать такой подход к ее использованию, который учитывал бы проблемы, обусловленные спецификой Интернета, как канала связи в системе дистанционного управления техническим объектом, а также специфику управляемого объекта.

При использовании глобальной сети как канала связи следует учитывать следующие важные факторы:

- ограничения по пропускной способности сети: приложение может потребовать передачи таких объемов данных и такой скоростью, которые невозможно обеспечить с помощью Интернета;
- временные задержки, верхняя граница которых непредсказуема и зависит от качества удаленного соединения;
- флуктуация времени задержки в широких пределах, связанной с изменением загрузки сети во времени;

- возможность потери отдельных пакетов передаваемых данных при переполнении входных буферов промежуточных серверов, через которые проходят данные.

Проведенный анализ показывает, что для правильного подхода к решению проблем использования Интернета для управления необходимо знать параметры временной задержки и вероятность потери пакетов данных, т.е. необходимо сформировать модель сегмента Интернета. В зависимости от местонахождения оператора может меняться трассировка маршрута к серверу робота, содержащая различное число промежуточных серверов с неопределенными временами переходов и разной степенью загрузки этих серверов.

Представив Интернет как "черный ящик", характеристики модели которого неизвестны, с помощью программных средств был проведен эксперимент по измерению в течение длительного времени передачи тестовых пакетов данных к удаленному серверу управляемого робота и обратно в отдельно взятом сегменте сети Интернет. С помощью модифицированной ping-процедуры, посылающей ICMP-пакеты (InternetControlMessageProtocol) по 32 байта с частотой 100 Гц и записывающей время передачи в log-файл, был построен график, показывающий вариации временной задержки в течение двух недель (рис. 6.1).

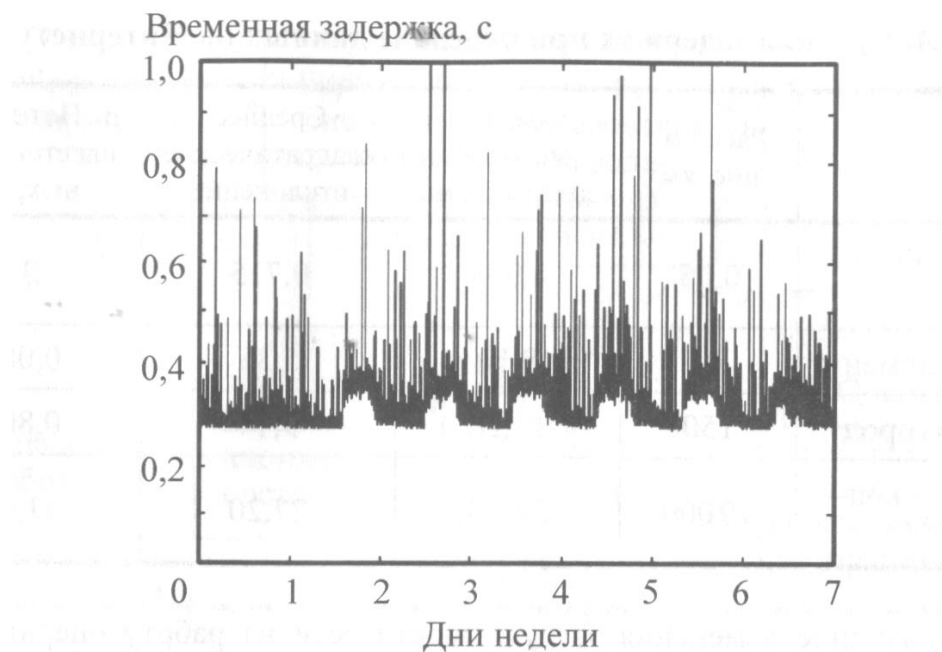


Рис. 6.1. Вариации временной задержки при передаче данных по сети Интернет

Используя полученные в результате эксперимента данные, по методике предложенной в [81], определена пропускная способность сети и верхний предел

полосы передаваемого сигнала. Повышение частоты сигнала увеличивает производительность системы, однако при этом из-за высокой загруженности сети возрастают временные задержки и повышается вероятность потери пакетов данных.

Некоторые данные, позволяющие составить представление о проблемах, возникающих при передаче данных по Интернету на различные расстояния, представлены в табл. 6.1.

Робототехническая система с управлением по глобальной сети должна удовлетворять ряду основных практических требований:

- 1) робот не должен быть поврежден или приведен в неисправное состояние в результате вариаций временной задержки, возникающей при передаче данных по Интернету;

Таблица 6.1

6.1. Средняя задержка при передаче данных по Интернету

Хост	Расстояние, км	Среднее значение задержки, мс	Среднее квадратическое отклонение	Потери пакетов данных, %
Локальная сеть	0,05	0,998	0,715	0
Тот же домен	30	8,10	5,35	0,08
Другой город	150	17,20	9,74	0,80
Другой континент	10 000	326,3	27,20	41,4

- 2) влияние изменения загруженности сети на работу оператора и качество его взаимодействия с роботом должно быть сведено к минимуму;
- 3) для эффективного использования робота при инспекции объектов частота обновления передаваемого изображения с телевизионной камеры, установленной на роботе, должна быть максимально возможной;
- 4) для улучшения взаимодействия оператора с роботом web-сервер должен обеспечивать "дружелюбный" человеко-машинный интерфейс.

Для того чтобы отвечать первому требованию, система управления должна обладать высокой степенью интеллектуальности, позволяющей осуществлять:

- самонастройку системы на параметры Интернет-соединения (средняя скорость передачи данных, вероятность потери данных и т.д.);

- прогноз возникновения критических ситуаций, на которые оператор не сможет адекватно отреагировать из-за временных ограничений на передачу управляющих воздействий;
- автоматическое отключение или переход в режим ожидания при потере управляющих воздействий от оператора.

Для уменьшения влияния загруженности сети на работу оператора необходимо уделить достаточное внимание оптимизации объема передаваемой по сети информации. Дополнительно улучшить взаимодействие оператора с роботом можно за счет разработки человеко-машинного интерфейса, однако при этом необходимо учитывать, что его создание осложнено спецификой и форматами, используемыми в сети Интернет.

2. Обобщенная схема системы дистанционного управления мобильным роботом по сети Интернет

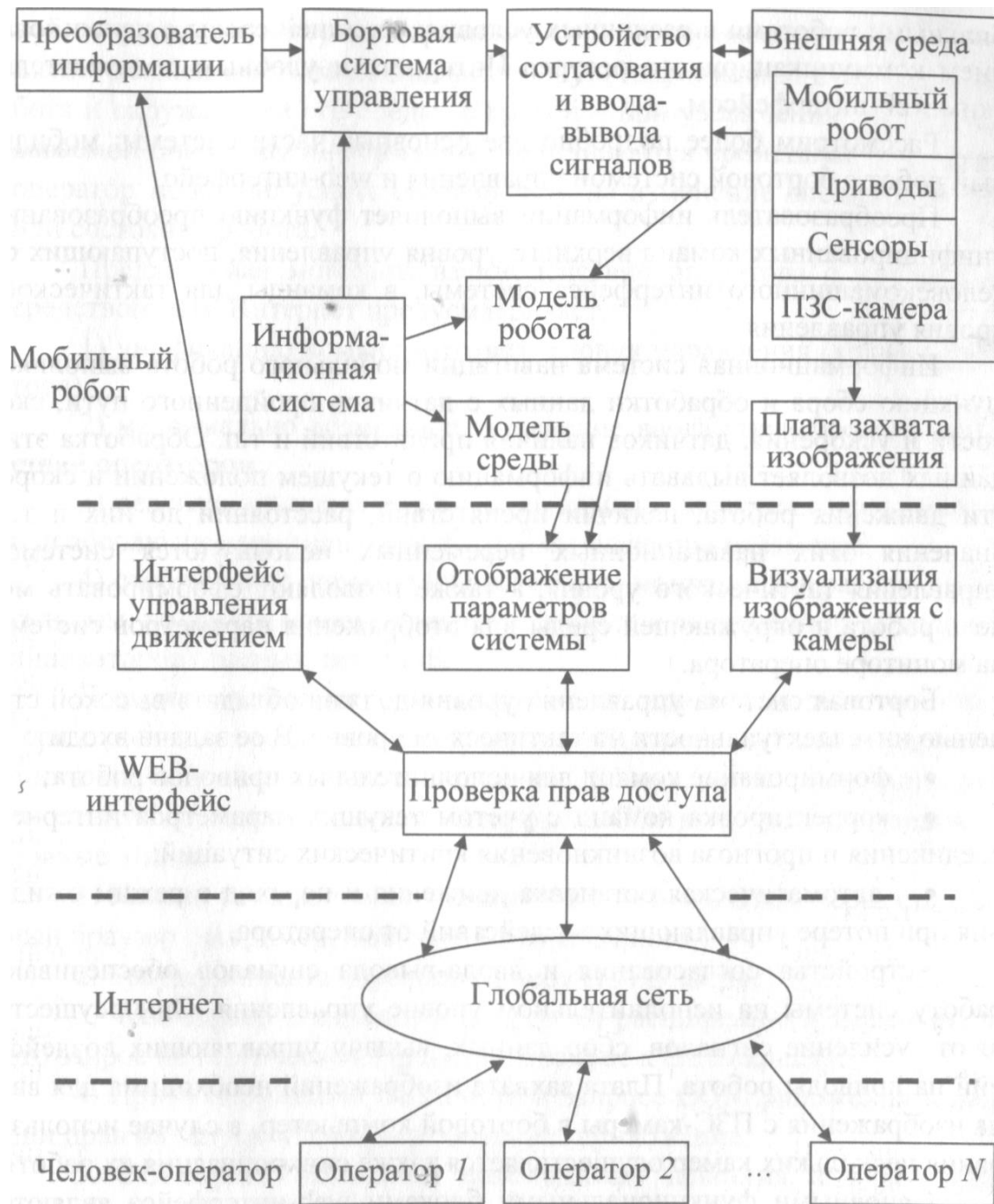


Рис. 6.2. Обобщенная схема системы дистанционного управления мобильным роботом по сети Интернет

Обобщенная схема системы управления мобильным роботом по глобальной сети представлена на рис. 6.2.

По этой схеме можно организовать эффективное управление мобильными роботами в различных условиях внешней среды с использованием коммуникационного ресурса Интернета и удобным пользовательским web-интерфейсом.

Рассмотрим более подробно две основные части системы: мобильный робот с бортовой системой управления и web-интерфейс.

Управление цифровых образовательных технологий

Преобразователь информации выполняет функцию преобразования унифицированных команд верхнего уровня управления, поступающих от человеко-машинного интерфейса системы, в команды для тактического уровня управления.

Информационная система навигации мобильного робота выполняет функцию сбора и обработки данных с датчиков пройденного пути, скорости и ускорения, датчиков наличия препятствий и т.п. Обработка этих данных позволяет выдавать информацию о текущем положении и скорости движения робота, наличии препятствий, расстоянии до них и т.п. Значения этих навигационных переменных используются системой управления тактического уровня, а также позволяют сформировать модель робота и окружающей среды для отображения параметров системы на мониторе оператора.

Бортовая система управления уровня должна обладать высокой степенью интеллектуальности на тактическом уровне. В ее задачи входит:

- формирование команд для исполнительных приводов робота;
- корректировка команд с учетом текущих параметров интернет-соединения и прогноза возникновения критических ситуаций;
- автоматическая остановка движения и переход в режим ожидания при потере управляющих воздействий от оператора.

Устройства согласования и ввода-вывода сигналов обеспечивают работу системы на исполнительном уровне управления. Они осуществляют усиление сигналов, сбор данных, выдачу управляющих воздействий на приводы робота. Плата захвата изображений необходима для ввода изображения с ПЗС-камеры в бортовой компьютер, в случае использования нескольких камер осуществляется также синхронизация их работы.

Основными функциональными блоками web-интерфейса являются интерфейсы управления движением, отображения параметров системы и передачи видеоизображения.

Интерфейс управления движением предоставляет оператору возможность подавать такие унифицированные команды верхнего уровня с помощью нажатия кнопки на экране монитора, как разрешение на начало движения, остановку, поворот, изменение скорости. При дистанционном управлении через Интернет возникает техническое противоречие. С одной стороны, оператор для правильного и своевременного принятия решения должен иметь максимально полную информацию о состоянии робота и окружающей его среды; с другой - при увеличении объема передаваемой оператору информации увеличиваются временные задержки и

оператор может не успеть среагировать на изменение внешних условий или состояния робота.

Предлагаемая методика взаимодействия оператора с роботом посредством сети Интернет предусматривает:

- унификацию команд верхнего уровня управления (команд оператора);
- максимально возможное упрощение ввода управляющих воздействий оператором;
- реализацию управления в виде команд, задающих относительное или абсолютное приращение к текущему значению параметра;
- отображение параметров системы на мониторе оператора с обязательным подтверждением принятия команд к исполнению и наличием индикаторов опасных ситуаций.

Для уменьшения загрузки канала связи при взаимодействии оператора с роботом предлагается уменьшить объем передаваемых управляющих воздействий за счет использования CGI-интерфейса. Алгоритм работы системы с использованием интерфейса CGI включает следующие основные этапы:

1. Клиент устанавливает соединение с web-сервером через стандартный браузер (например, MicrosoftInternetExplorer).
2. Браузер клиента передает серверу HTTP-запрос.
3. Web-сервер анализирует запрос по расширению и выясняет, что это запрос не статической страницы, а запрос к CGI-скрипту.
4. При обнаружении указанного в запросе CGI-приложения и наличии прав на запуск web-сервер запускает приложение.
5. CGI-скрипт выполняет необходимые действия и в результате взаимодействия с приложением формирует ответные данные, выводит их в стандартный поток ввода-вывода. Web-сервер передает эти данные клиенту. Причем CGI-скрипт может передавать не только HTML-данные, но и бинарные данные, таким образом полностью формируется HTTP-ответ.
6. Web-сервер разрывает соединение, завершая тем самым обмен.

3. Программы управления мобильным роботом в среде графического программирования LabVIEW

На основе анализа эффективности различных языков программирования при разработке CGI-приложений в качестве основной среды разработки был выбран язык графического программирования LabVIEW™

(LaboratoryVirtualInstrumentEngineeringWorkbench - рабочее место проектирования лабораторных виртуальных приборов).

LabVIEW- это мощный, полнофункциональный язык программирования, работающий на платформах: PC под управлением Microsoft Windows, компьютеров Apple Macintosh, рабочих станций Sun SPARCstations, Concurrent PowerMax и HP-UX. LabVIEW отличается от последовательной природы традиционных языков программирования и отличается графической программной средой и инструментарием, необходимым для сбора данных, анализа и представления результатов. С помощью базиса LabVIEW- графического языка программирования, именуемого "G," можно создавать программы в виде блок-диаграмм, которые позволяют более адекватно воспринимать "текст" программы, облегчают ее отладку, модернизацию, поиск и корректировку ошибок. После написания программы в виде блок-диаграммы LabVIEW преобразует ее в машинный код.

LabVIEW объединяет сбор, анализ и представление информации в один комплекс ("сквозная" технология программирования). Для получения данных и управления приборами LabVIEW поддерживает протоколы RS-232/422, IEEE488 (GPIB) и VXI, включая функции VirtualInstrumentSoftwareArchitecture (VISA), а также встраиваемые платы сбора данных. В состав пакета входит инструментальная библиотека с драйверами для сотен приборов, что значительно упрощает приложения управления приборами. Обширная библиотека для анализа данных содержит функции: генерации сигналов, их обработки, фильтрации, статистической оценки, линейной алгебры и операций с массивами. Пакет LabVIEW является графическим по своей природе и обеспечивает такие средства визуализации, как создание таблиц, приборных индикаторов, двумерных графиков и трехмерных изображений.

В числе других достоинств LabVIEW можно отметить возможность встраивания в блок диаграммы подпрограмм пользователя, написанных на традиционных "текстовых" языках программирования (Си, C++, Pascal, VisualBasic), скомпилированных в виде динамически подключаемых библиотек, а также скриптов, написанных в широко распространенной среде MatLab. Это позволяет обеспечить преемственность программного обеспечения и исключает необходимость повторной разработки ранее созданных подпрограмм.

Решающими аргументами в пользу LabVIEW при выборе средства разработки являлись следующие преимущества:

1. Возможность разработки CGI-приложений, что позволяет реализовать концепцию интеграции программного обеспечения web-сервера с управляющей роботом программой.

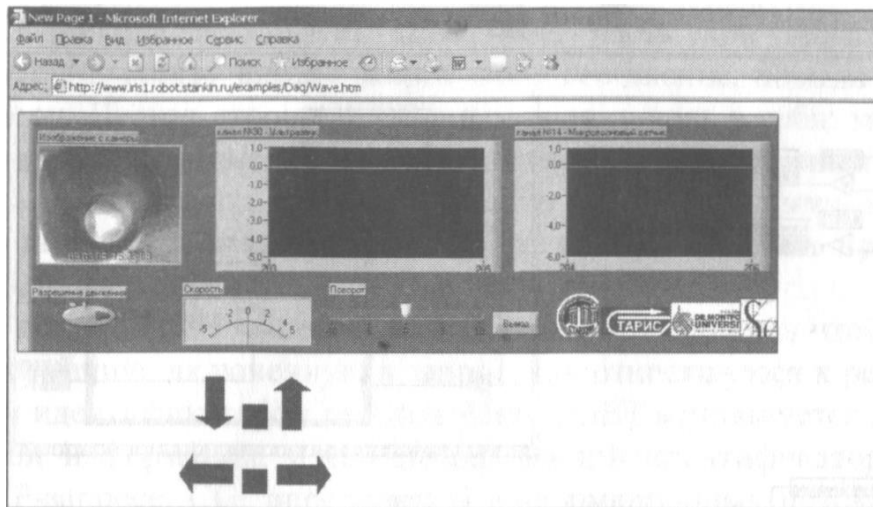


Рис. 6.3. Панель управления мобильным роботом "ИРИС-1"

2. Поддержка операционной системы жесткого реального времени LabVfEWRT, что позволяет осуществлять разработку кода, а также мониторинг и отладку программы в среде LabVIEW под управлением операционной системы Microsoft Windows, а затем загрузить созданный код на компьютер (бортовой контроллер), работающий под управлением операционной системы жесткого реального времени.
3. Наличие в дополнительной библиотеке "InternetDevelopersforGToolkit" встроенного Gweb-сервера - базисного компонента, позволяющего на его основе разрабатывать интернет-приложения.

Программы в языке G принято называть виртуальными приборами - VI (virtual instrument- англ.). Программа состоит из диаграммы и лицевой панели виртуального прибора. Оператор имеет возможность изменять значения переменных, определяющих скорость робота, направление движения и т.д., нажимая на кнопки и переключатели, поворачивая регуляторы на лицевой панели виртуального прибора (рис. 6.3).

Программа написана на графическом языке программирования, а потому представляет собой блок-диаграмму. На рис. 6.4 представлен фрагмент диаграммы программы, управляющей движением робота. Данная программа имеет высокую степень вложенности - большое число подпрограмм - виртуальных подприборов. Каждый из них выполняет определенный набор функций и для каждого строго

определены входные и выходные параметры. Соединения между функциональными блоками отражают потоки данных при работе программы, а объединение нескольких функциональных блоков в "рамки" - отражает использование таких структур, как циклы, последовательности, case-структуры.

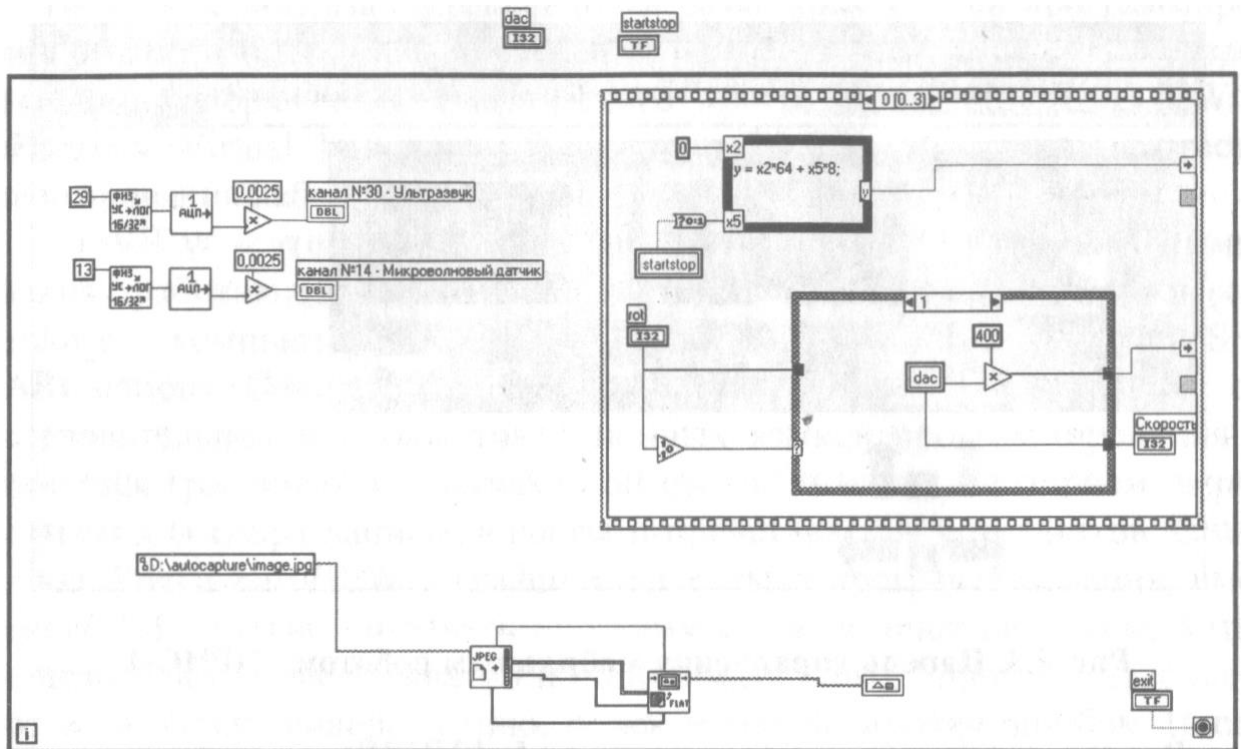


Рис. 6.4. Фрагмент программы управления мобильным роботом в среде графического программирования LabVIEW

Использование среды LabVIEW при разработке управляющей программы позволило за счет подключения внешних библиотек обеспечить работу с многофункциональной платой ввода-вывода Lcard-650. Таким образом, переменные определяют изменение сигнала на выходе ЦАП платы и управляют переключением цифровых линий. Оператору также предоставляется возможность изменять параметры АЦП (частоту дискретизации, номера опрашиваемых каналов и т.п.) и наблюдать показания датчиков в виде графиков, стрелочных и световых индикаторов на лицевой панели.

Серверная часть состоит из исполняемого модуля, решающего основные задачи обработки данных, поступающих от оператора, обращения к управляющей роботом программе и формирования ответа в формате HTML. Как было отмечено выше, такой модуль называется CGI-модулем и реализуется на базе технологии общего интерфейса маршрутизации.

Для реализации взаимодействия клиент-сервер важно, какой метод HTTP-запроса использует клиентская часть при обращении к web- серверу. В общем случае запрос - это сообщение, посылаемое клиентом серверу. Первая строка HTTP-запроса включает в себя: метод, который должен быть применен к запрашиваемому ресурсу, идентификатор ресурса (URI-UniformResourceIdentifier) и используемую версию HTTP- протокола. В рассматриваемом случае клиентская часть применяет методы запроса POSTи GET.

Метод POSTиспользуется для запроса серверу, чтобы тот принял информацию, включенную в запрос, как относящуюся к ресурсу, указанному идентификатором ресурса. Метод GETиспользуется для получения любой информации, идентифицированной идентификатором ресурса в HTTP-запросе. CGIопределяет 4 информационных потока: переменные окружения, стандартный входной поток, стандартный выходной поток.

На рис. 6.5-6.8 показаны модули, предназначенные для обработки и преобразования сенсорной информации, поступающей от системы технического зрения, ультразвуковых и микроволновых датчиков, а также угловых датчиков колес мобильного робота.

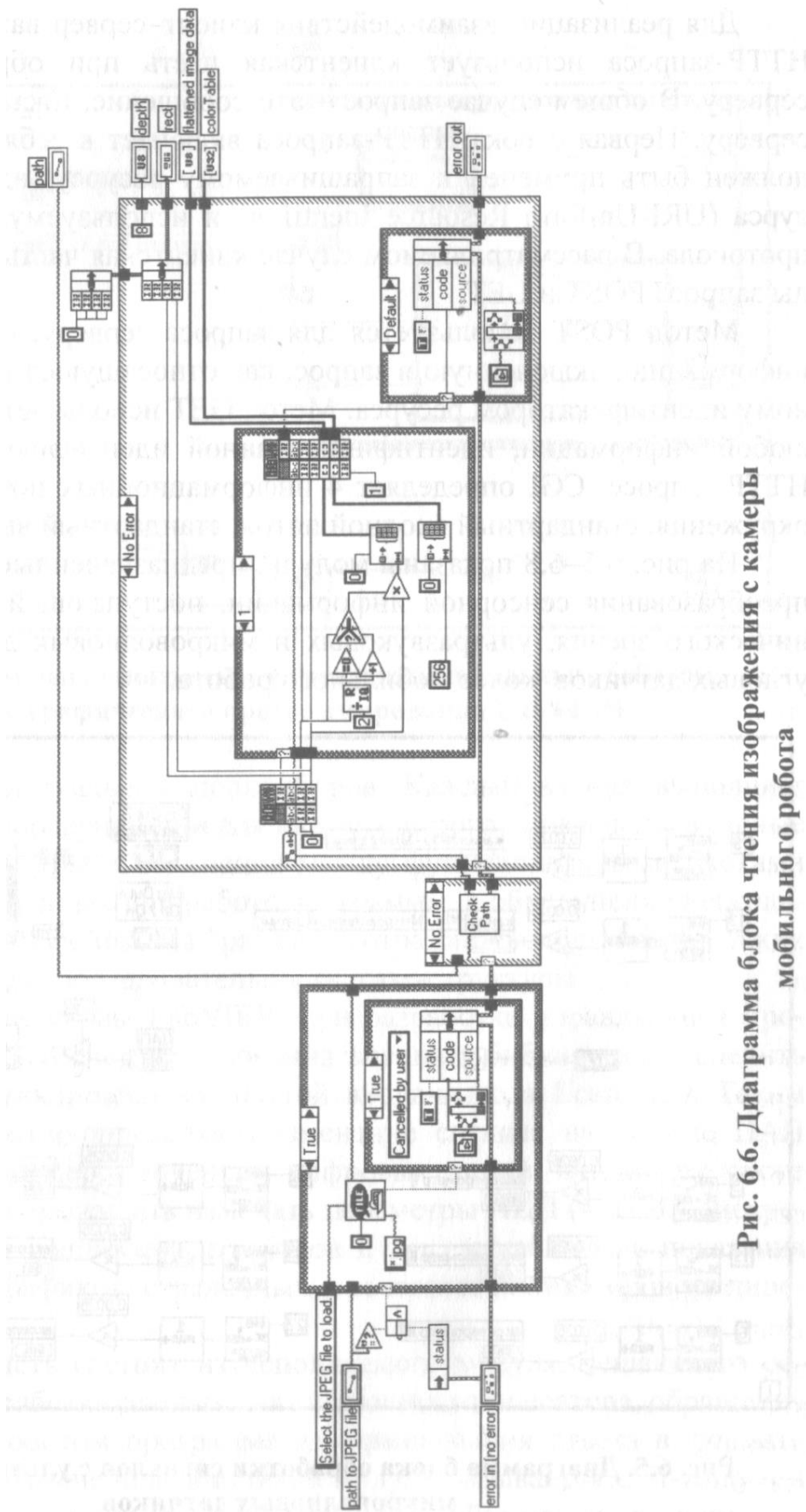


Рис. 6.6. Диаграмма блока чтения изображения с камеры мобильного робота

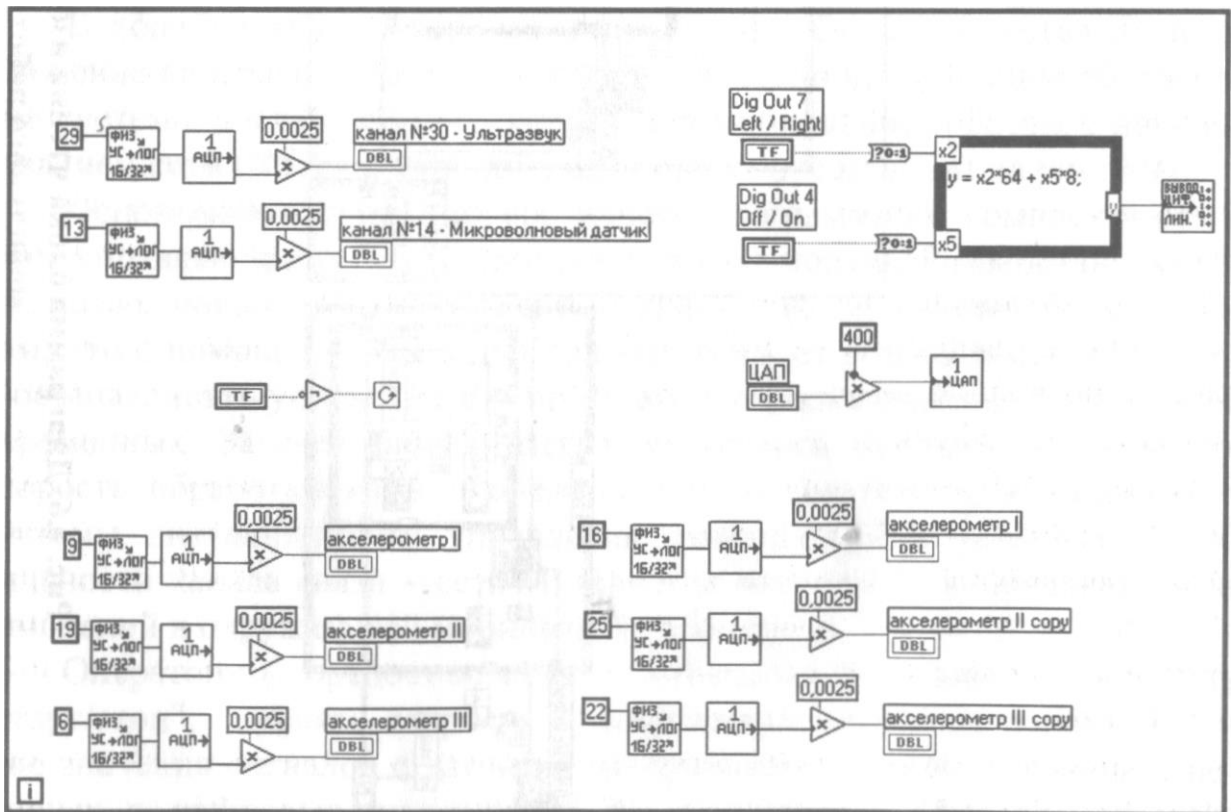


Рис. 6.5. Диаграмма блока обработки сигналов с ультразвуковых и микроволновых Датчиков

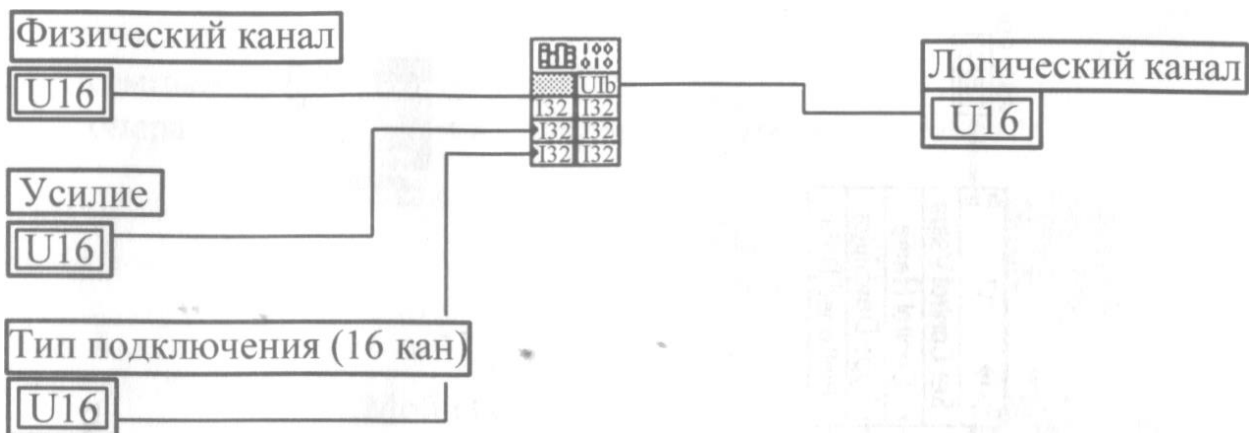


Рис. 6.7. Диаграмма блока преобразования данных с датчиков

Для создания человеко-машинного интерфейса - клиентской части системы управления - необходимо создать HTML-документ, в котором реализован интерфейс с оператором. В языке HTML это возможно посредством форм. При их разработке использована встроенная возможность LabVIEW по опубликованию в виде HTML-лицевой панели виртуального инструмента.

В ходе экспериментальных исследований было осуществлено подключение аппаратной части, а также разработано программное обеспечение системы дистанционного управления мобильным роботом с использованием сети Интернет. Общий вид системы представлен на рис. 6.9.

Основными частями разработанного программного комплекса являются управляющая роботом программа и CGI-модуль. Разработаны методы, позволяющие осуществить интеграцию этих двух частей таким образом, что с помощью CGI-модуля оператор имеет возможность запускать и останавливать управляющую программу, а также изменять значения ее переменных. За счет такой интеграции удалось значительно повысить скорость обработки команд оператора, а следовательно, и надежность системы дистанционного управления, работающей в условиях нестабильности канала связи - сети Интернет и возможных непредсказуемых изменений в окружающей мобильный робот среде.

Оператору предоставляется возможность давать команду "старт/стоп", изменять скорость и направление движения робота. Текущие значения сигналов с датчиков отображаются в виде графиков, стрелочных и цифровых индикаторов на динамически обновляемой web- странице на мониторе оператора. Реализована также передача видеоизображения с камеры.



Рис. 6.9. Управление мобильным роботом "ИРИС-1" по сети Интернет

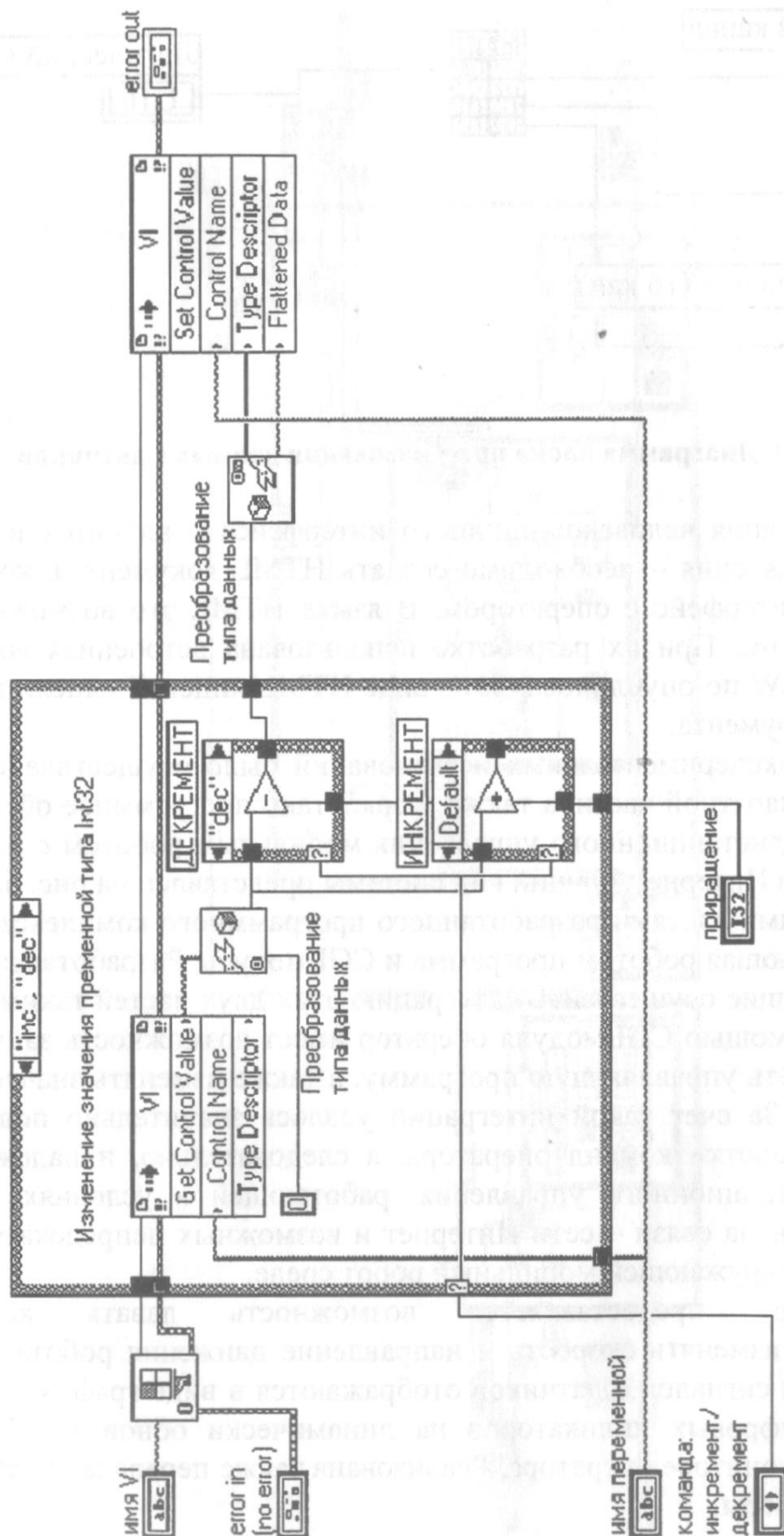


Рис. 6.8. Диаграмма блока обработки сигналов с угловых датчиков колес мобильного робота

При этом обработка навигационных переменных, а также параметров текущего состояния робота осуществляется на управляющем компьютере в рамках работы управляющей программы независимо от оператора и временной задержки сети Интернет. Таким образом, в случае возникновения критического режима работы аварийный останов робота произойдет автоматически по сигналу управляющей программы.

Лекция

Тема 2.1.1. Моделирование и мехатроника

ВОПРОСЫ

1. Моделирование, основные понятия и определения.
2. Мехатроника, основные понятия и определения.
3. Вопросы разработки моделей мехатронных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-БЕК, 2008. – 368 с.

1. Моделирование, основные понятия и определения

Моделью называется любой другой объект, отдельные свойства которого полностью или частично совпадают со свойствами исходного. Следует ясно понимать, что исчерпывающе полной модели быть не может. Она всегда ограничена и должна лишь соответствовать целям моделирования, отражая ровно столько свойств исходного объекта и в такой полноте, сколько необходимо для конкретного исследования.

Можно выделить несколько целей, ради которых создаются модели [4]:

- 1) Модель как средство осмысления помогает выявить взаимозависимости переменных, характер их изменения во времени, найти существующие закономерности. При составлении модели становится более понятной структура исследуемого объекта, вскрываются важные причинно-следственные связи. В процессе моделирования постепенно происходит разделение свойств исход-

ного объекта на существенные и второстепенные с точки зрения сформулированных требований к системе. В определенном смысле вся научная деятельность сводится к построению и исследованию моделей;

- 2) Модель как средство прогнозирования позволяет предсказывать поведение объекта и управлять им, испытывая различные варианты управления.
- 3) Модель как средство проектирования, включающее этапы эскизного, технического и рабочего проектирования. Достижение этой цели стало возможным благодаря интенсивному развитию специализированных прикладных пакетов.

Экспериментировать с реальным объектом часто бывает неудобно, а иногда и просто опасно или вообще невозможно в силу ряда причин:

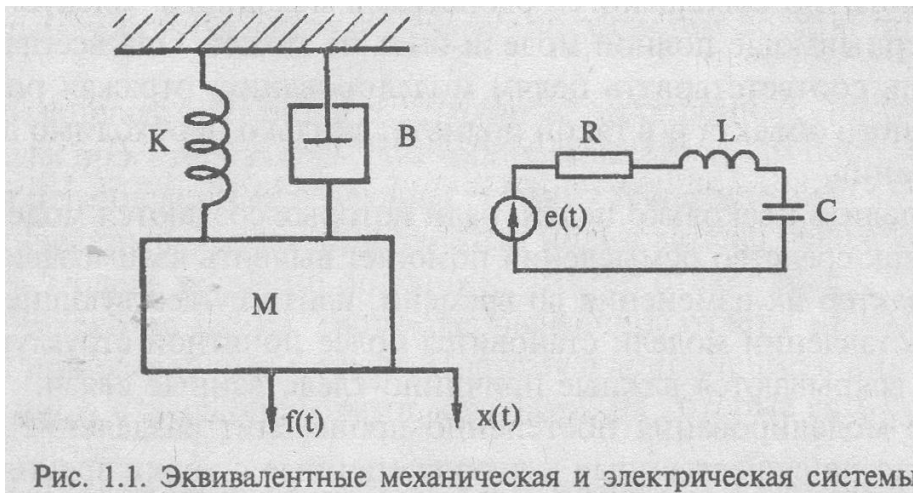
- большой продолжительности эксперимента,
 - риска повредить или уничтожить объект,
 - риска здоровью и жизни исследователей,
 - отсутствия реального объекта в случае, когда он еще только проектируется.
- Все эти причины устраняются при использовании моделей.

Модели можно условно разделить на три группы: физические, аналоговые и математические.

Физическими принято называть такие модели (макеты), в которых реальный объект заменен его увеличенной или уменьшенной копией. Эта копия создается на основе теории подобия, что и позволяет утверждать, что в модели сохранились требуемые свойства. Например, при исследованиях аэродинамических свойств будущего самолета в аэродинамической трубе достаточно его макета, изготовленного в натуральную величину или уменьшенного. Главное, чтобы он точно отражал геометрические размеры. Если физическая модель имеет совершенно иную природу нежели реальный объект, то такую модель называют аналоговой (от слова «аналогия»).

Аналоговое моделирование основано на замене исходного объекта объектом другой физической природы, обладающим аналогичным поведением. Колебания и резонанс можно изучать и с помощью механических систем, и с помощью электрических цепей. При аналоговом моделировании важно увидеть в объекте-заменителе нужные черты и правильно их интерпретировать.

Пример 1.1. На рис. 1.1 показана механическая система, содержащая массу M , пружину с жесткостью K и демпфер с коэффициентом демпфирования B . На систему действует внешняя сила $f(t)$.



Дифференциальное уравнение, описывающее эту механическую систему имеет вид:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx = f(t) \quad (1.1)$$

Обычно аналоговые модели имеют точно такое же математическое описание, как и реальный объект.

Дифференциальное уравнение, описывающее электрическую цепь на рис. 1.1, имеет вид:

$$L \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{C} u_c = \frac{e(t)}{C} \quad (1.2)$$

Сравнение 1.1 и 1.2 показывает, что механическую систему можно исследовать, используя электрическую схему в качестве аналоговой модели.

И физическое, и аналоговое моделирование в качестве основного способа исследования предполагают проведение натурального эксперимента с моделью, но этот эксперимент оказывается в каком-то смысле более привлекательным, чем эксперимент с исходным объектом.

Математическая модель является математическим описанием реального физического объекта. Это описание базируется на физических законах, описывающих поведение объекта. Так, математическое описание двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, составленное на основании законов Кирхгофа и Ньютона, имеет вид:

$$\begin{aligned} \bar{u} &= T_1 \frac{d\bar{i}}{dt} + \bar{i} + \bar{\omega}_m, \\ T_2 \frac{d\bar{\omega}_m}{dt} &= \bar{i} - \bar{M}_H \end{aligned} \quad (1.3)$$

Параметры двигателя, входящие в уравнения (1.3), рассчитываются на основе паспортных данных, помещенных в справочных материалах.

Это математическое описание служит для исследования свойств объекта, необходимых проектировщику.

Свойства объекта, представленного математической моделью, могут изучаться с использованием аналитических и вычислительных методов. В частности, динамические свойства двигателя изучаются на основании характеристического уравнения, составленного по уравнениям двигателя.

$$T_2 T_1 s^2 + T_2 s + 1 = 0 \quad (1.4)$$

которое свидетельствует о том, что при $\frac{4T_1}{T_2} > 1$, корни характеристического уравнения комплексно-сопряженные и переходной процесс является колебательным. При $\frac{4T_1}{T_2} < 1$ — корни уравнения вещественные, отрицательные, а переходной процесс является аperiодическим.

Аналитические методы исследования математических моделей, в разработке которых вот уже несколько столетий принимали и принимают участие самые светлые умы человечества, дали очень много теории и практике. Однако эти методы имеют существенные ограничения. Они позволяют в полной мере исследовать системы, которые описываются дифференциальными уравнениями первого и второго порядка. Системы, описываемые уравнениями третьего и четвертого порядка, поддаются аналитическому решению, но влияние параметров системы приходится исследовать уже численными методами. Системы более высоких порядков исследуются только численными методами.

Численные методы базируются на использовании компьютерного моделирования.

Компьютерная модель - это программная реализация математической модели, дополненная различными служебными программами (например, рисующими и изменяющими графические образы во времени).

На исторически ранних этапах компьютерного моделирования программы создавались на языке машинных слов (1100101...). Следующим шагом стал язык Ассемблера. В дальнейшем появились языки программирования «высокого уровня» (Алгол, Бейсик, Фортран, Паскаль и др.). Применявшаяся в те годы технология про-

граммирования требовала на создание моделей очень много времени. Трудозатраты на создание простой, с современной точки зрения, компьютерной модели оценивались в 5-6 человеко-месяцев.

На сегодняшний день положение кардинально изменилось. Начиная с 1970-х гг., было разработано множество прикладных пакетов моделирования, автоматизирующих прежде всего этап представления математической модели для компьютера. Среди них лидирующее положение для исследования динамических систем занимают пакеты MATLAB и Simulink фирмы Math Work.

Первая версия пакета MATLAB была разработана уже более 20 лет тому назад. Развитие и совершенствование этого пакета происходило одновременно с развитием средств вычислительной техники. Название пакета MATLAB происходит от словосочетания Matrix Laboratory, он ориентирован в первую очередь на обработку массивов данных (матриц и векторов). Именно поэтому, несмотря на достаточно высокую скорость смены поколений вычислительной техники, MATLAB успевал впитывать все наиболее ценное от каждого из этих поколений.

В результате к настоящему времени MATLAB представляет собой богатейшую библиотеку функций, единственной проблемой работы с которыми заключается в умении быстро отыскать те из них, которые нужны для решения поставленной задачи.

Для облегчения работы с пакетом специалистам различных областей науки и техники вся библиотека функций разбита на разделы. Те из них, которые носят общий характер, входят в состав ядра MATLAB. Те же функции, которые являются специфическими для конкретной области, включены в состав пакетов расширения (Toolboxes, Blocksets).

В настоящее время появилась новая, существенно расширенная, версия R2006a, Simulink-6. Этой версии ниже уделено основное внимание. Однако необходимо отметить, что библиотеки старых версий с их интерфейсом сохранены.

Пакет Simulink является приложением к пакету MATLAB. При моделировании с использованием Simulink реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотек стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает.

Simulink является достаточно самостоятельным инструментом MATLAB и при работе с ним совсем не требуется знать сам MATLAB и остальные его приложения. С другой стороны, доступ к функциям MATLAB и другим его инструментам остается открытым и их можно использовать в Simulink. Часть входящих в состав пакетов имеет инструменты, встраиваемые в Simulink (например, LTI-Viewer приложения Control System Toolbox — пакета для разработки систем управления). Имеются также дополнительные библиотеки блоков для разных областей применения (например, Sim Power System — моделирование электротехнических устройств, Digital Signal Processing Blockset — набор блоков для разработки цифровых устройств и т. д.).

При работе с Simulink пользователь имеет возможность модернизировать библиотечные блоки, создавать свои собственные, а также составлять новые библиотеки блоков.

При моделировании пользователь может выбирать метод решения дифференциальных уравнений, а также способ изменения модельного времени (с фиксированным или переменным шагом). В ходе моделирования имеется возможность следить за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные устройства наблюдения, входящие в состав библиотеки Simulink. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков или таблиц. Наиболее полное описание среды MATLAB-Simulink читатель найдет в цитируемой литературе [9, 23, 28].

2. Мехатроника, основные понятия и определения

Первые научные публикации по мехатронике появились в 70-х годах прошлого столетия в Японии в связи с разработкой высокоточных систем автоматики, управляемых от компьютера. В 1983 году начал издаваться научный журнал «Мехатроника», а в 1984 году было издано 7 книг в серии «Мехатроника».

В 1985 году в Америке, в Калифорнийском университете был создан научный центр мехатроники, куда вошло около 20 фирм, занимающихся перспективными научными разработками.

В России и в странах СНГ работы в области мехатроники интенсивно проводились начиная с 80-х годов прошлого века в основном для нужд космоса и в военных целях. К концу XX века сформировались научные школы при ведущих технических вузах в Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске, Киеве, Харькове, Минске и других городах бывшего СССР.

Основной движущей силой широкого внедрения мехатроники явилось развитие вычислительной техники, микросхемотехники, микропроцессоров и микроконтроллеров, что привело к новому осмыслению процессов передачи и преобразования информации в электромеханических системах. В результате это нашло отражение в новых практических разработках в различных отраслях науки и техники.

Само слово «Мехатроника» состоит из двух частей — механика и электроника. При своем рождении это слово обозначало только использование компьютера для управления механической системой.

Сегодня этот термин обозначает научно-техническое направление, соединяющее в себе новые научные подходы при исследовании, опирающееся на современные компьютерные технологии (теория) и новые технологии в проектировании нетрадиционных технических устройств (практика). Мехатронные системы, включающие в свой состав электромеханические преобразователи с электронной коммутацией (актуаторы), различного вида датчики (сенсоры), силовые полупроводниковые преобразователи, микроконтроллеры и персональные компьютеры, широко применяются и интенсивно развиваются.

В настоящее время мехатронные устройства широко используются в медицине (искусственные органы), в компьютерной технике (привода дисков, принтеры, сканеры), в автомобилях (тормозные системы, системы управления двигателем и т. д.), в роботах и манипуляторах, в аудио- и видеотехнике, в специальных устройствах космической и военной техники и т. д.

Состав мехатронной системы

Функциональная схема мехатронной системы приведена на рис. 1.2. Она включает три подсистемы: информационную, энергоэлектронную и электромеханическую.

Электромеханическая подсистема содержит объект управления (ОУ) и электромеханический преобразователь (ЭМП).

Энергоэлектронная подсистема включает силовой полупроводниковый преобразователь (СПП) и вторичный источник питания (ВИП).

Информационная подсистема содержит систему управления и диагностики (СУД) и блок сенсорных устройств (СУ).

При изучении мехатронной системы необходимо исследовать динамические, статические, энергетические, спектральные и ряд других характеристик.

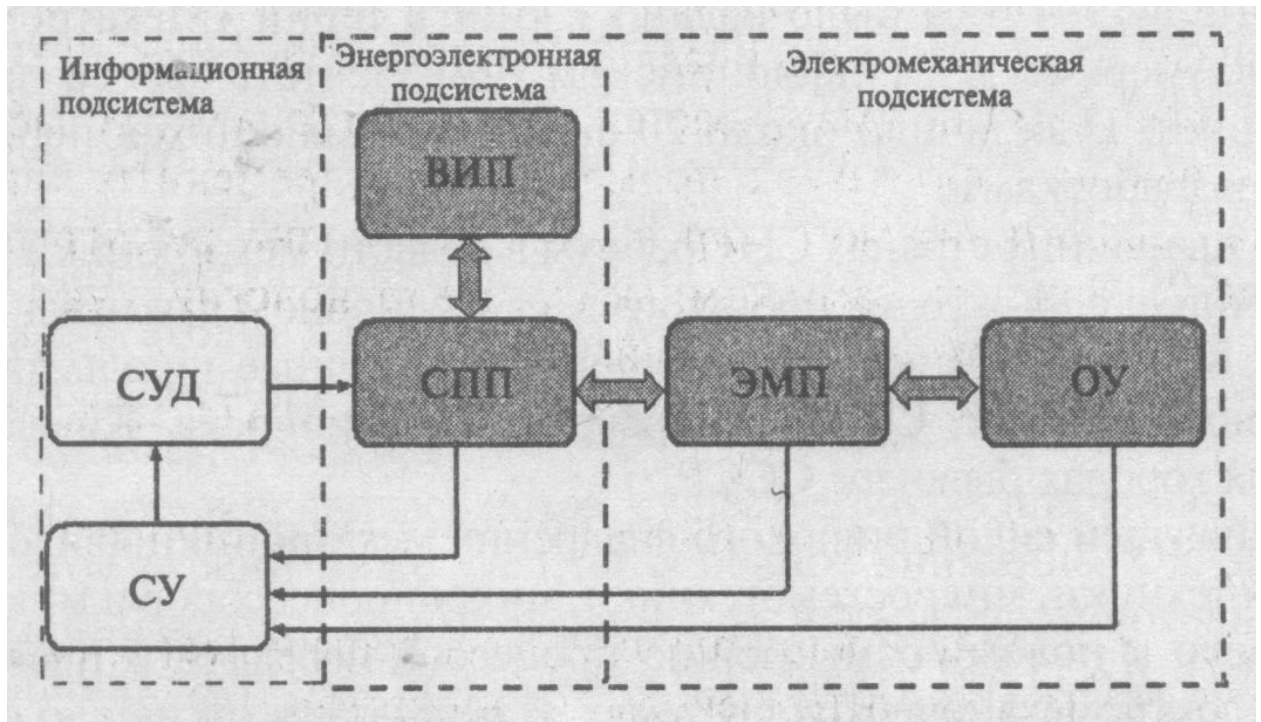


Рис. 1.2. Функциональная схема мехатронной системы

Следует подчеркнуть основные особенности мехатронной системы:

1. Объекты управления мехатронных систем напрямую не связаны с производством. Как правило, они заменяют человека в условиях, где его возможности ограничены, или там, где его здоровью и жизни угрожает опасность.

2. Объекты управления (ОУ) мехатронных систем, как правило, имеют переменные параметры. Часто не удается создать математическую модель объекта управления на основе физических закономерностей его работы. В этом случае для математического описания (ОУ) приходится прибегать к методам идентификации.

3. Электромеханические преобразователи (ЭМП) часто являются конструктивным звеном объекта управления. В этом случае конструкция ЭМП является нетрадиционной.

4. Управление потоком энергии от ВИП до ЭМП осуществляется силовым полупроводниковым преобразователем (СПП). Объединение ВИП, СПП и ЭМП создает мехатронную энергетическую подсистему (МЭП), в которой проявляются новые свойства, отсутствующие в отдельно взятых блоках.

5. Мехатронная энергетическая подсистема, как правило, является нелинейной, импульсной подсистемой с дискретно изменяющимися параметрами.

Поэтому ее анализ, а также синтез системы управления требует применения методов, базирующихся на современных компьютерных технологиях.

Расчет и проектирование мехатронной системы включают:

- построение совместной модели цифровой, импульсной и непрерывной части;
- исследование динамических характеристик непрерывной и импульсной части;
- синтез регулятора;
- исследование динамических характеристик всей системы;
- исследование статических характеристик всей системы.

3. Вопросы разработки моделей мехатронных систем

Использование компьютера позволяет по-новому распределить время, отводимое на теоретическое изучение материала и практические занятия. При этом под практическими занятиями подразумевается работа в виртуальных лабораториях.

Создание обучающих программ с применением современных компьютерных технологий для рассматриваемого курса наиболее полно реализуются в среде MATLAB-Simulink. При этом сами компьютерные технологии в названных пакетах можно поделить на несколько уровней:

- Уровень, использующий рабочее пространство MATLAB и его расширений (Toolboxes).
- Уровень, использующий структурные блоки пакета Simulink и его расширений (Blocksets).
- Уровень, использующий виртуальные (маскированные) блоки пакета Sim Power System с графическим интерфейсом пользователя.
- Уровень, использующий имитационные лабораторные стенды, разработанные с использованием графического интерфейса пользователя (GUI).

Ниже, на конкретных примерах, рассматриваются перечисленные уровни создания виртуальных лабораторий в среде MATLAB, Simulink.

Структурные модели строятся на основе математического описания динамических систем. Это описание может быть представлено дифференциальным уравнением, передаточной функцией, нулями и полюсами передаточной функции либо уравнениями пространства состояний. В пакете Simulink имеется полный набор блоков, позволяющих реализовать любую структурную модель.

Представление результатов моделирования структурных моделей часто осуществляется при использовании пакета расширения Control System, который в своем составе имеет инструментальное средство LTI-Viewer .

Операторное представление математического описания звена робота запишется в виде:

$$\begin{aligned} s^2 \theta &= \frac{K_T}{J} i - \frac{C}{J} s \theta - \frac{K}{J} \theta, \\ s i &= \frac{u}{L} - \frac{R}{L} i - \frac{K_E}{L} s \theta. \end{aligned} \quad (1.5)$$

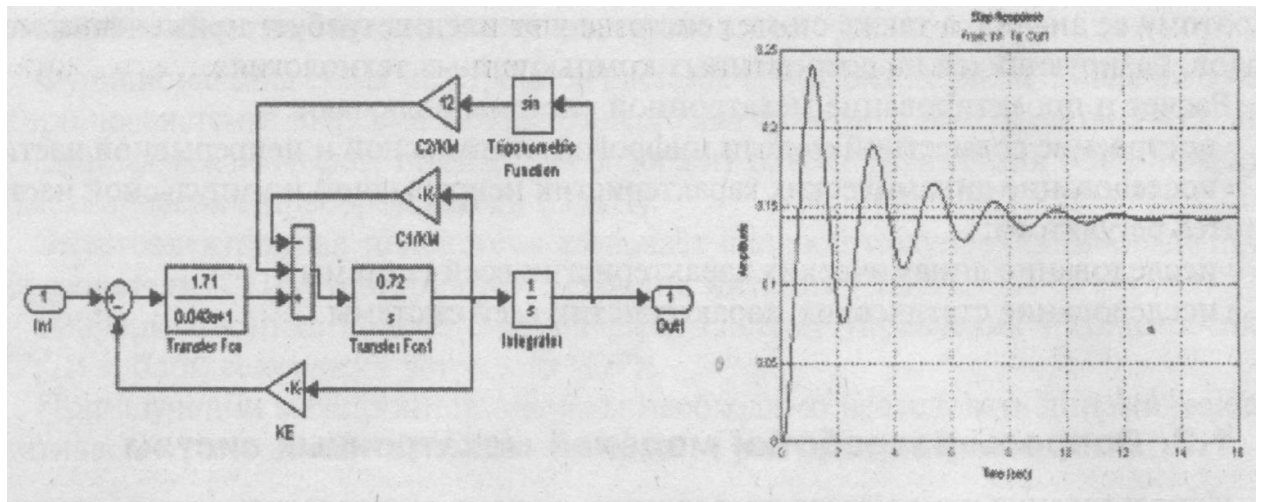
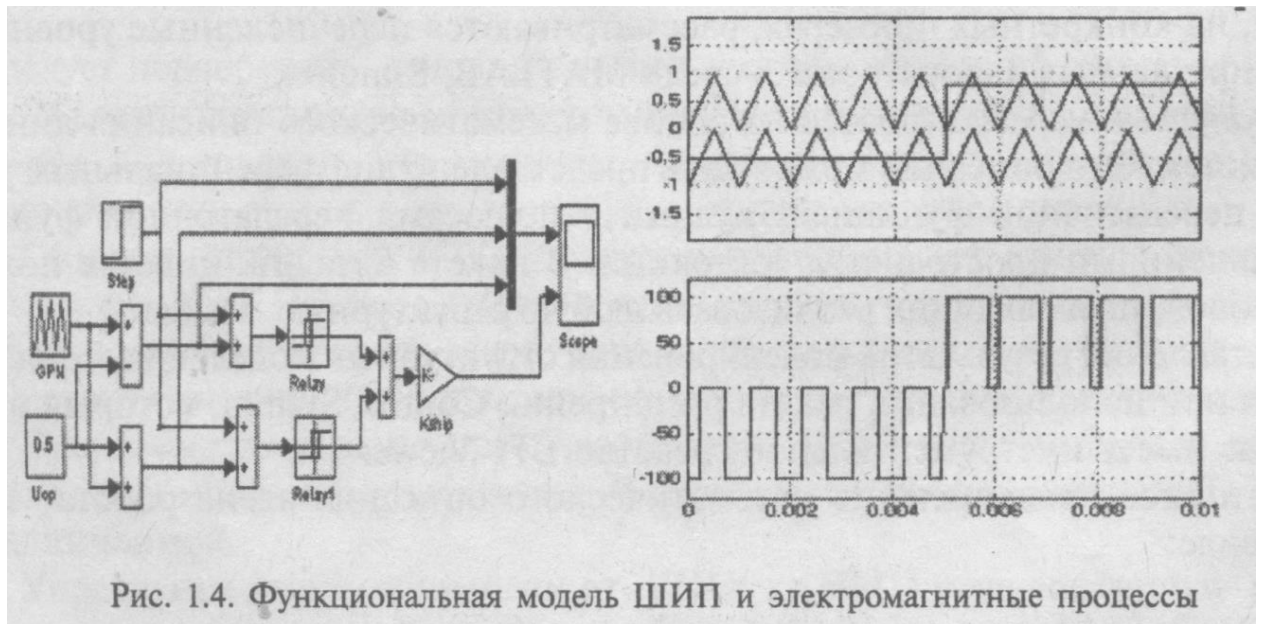


Рис. 1.3. Структурная модель звена робота и его динамические характеристики

На рис. 1.3 приведена структурная модель звена робота, построенная по уравнениям (1.5) и ее динамические характеристики.

Основой *функциональной модели* является логика работы устройства, которое, как правило, содержит нелинейные элементы. Функциональные модели используются для моделирования элементов силовой электроники, при исследовании динамики систем, представленных структурными моделями. В этом случае отпадает необходимость в замене силового преобразователя эквивалентным апериодическим звеном или звеном запаздывания.

Пример функциональной модели реверсивного широтно-импульсного преобразователя с поочередным алгоритмом управления показан на рис. 1.4, здесь же показаны электромагнитные процессы в схеме.



Виртуальные модели — это маскированные блоки устройств силовой электроники и электромеханики, помещенные в библиотеки пакета расширения Sim Power System.

Применение виртуальных моделей позволяет исследовать не только динамические характеристики мехатронной системы, но и ее статические характеристики, такие как:

- регулировочные характеристики;
- нагрузочные характеристики;
- электромагнитные характеристики;
- энергетические характеристики.

Представление результатов моделирования функциональных и виртуальных моделей, как правило, осуществляется путем записи результатов моделирования в рабочее пространство MATLAB с их последующей программной обработкой.

На рис. 1.5 приведен пример структурно-функционально-виртуальной модели вентильного двигателя, а на рис. 1.6 — электромеханические характеристики этого устройства.

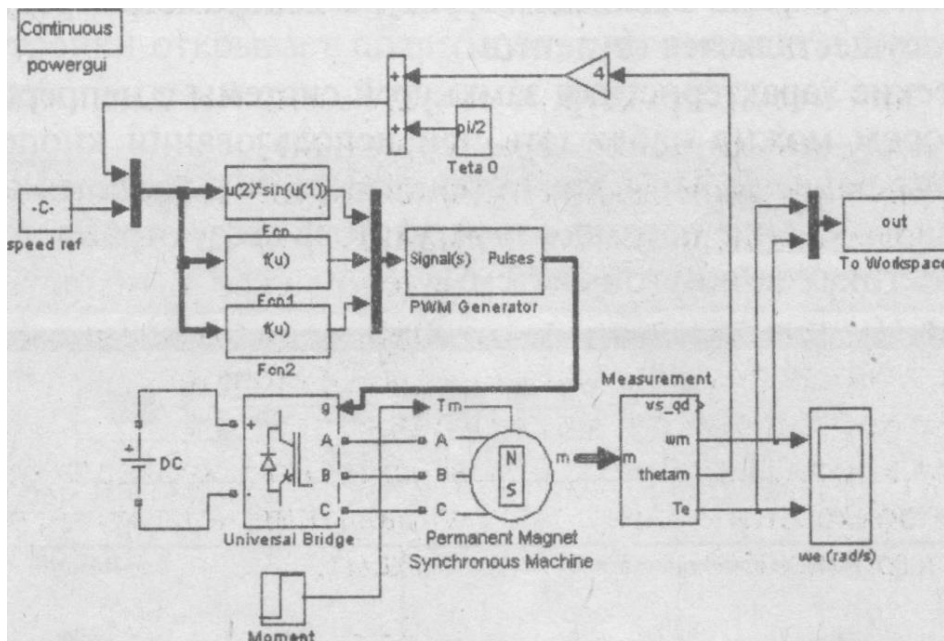


Рис. 1.5. Виртуальная модель вентильного двигателя со структурно-функциональной моделью управления

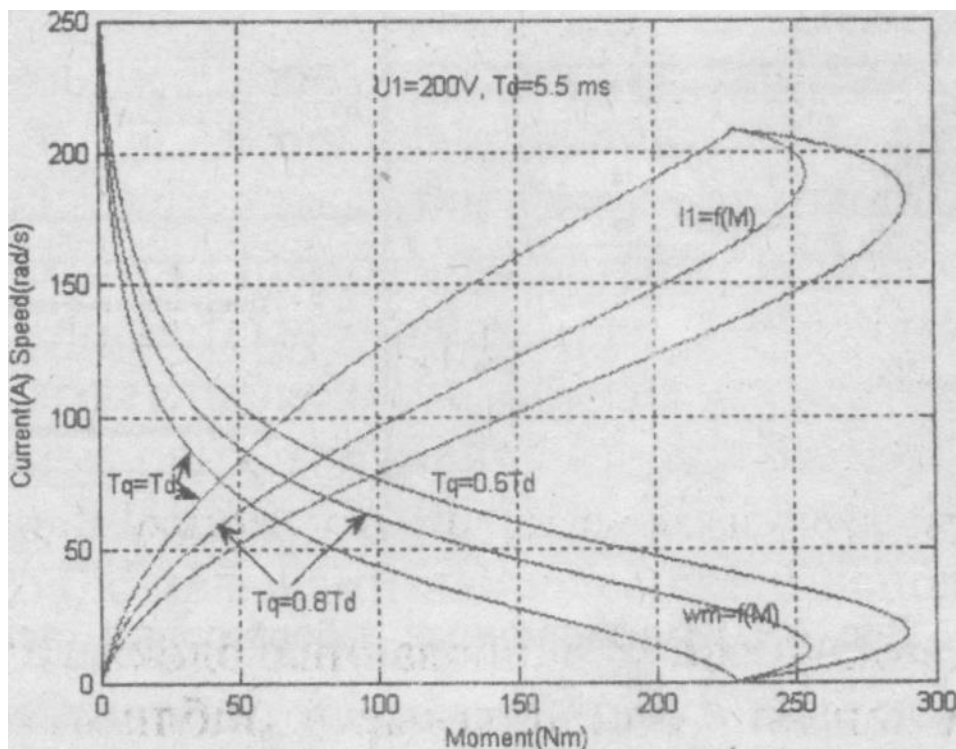


Рис. 1.6. Электромеханические характеристики в вентильном двигателе

Имитационный лабораторный стенд представляет собой проект, состоящий из значительного количества взаимосвязанных файлов, разработанных в среде Matlab- Simulink с использованием графического интерфейса пользователя (GUI - Graphical User Inteface). Разработка имитационного лабораторного стенда требует много времени, но значительно облегчает выполнение лабораторной ра-

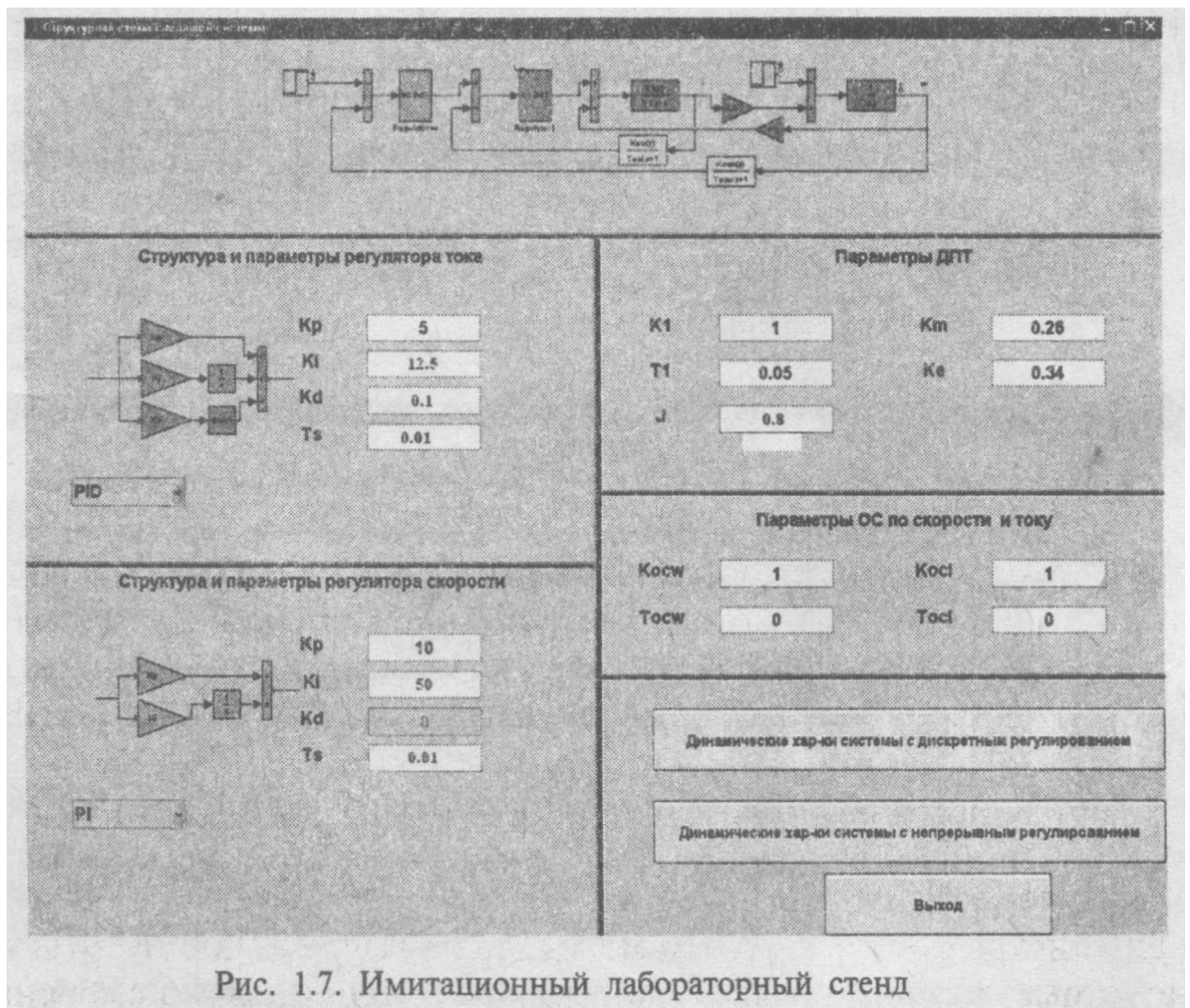
боты студента. Такие стенды полностью имитирует реальные лабораторные установки и могут быть рекомендованы в курсах, где не требуется изучения вопросов моделирования.

На рис. 1.7 показан имитационный лабораторный стенд для проектирования непрерывных и цифровых регуляторов в электроприводе постоянного тока.

Стенд состоит из 7 панелей. На верхней панели представлена структурная схема электропривода, регуляторы в котором требуется синтезировать. В правой части экрана задаются (преподавателем) параметры неизменной части - ДПТ и звеньев в цепи обратных связей.

В левой части экрана вводятся структура и параметры регуляторов (синтез регуляторов осуществляется студентом).

Динамические характеристики замкнутой системы с непрерывным и цифровым регулятором можно наблюдать при использовании кнопок, помещенных справа на двух панелях. При этом стенд позволяет работать в интерактивном режиме, когда изменение параметров регулятора сразу отражается на динамических характеристиках замкнутой системы.



Лекция

Тема 2.1.2. Пакет Simulink – визуальная среда проектирования мехатронных систем

ВОПРОСЫ

1. Общие вопросы создания моделей в пакете Simulink.
 - Обзорщик разделов библиотек в пакете Simulink.
 - Создание модели.
2. Установка параметров расчета и его выполнение.
 - Установка параметров обмена с рабочей областью.
 - Выполнение расчета.

ЛИТЕРАТУРА

2. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-БЕК, 2008. – 368 с.
- 1. Общие вопросы создания моделей в пакете Simulink**

а. Обзорщик разделов библиотек в пакете Simulink

Библиотека Simulink представляет собой набор визуальных блоков, используя которые можно исследовать практически любую мехатронную систему. Практически для всех блоков существует возможность настройки параметров. Параметры настройки отражаются в полях окна настройки выбранного блока. Кнопка Help в окне настройки открывает подробную информацию о блоке и его параметрах настройки.

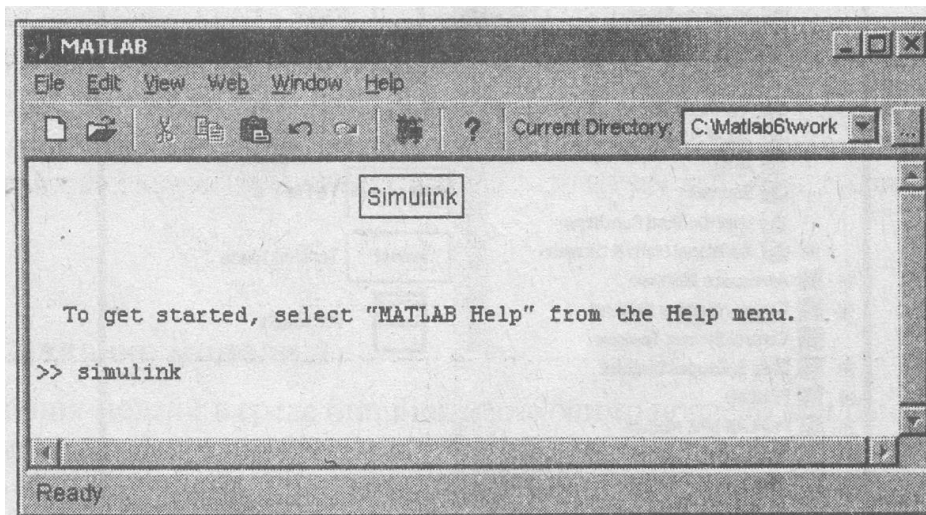


Рис. 2.1. Основное окно программы Matlab

Для запуска программы необходимо предварительно запустить пакет MATLAB. Основное окно пакета MATLAB показано на рис. 2.1. Там же показана подсказка, появляющаяся в окне при наведении указателя мыши на ярлык Simulink панели инструментов. Запуск программы Simulink приводит к открытию окна обзорщика разделов библиотеки Simulink (рис. 2.2).

Окно обзорщика разделов библиотек содержит следующие элементы:

- Заголовок, с названием окна — SimulinkLibraryBrowser.
- Меню, с командами File, Edit, View, Help.
- Панель инструментов, с ярлыками наиболее часто используемых команд.
- Окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном блоке.
- Список разделов библиотеки, реализованный в виде дерева.
- Окно содержимого раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков).
- Строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию.

На рис. 2.2 выделен раздел Sinks в основной библиотеке Simulink (в левой части окна) и показаны его блоки (в правой части окна).

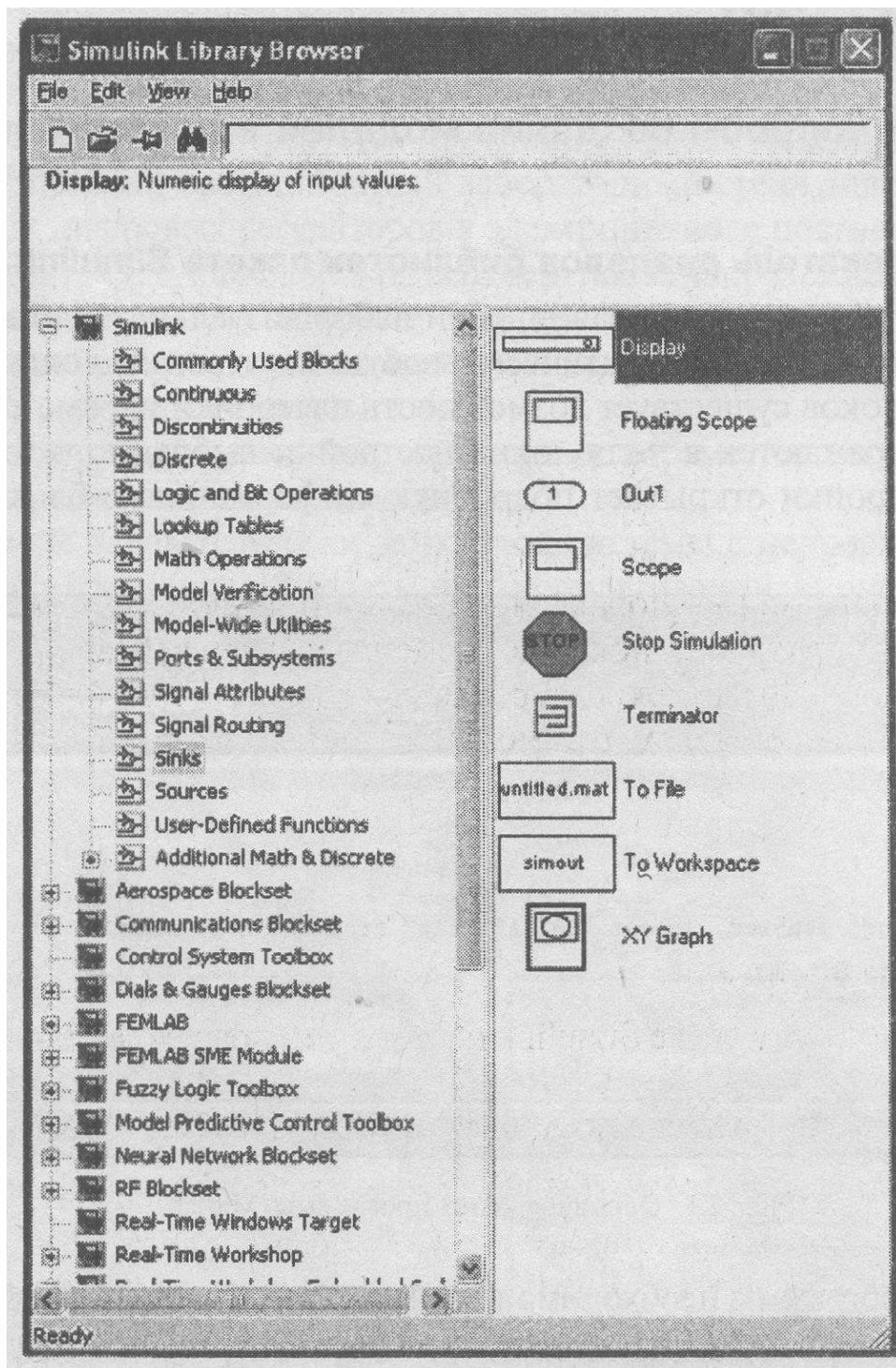


Рис. 2.2. Окно обозревателя разделов библиотеки Simulink

Библиотека Simulink содержит следующие основные разделы:

- ❖ *CommonlyUsedBlocks*— обычно используемые блоки.
- ❖ *Continuous*— линейные блоки.
- ❖ *Discontinuous*— нелинейные блоки.
- ❖ *Discrete*— дискретные блоки.

- ❖ *LogicandBitOperation* —логические и битовые операции.
- ❖ *LookupTables*— таблицы соответствия.
- ❖ *MathOperation*— математические операции.
- ❖ *Model Verification*— проверка модели.
- ❖ *Model- Wide Utilities* — таблицы.
- ❖ *Ports & Subsystems* —порты и подсистемы.
- ❖ *Signal Attributes* —параметры сигнала.
- ❖ *Signal Routing* -направление сигнала.
- ❖ *Sinks* — регистрирующие устройства.
- ❖ *Sources*— источники сигналов и воздействий.
- ❖ *User-DefinenFunctions*— функции пользователя
- ❖ *AditionMath&Diskrete*— дополнительные математические и дискретные блоки.

Список разделов библиотеки Simulinkпредставлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида.

При выборе соответствующего раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое (Рис.2.2).

Для работы с окном используются команды, собранные в меню. Меню обозревателя библиотек содержит следующие пункты:

- *File*(Файл) — Работа с файлами библиотек.
- *Edit*(Редактирование) — Добавление блоков и их поиск (по названию).
- *View*(Вид) — Управление показом элементов интерфейса.
- *Help*(Справка) — Вывод окна справки по обозревателю библиотек.

Для работы с обозревателем можно также использовать кнопки на панели инструментов.

1.2. Создание модели

Для создания модели в среде Simulinkнеобходимо последовательно выполнить ряд действий:

Создать новый файл модели с помощью команды *File/New/Model*, или используя кнопку *Q* на панели инструментов (здесь и далее с помощью символа «/» указаны пункты меню программы, которые необходимо последовательно выбрать для выполнения указанного действия). Вновь созданное окно модели показано на рис. 2.3.

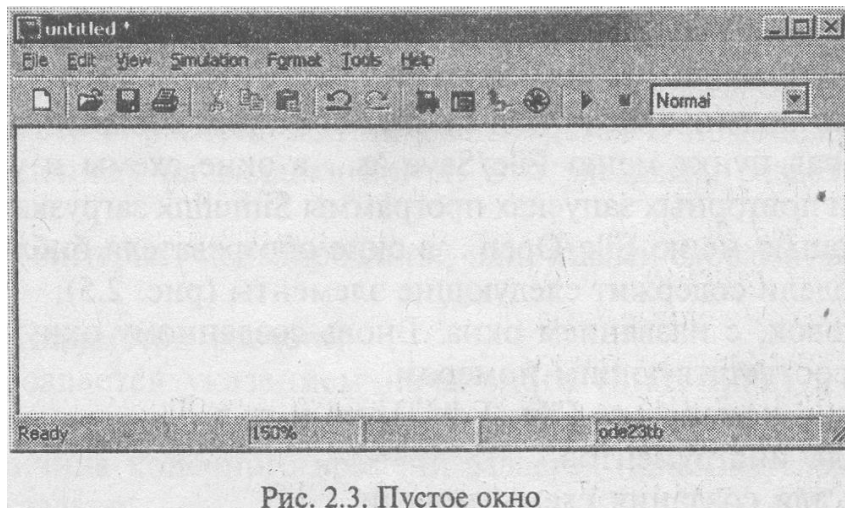


Рис. 2.3. Пустое окно

Расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки (Например, Sources— Источники). Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу «мыши» — «перетащить» блок в созданное окно. Клавишу мыши нужно держать нажатой.

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу «мыши»), а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре.

Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные программой «по умолчанию». Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей «мыши», указав курсором на изображение блока. Откроется окно настройки параметров данного блока. После внесения изменений нужно закрыть окно кнопкой ОК.

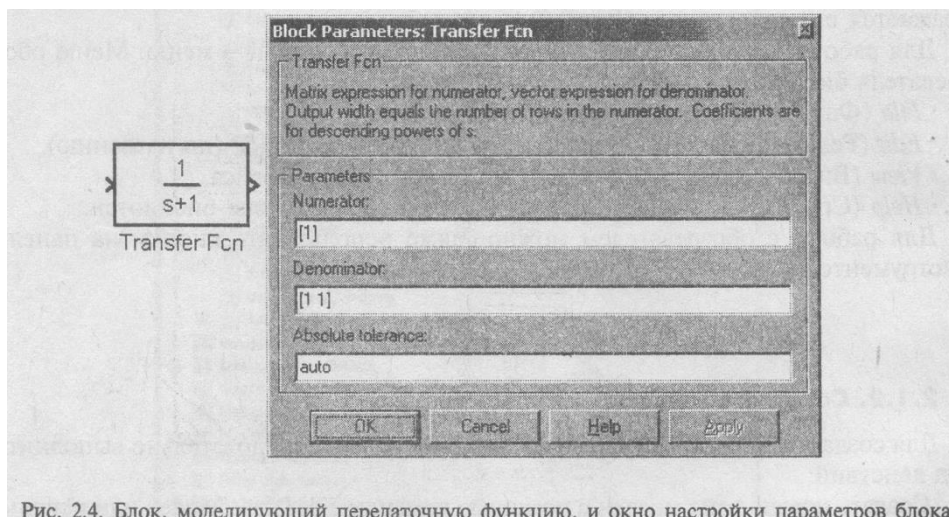


Рис. 2.4. Блок, моделирующий передаточную функцию, и окно настройки параметров блока

На рис. 2.4 в качестве примера показаны блок, моделирующий передаточную функцию, и окно настройки параметров данного блока.

После установки на схеме всех блоков из требуемых библиотек нужно выполнить соединение элементов схемы. Схема модели, в которой выполнены соединения между блоками, показана на рис. 2.5.

После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню *File/SaveAs...* в окне схемы и указав папку и имя файла. При повторных запусках программы Simulink загрузка схемы осуществляется с помощью меню *File/Open...* в окне обозревателя библиотеки.

Окно модели содержит следующие элементы (рис. 2.5):

1. Заголовок, с названием окна. Вновь созданному окну присваивается имя *Untitledc* соответствующим номером.
2. Меню с командами *File*, *Edit*, *View* и т. д.
3. Панель инструментов.
4. Окно для создания схемы модели.
5. Строка состояния, содержащая информацию о текущем состоянии модели.
6. Меню окна содержит команды для редактирования модели, ее настройки и управления процессом расчета, работы с файлами и т. п.:
7. *File*(Файл) - Работа с файлами моделей.
8. *Edit*(Редактирование) - Изменение модели и поиск блоков.
9. *View*(Вид) - Управление показом элементов интерфейса.
10. *Simulation*(Моделирование) - Задание настроек для моделирования и управление процессом расчета.
11. *Format*(Форматирование) - Изменение внешнего вида блоков и модели в целом.
12. *Tools*(Инструментальные средства) - Применение специальных средств для работы с моделью (отладчик, линейный анализ и т. п.)
13. *Help*(Справка) - Вывод окон справочной системы.

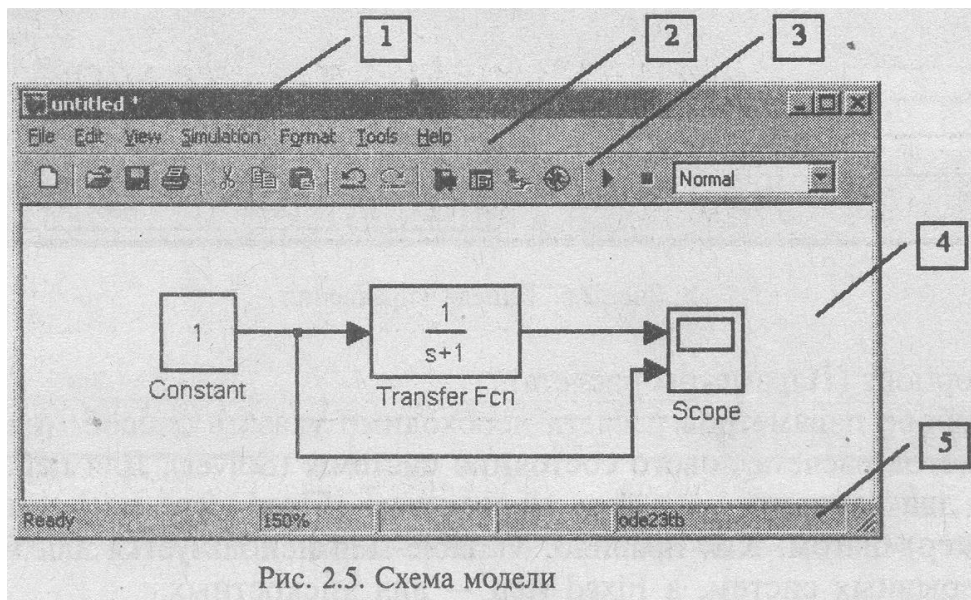


Рис. 2.5. Схема модели

3. Установка параметров расчета и его выполнение

Перед выполнением расчетов, необходимо предварительно задать параметры расчета. Задание параметров расчета выполняется в панели управления меню Simulation/ConfigurationParameters(вкладка Solver). Вид панели управления приведен на рис. 2.6. Ниже коротко описаны только те функции, которые используются в дальнейшем при моделировании устройств мехатроники.

Установка параметров расчета модели выполняется с помощью элементов управления, размещенных на вкладке Solver. Эти элементы разделены на две группы:

1. Simulationtime(Интервал моделирования, или, иными словами, время расчета),
2. Solver options (Параметры расчета).

Время расчета задается указанием начального (Starttime) и конечного (Stoptime) значений времени расчета. Начальное время, как правило, задается равным нулю. Величина конечного времени задается пользователем исходя из условий решаемой задачи.

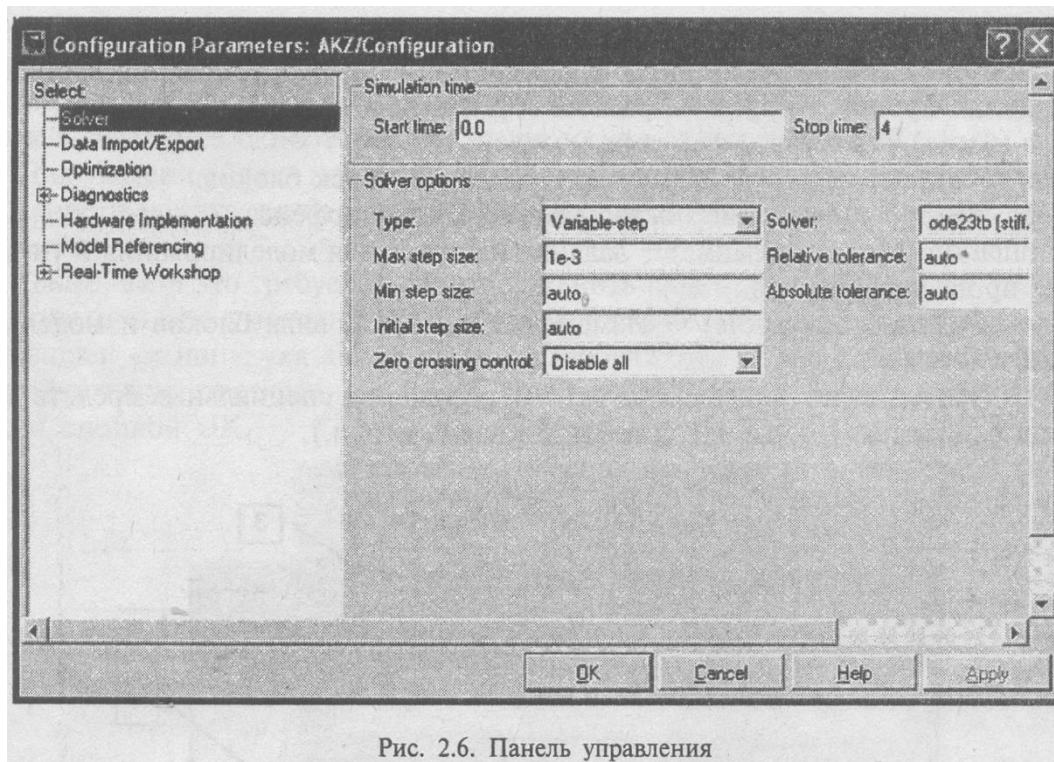


Рис. 2.6. Панель управления

При выборе параметров расчета необходимо указать способ моделирования (Type) и метод расчета нового состояния системы (Solver). Для параметра Type доступны два варианта — с фиксированным (Fixed-step) или с переменным (Variable-step) шагом. Как правило, Variable-step используется для моделирования непрерывных систем, а Fixed-step — для дискретных.

Список методов расчета нового состояния системы (Solver) содержит несколько вариантов. Эти методы различны для переменного (Variable-step) и для фиксированного (Fixed-step) шага времени, но, по сути, представляют собой процедуры решения систем дифференциальных уравнений. Величина шага моделирования по умолчанию устанавливается системой автоматически (auto). Требуемая величина шага может быть введена вместо значения auto. При выборе Variable-step в области появляются поля для установки трех параметров:

1. Maxstepsize- максимальный шаг расчета. По умолчанию он устанавливается автоматически (auto) и его значение в этом случае равно $(\text{StopTime} - \text{StartTime})/50$. Довольно часто это значение оказывается слишком большим, и наблюдаемые графики представляют собой ломаные (а не плавные) линии. В этом случае величину максимального шага расчета необходимо задавать явным образом.
2. Minstepsize—минимальный шаг расчета.
3. Initialstepsize— начальное значение шага моделирования.

При моделировании непрерывных систем с использованием переменного шага необходимо указать точность вычислений: относительную (Relativetolerance) и абсолютную (Absolutetolerance). По умолчанию они равны соответственно 10⁻³ и auto.

Установка параметров обмена с рабочей областью

Элементы, позволяющие управлять вводом и выводом в рабочую область MATLAB промежуточных данных и результатов моделирования, расположены на вкладке DataImport/Export(рис. 2.7).

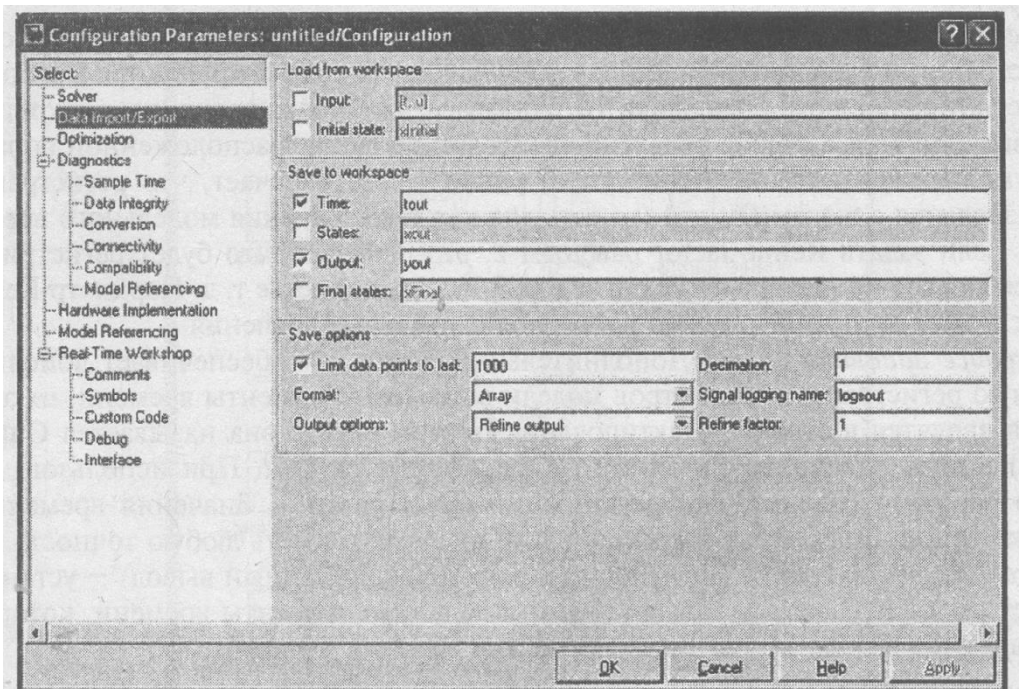


Рис. 2.7. Вкладка Workspace I/O диалогового окна установки параметров моделирования

Элементы вкладки разделены на 3 поля:

1. *Loadfromworkspace*(Загрузить из рабочей области). Если флажок Input(Входные данные) установлен, то в расположенном справа текстовом поле можно ввести формат данных, которые будут считываться из рабочей области Matlab. Установка флажка InitialState(Начальное состояние) позволяет ввести в связанном с ним текстовом поле имя переменной, содержащей параметры начального состояния модели. Данные, указанные в полях Inputи InitialState, передаются в исполняемую модель посредством одного или более блоков In(из раздела библиотеки Sources).
2. *Savetoworkspace*(Записать в рабочую область) — позволяет установить режим вывода значений сигналов в рабочую область MATLABи задать их имена.

3. *Saveoptions*(Параметры записи) — задает количество строк при передаче переменных в рабочую область. Если флажок *Limitrowstolast* установлен, то в поле ввода можно указать количество передаваемых строк (отсчет строк производится от момента завершения расчета). Если флажок не установлен, то передаются все данные. Параметр *Decimation*(Разряжение) задает шаг записи переменных в рабочую область. Параметр *Format*(формат данных) задает формат передаваемых в рабочую область данных. Доступные форматы *Array*(Массив), *Structure*(Структура), *StructureWithTime*(Структура с дополнительным полем — «время»).

Outputoptions(Параметры вывода) - задает настройки параметров вывода выходных сигналов моделируемой системы. Возможен выбор одного из трех вариантов:

- *Refineoutput*(Скорректированный вывод) — позволяет изменять дискретность регистрации модельного времени и тех сигналов, которые сохраняются в рабочей области Matlab с помощью блока To Workspace. Установка величины дискретности выполняется в строке редактирования *Refinefactor*, расположенной справа. По умолчанию значение *Refinefactor* равно 1, это означает, что регистрация производится с шагом $\Delta t = 1$ (то есть для каждого значения модельного времени:). Если задать *Refinefactor* равным 2, это означает, что будет регистрироваться каждое второе значение сигналов, 3 — каждое третье т. д. Параметр *Refinefactor* может принимать только целые положительные значения
- *Produceadditionaloutput*(Дополнительный вывод) — обеспечивает дополнительную регистрацию параметров модели в заданные моменты времени; их значения вводятся в строке редактирования (в этом случае она называется *Outputtimes*) в виде списка, заключенного в квадратные скобки. При использовании этого варианта базовый шаг регистрации (Δt) равен 1. Значения времени в списке *Outputtimes* могут быть дробными числами и иметь любую точность.
- *Producespecifiedoutputonly*(Формировать только заданный вывод) - устанавливает вывод параметров модели только в заданные моменты времени, которые указываются в поле *Outputtimes*(Моменты времени вывода).

Выполнение расчета

Запуск расчета выполняется с помощью выбора пункта меню Simulation/Start или инструмента ► на панели инструментов. Процесс расчета можно завершить досрочно, выбрав пункт меню Simulation/Stop или инструмент ■ . Расчет также можно остановить (Simulation/Pause) и затем продолжить (Simulation/Continue).

Далее рассмотрим средства пакета Simulink, позволяющие решить задачи анализа, синтеза, расчета и проектирования мехатронных систем. Отдельные библиотеки пакета можно открыть при помощи правой кнопки мышки. Ниже, при описании библиотек, рассматриваются те блоки, которые в дальнейшем используются при моделировании мехатронных устройств.

Лекция

Тема 2.1.4. Динамика объектов управления мехатронных систем

ВОПРОСЫ

1. Математическое описание непрерывных объектов управления в мехатронных системах.
2. Математическое описание дискретных объектов управления в мехатронных системах.

ЛИТЕРАТУРА

4. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

1. Математическое описание непрерывных объектов управления в мехатронных системах

Для того чтобы исследовать динамику объекта управления, необходимо располагать его математическим описанием, т. е. системой дифференциальных уравнений, характеризующих зависимости координат и внешних воздействий друг от друга.

Наиболее распространенными способами математического описания мехатронных систем являются:

- дифференциальные уравнения, записываемые в той или иной форме;
- уравнения состояний — система дифференциальных уравнений, записанных в нормальной форме Коши;

- передаточные функции;
- системные функции (амплитудно-частотные, фазо-частотные, амплитудно-фазовые характеристики);
- нули и полюсы передаточной функции.

Дифференциальное уравнение, описывающее линейную динамическую систему (или ее часть), в общем случае имеет вид:

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = b_m \frac{d^m u}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du}{dt} + b_0 u, \quad (3.1)$$

где u — входной сигнал, x — переменная состояния.

Это же уравнение в операторной форме можно записать в виде:

$$a_n s^n x + a_{n-1} s^{n-1} x + \dots + a_1 s x + a_0 x = b_n s^m u + b_{m-1} s^{m-1} u + \dots + b_1 s u + b_0 u, \quad (3.2)$$

где $s^k = \frac{d^k}{dt^k}$ — оператор дифференцирования. Из последнего уравнения находится отношение выходного сигнала к входному

$$w(s) = \frac{x}{u} = \frac{b_n s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}. \quad (3.3)$$

Выражение 3.3, совпадающее по форме с передаточной функцией, назовем операторной передаточной функцией. Заметим, что модели пакетов MATLAB-Simulink оперируют именно с операторным представлением дифференциальных уравнений.

(Пример: гл. 2. Рис. 2.21)

Уравнения состояний (система дифференциальных уравнений, записанных в нормальной форме Коши) имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} &= AX + BU, \\ Y &= CX + DU,\end{aligned}\tag{3.4}$$

где X — вектор состояния; U, Y — векторы входа и выхода системы; A — матрица коэффициентов, B — матрица управления, C — матрица выхода, D — матрица, характеризующая связь входного сигнала с выходным.

В частном случае, в простых системах, выход является скалярной величиной. В этом случае матрица C — это вектор-строка, а матрица X — вектор-столбец и их произведение дает скалярную величину.

(Пример: гл. 2 Рис. 2.20)

Передаточная функция (отношение преобразованного по Лапласу выходного сигнала к преобразованному по Лапласу входному сигналу), составленная по уравнению 3.1 записывается в виде:

$$W(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{b_n s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0},\tag{3.5}$$

где $s = a + j\omega$ — комплексная величина. Если принять $s = j\omega$, то получим системную функцию (амплитудно-фазовую характеристику).

$$H(j\omega) = \frac{X(j\omega)}{U(j\omega)} = \frac{b_n (j\omega)^m + b_{m-1} (j\omega)^{m-1} + \dots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + a_{n-1} (j\omega)^{n-1} + \dots + a_1 (j\omega) + a_0}.\tag{3.6}$$

Системная функция может быть записана в алгебраической или показательной форме как:

$$H(j\omega) = \text{Re}[H(j\omega)] + j\text{Im}[H(j\omega)] = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)},\tag{3.7}$$

$$\text{где } A(\omega) = \sqrt{\text{Re}[H(j\omega)]^2 + \text{Im}[H(j\omega)]^2}\tag{3.8}$$

амплитудно-частотная характеристика,

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}[H(j\omega)]}{\text{Re}[H(j\omega)]}\tag{3.9}$$

фазо-частотная характеристика.

Числитель и знаменатель передаточной функции (3.5) представляют собой полиномы переменной s . Корни полинома числителя обращают выражение в ноль и потому называются нулями (Zero), а корни полинома знаменателя обра-

щают выражение в бесконечность и называются полюсами (Pole) передаточной функции. Передаточная функция, записанная при использовании нулей (z) и полюсов (p), представляется в виде:

$$W(s) = K \frac{(s - z_m)(s - z_{m-1}) \cdots (s - z_1)}{(s - p_n)(s - p_{n-1}) \cdots (s - p_1)}, \quad (3.10)$$

где K — коэффициент усиления.

(Пример: гл. 2, Рис. 2.22)

2. Математическое описание дискретных объектов управления в мехатронных системах

В современных системах мехатроники для придания им заданных динамических свойств широко используются цифровые регуляторы, выполненные на микропроцессорах. При описании цифровых систем используются разностные уравнения. Разность первого порядка определяется по выражению

$$\Delta x[nT] = \frac{x[nT] - x[(n-1)T]}{T}$$

и переходит в производную при $T \rightarrow 0$, $(\Delta x[nT])_{T \rightarrow 0} = \frac{dx}{dt}$

Значение $x[(n-1)T]$ является значением, которое вычислено микропроцессором на предшествующем дискретном шаге и сохранено (задержано) в памяти.

Разность второго порядка определяется по выражению

$$\begin{aligned} \Delta^2 x(nT) &= \frac{\Delta x[nT] - \Delta x[(n-1)T]}{T} = \\ &= \frac{x[nT] - x[(n-1)T] - x[(n-1)T] + x[(n-2)T]}{T^2} = \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{T^2} (x[nT] - 2x[(n-1)T] + x[(n-2)T])$$

и переходит во вторую производную при $T \rightarrow 0$, $(\Delta^2 x[nT])_{T \rightarrow 0} = \frac{d^2 x}{dt^2}$.

Разность третьего порядка

$$\Delta^3 x(nT) = \frac{1}{T^3} (x[nT] - 3x[(n-1)T] + 3x[(n-2)T] - x[(n-3)T]).$$

При этом дифференциальное уравнение (3.1) n -ого порядка преобразуется в разностное уравнение k -ого порядка.

$$A_0x[nT] + A_1x[(n-1)T] + A_2x[(n-2)T] + \dots + A_kx[(n-k)T] = \quad (3.11) \\ = B_0u[nT] + B_1u[(n-1)T] + \dots + B_lu[(n-l)T].$$

Значение аппроксимирующей функции $x[(n-1)T]$ задержано во времени относительно значения $x[nT]$ на период дискретизации T . Аналогично значение $x[(n-k)T]$ задержано относительно $x[nT]$ на k периодов дискретизации.

Обозначив оператор задержки на периоде дискретизации через z^{-1} , а на k периодах — через z^{-k} , выразим через оператор z разности из уравнения (3.11)

$$A_0x[nT] + A_1x[nT] \cdot z^{-1} + A_2x[nT] \cdot z^{-2} + \dots + A_kx[nT] \cdot z^{-k} = \quad (3.12) \\ = B_0u[nT] + B_1u[nT] \cdot z^{-1} + B_2u[nT] \cdot z^{-2} + \dots + B_lu[nT] \cdot z^{-l}$$

Из уравнения (3.12), аналогично тому, как это делалось для непрерывных систем, найдем операторную передаточную функцию дискретной системы.

$$D(z) = \frac{x[nT]}{u[nT]} = \frac{A_0 + A_1z^{-1} + A_2z^{-2} + \dots + A_kz^{-k}}{B_0 + B_1z^{-1} + B_2z^{-2} + \dots + B_lz^{-l}}. \quad (3.13)$$

Лекция

Тема 2.1.6. Оценка качества и требования к динамическим характеристикам мехатронных систем

ВОПРОСЫ

1. Оценки качества по показателям переходного процесса в системе.
2. Оценки качества, основанные на анализе частотных характеристик.
3. Оценки качества, основанные на анализе распределения корней характеристического уравнения.
4. Интегральные оценки качества

ЛИТЕРАТУРА

5. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-БЕК, 2008. – 368 с.

Задача синтеза регулятора динамической системы включает выбор структуры и параметров регулятора при известных параметрах объекта и заданных динамических характеристиках замкнутой системы.

Заданием регулятора в этой системе является обеспечение заданных динамических характеристик.

Для оценки качества замкнутых систем разработаны и используются различные критерии (стандарты). Эти критерии качества можно поделить на несколько групп:

1. Критерии, связанные с оценкой параметров переходного процесса (временные критерии качества);
2. Критерии, связанные с оценкой параметров по частотным характеристикам (частотные критерии качества);
3. Критерии, связанные с оценкой пространственных параметров (нулей и полюсов) передаточной функции;
4. Интегральные критерии качества.

1. Оценки качества по показателям переходного процесса в системе

Оценка качества замкнутой системы по характеру переходного процесса осуществляется с помощью непосредственных показателей, таких как:

- 1) время первого согласования — время, за которое регулируемая величина достигнет заданной;
- 2) время переходного процесса — время, за которое регулируемая величина достигнет 0,95—0,97 от установившегося значения;
- 3) максимальное перерегулирование, которое обычно определяется в процентах по выражению:

$$\sigma = \frac{x_{\text{макс}} - x_{\text{уст}}}{x_{\text{уст}}} 100\%$$

Чаще всего в замкнутых системах допускается одно перерегулирование. Если система допускает несколько перерегулирований, то оговаривается число полных периодов и логарифмический декремент затухания. Критерии переходного процесса демонстрирует рис. 3.21.

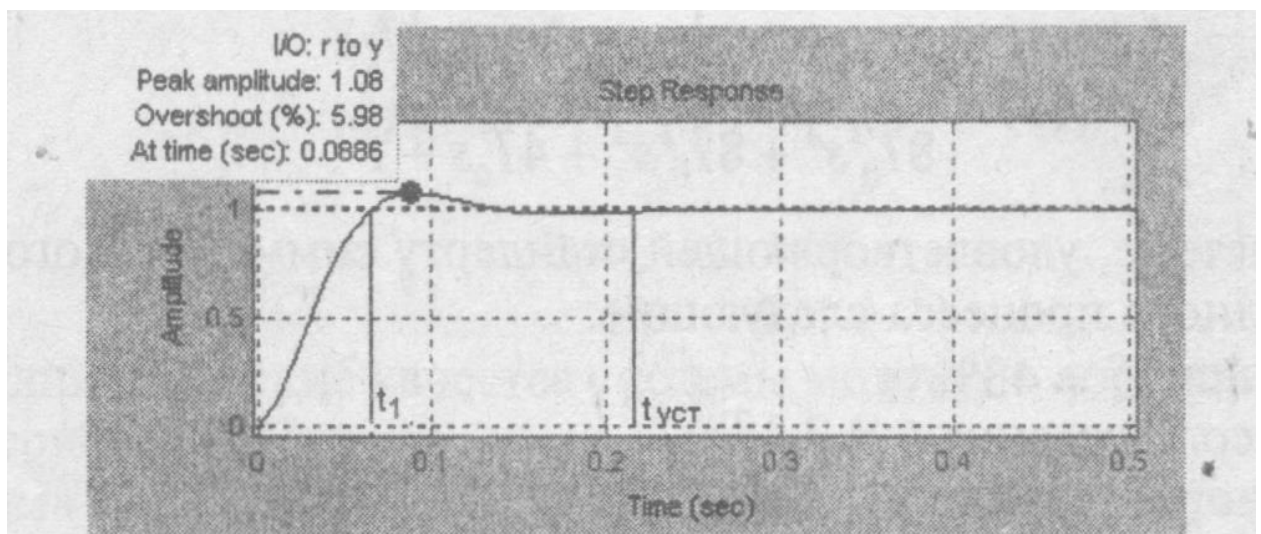


Рис. 3.21. Переходной процесс в замкнутой системе

В качестве стандартов при синтезе регулятора в основном используются два:

1. модульный (технический) оптимум.
2. симметричный оптимум.

Передаточная функция разомкнутого контура в системе второго порядка, соответствующая модульному (техническому) оптимуму имеет вид:

$$W_{PA3}(s) = \frac{1}{2T_0s(T_0s+1)}, \quad (3.27)$$

где $T_0 \ll 1$ некомпенсированная постоянная времени объекта. Передаточная функция замкнутой системы, соответствующая модульному (техническому), оптимуму

$$W_3(s) = \frac{1}{2T_0^2s^2 + 2T_0s + 1}. \quad (3.28)$$

При этом в замкнутой системе второго порядка, удовлетворяющей стандарту технического оптимума, параметры переходного процесса следующие:

- перерегулирование $\delta = 4,3\%$;
- время первого согласования $t_1 = 4,71T_0$;
- время переходного процесса $t_{уст} = 8,4T_0$.

Передаточная функция замкнутой системы, удовлетворяющей стандарту технического оптимума, достаточно точно аппроксимируется звеном первого порядка.

$$W_3(s) \approx \frac{1}{2T_0s + 1}, \quad (3.29)$$

что часто используется при синтезе регуляторов в многоконтурных системах.

Передаточная функция разомкнутого контура в системе второго порядка, соответствующая симметричному оптимуму имеет вид:

$$W_{PA3}(s) = \frac{4T_0s + 1}{8T_0^2s^2(T_0s + 1)} \quad (3.30)$$

Передаточная функция замкнутой системы, соответствующая симметричному, оптимуму имеет вид:

$$W_3(s) = \frac{4T_0s + 1}{8T_0^3s^3 + 8T_0^2s^2 + 4T_0s + 1}. \quad (3.31)$$

В замкнутой системе, удовлетворяющей стандарту симметричного оптимума, параметры переходного процесса следующие:

- перерегулирование $\delta = 43\%$;
- время первого согласования $t_1 = 3,1T_0$;
- время переходного процесса $t_{уст} = 16,5T_0$.

2. Оценки качества, основанные на анализе частотных характеристик

Наибольшее применение получили амплитудно-фазовые характеристики (АФХ) разомкнутых систем. По ним можно определить такие косвенные показатели качества, как запасы устойчивости по амплитуде и фазе и показатель колебательности.

Запасы устойчивости по амплитуде и фазе — это характеристики, оценивающие близость расположения АФХ к критической точке $(-1, j0)$. От этого зависит способность системы оставаться устойчивой при появлении отклонений в параметрах системы. Вместе с тем от этого зависит качество переходных процессов: если АФХ проходит вблизи точки $(-1, j0)$, то процессы будут сильно колебательными с большими перерегулированиями; если же АФХ излишне удалена от критической точки, то переходные процессы могут оказаться слишком затянутыми.

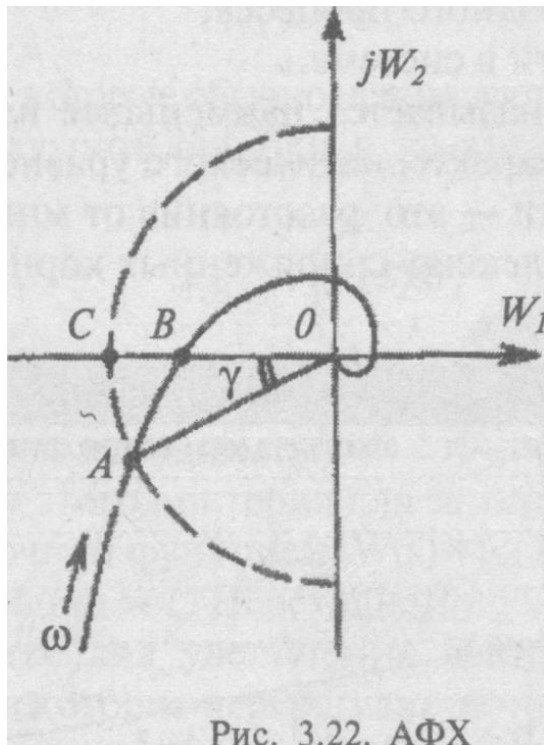
Запас устойчивости по амплитуде - число, показывающее, во сколько раз может быть увеличен коэффициент усиления разомкнутой системы, прежде чем замкнутая система выйдет на границу устойчивости.

Запас устойчивости по фазе — число, характеризующее предельный угол поворота АФХ по часовой стрелке до выхода системы на границу устойчивости. Поворот происходит, например, в результате увеличения инерционности. В соответствии с рис. 3.22 запасы устойчивости определяются соотношениями:

$$\Delta k = \frac{1}{OB}, \quad \Delta \varphi = \angle AOC$$

Если нет специальных требований, то рекомендуется иметь:

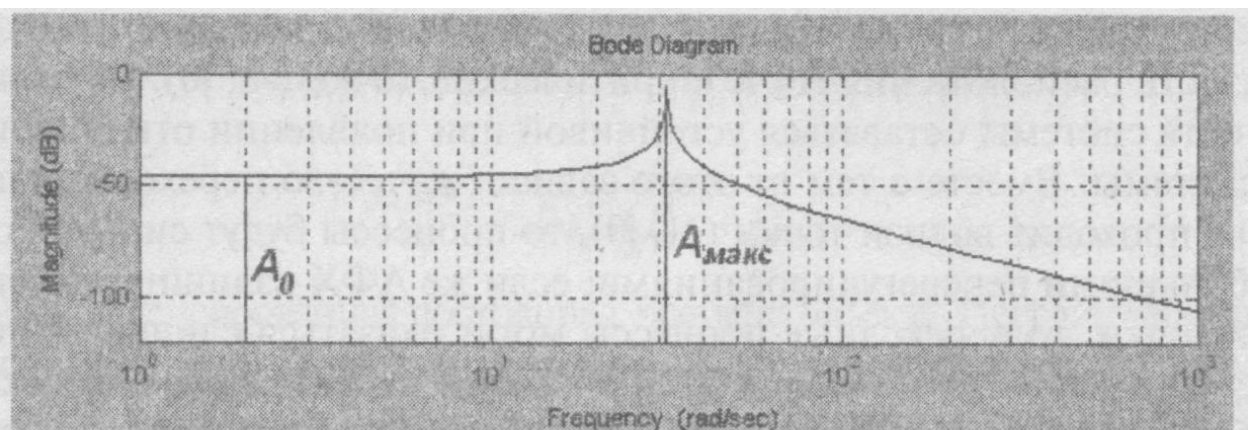
$$\Delta k = 2 - 3, \quad \Delta \varphi = 30^\circ - 50^\circ .$$



Оценить динамические качества системы можно по логарифмическим частотным характеристикам.

Показатель колебательности. M — косвенная оценка, характеризующая возможные перегуливания. Он представляет собой отношение максимального значения ординаты на амплитудно-частотной характеристике замкнутой системы по задающему воздействию к значению ординаты при $\omega = 0$,

т. е.
$$M = \frac{A_{\text{макс}}}{A_0} \quad (\text{рис. 3.23}).$$



Рекомендуется иметь значение показателя колебательности в диапазоне $M = 1,3—1,5$, если нет специальных требований.

3. Оценки качества, основанные на анализе распределения корней характеристического уравнения

Корни характеристического уравнения несут всю информацию о системе. По положению корней характеристического уравнения определяют:

1. степень устойчивости системы;
2. приближенно время переходного процесса;
3. показатель колебательности в системе.

Степенью устойчивости h называется наименьшее из абсолютных значений вещественных частей корней характеристического уравнения устойчивой системы. На комплексной плоскости — это расстояние от мнимой оси до ближайшего к ней корня или пары комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения (рис.3.24).

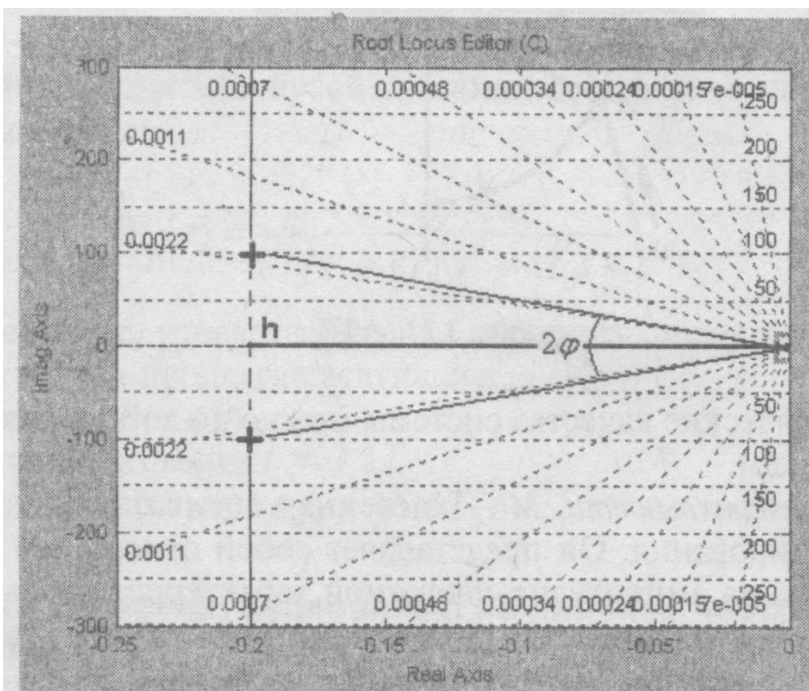


Рис. 3.24. Корни системы на комплексной плоскости

Величина степени устойчивости служит мерой быстроты затухания переходного процесса. Приблизённо время переходного процесса в секундах можно вычислить по формуле $t_{уст} \approx \frac{3}{h}$, независимо от того, являются ли корни вещественными или комплексными величинами.

Показатель колебательности в системе находится из выражения $\xi = \cos \varphi$ (рис. 3.24), где 2φ — угол между лучами на комплексной плоскости, внутри которых расположены все корни характеристического уравнения системы.

4. Интегральные оценки качества

Интегральные оценки — это косвенные показатели качества переходных процессов, они оценивают отклонение временных характеристик от заданной формы. Обычно рассматривают переходные характеристики — реакции на единичные

ступенчатые внешние воздействия. Идеальной формой для выходного сигнала считается ступенчатый процесс или же экспонента с заданной постоянной времени. Интегральные оценки применяются как для целей анализа, так и для целей синтеза автоматических систем. В последнем случае оптимальными считаются такие системы, которые обеспечивают минимум той или иной интегральной оценки.

Рассмотрим критерии, которые обычно используются при оценке динамики систем.

1. Интеграл от абсолютной ошибки в замкнутой системе (*IEA — Integral of Absolute value of Error*):

$$I_{IEA} = \int_0^{\infty} e(t) dt, \quad (3.32)$$

где $e(t)$ — ошибка регулирования (разность между установившимися и текущими значениями регулируемой координаты).

В случае применения этого критерия для замкнутой системы управления второго порядка с передаточной функцией $W(s) = 1/(1 + 2\zeta s + s^2)$ получим критический коэффициент затухания $\zeta = 1$. Переходной процесс при этом является аperiodическим. На практике для увеличения быстродействия системы обычно приходится допустить некоторое перерегулирование.

2. Критерий произведения времени и абсолютной ошибки (*ITAE — Integral of Time multiplied by Absolute value of Error*):

$$I_{ITEA} = \int_0^{\infty} t \cdot e(t) dt. \quad (3.33)$$

Умножение на время подинтегральной функции приводит к появлению некоторой колебательности системы. Этот критерий нашел широкое применение на практике, т. к. обеспечивает компромисс между некоторым перерегулированием и временем регулирования. Для замкнутой системы управления, которая описы-

вается передаточной функцией n -ого порядка $W(s) = \frac{b_0}{P(s)}$ оптимальным в соответствии с критерием ИТАЕ полином знаменателя в зависимости от его порядка будет:

$$\begin{aligned} P_1(s) &= s + \omega_0; \\ P_2(s) &= s^2 + 1,41\omega_0 s + \omega_0^2; \\ P_3(s) &= s^3 + 1,75\omega_0 s^2 + 2,1\omega_0^2 s + \omega_0^3; \\ P_4(s) &= s^4 + 2,1\omega_0 s^3 + 3,4\omega_0^2 s^2 + 2,7\omega_0^3 s + \omega_0^4. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Критерий ИТАЕ, использованный для оптимизации системы второго порядка, обеспечивает коэффициент затухания $\xi = 0,707$ и перерегулирование $\sigma = 4\%$, что соответствует оптимуму по модулю.

3. Квадратичный интеграл от ошибки в замкнутой системе (*ISE* — *Integral Squared Error*), получивший наибольшее распространение на практике:

$$I_{ISE} = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt. \quad (3.35)$$

Если параметры системы выбраны в соответствии с критерием ISA, то в системе наблюдается повышенная колебательность. Для замкнутой системы второго порядка этот критерий обеспечивает затухание $\xi = 0,5$ и перерегулирование $\sigma = 16\%$.

Для уменьшения колебательности в системе используется модифицированный квадратичный критерий.

4. Модифицированный квадратичный критерий (*ITAE* — *Integral of Time multiplied by Absolute value of Error*):

Этот критерий записывается в виде:

$$I_{ITSE} = \int_0^{\infty} t \cdot [e(t)]^2 dt. \quad (3.36)$$

Критерий ИТАЕ позволяет несколько увеличить коэффициент затухания и уменьшить перерегулирование по сравнению с критерием ISA.

Лекция

Тема 2.1.7-8. Регуляторы в мехатронных системах

ВОПРОСЫ

1. Методика синтеза регуляторов в мехатронной системе.
2. Синтез непрерывных регуляторов методом корневого годографа в пакете Control System Toolbox.

3. Синтез непрерывных регуляторов во временной и частотной области в подчиненных структурах.

ЛИТЕРАТУРА

6. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

1. Методика синтеза регуляторов в мехатронной системе

Проектирование регулятора для мехатронной системы включает в себя две основные задачи:

- выбор места включения регулятора;
- выбор типа и расчет параметров регулятора, придающего системе заданные динамические свойства.

Как первая, так и вторая задача не имеет строгой математической формализации. Их решения базируются на опыте проектирования различных систем для различных применений.

Требования высокой точности регулирования и высокого быстродействия, которые предъявляются к современным системам мехатроники, обуславливают применение замкнутых систем. Только замкнутые системы позволяют осуществить реализацию двух основных принципов:

1. Регулируемая величина на выходе (скорость, угол, момент и т. д.) должна по возможности точнее повторять задающий (входной) сигнал;
2. Регулируемая величина на выходе по возможности не должна зависеть от возмущающих воздействий. Такими возмущающими воздействиями могут быть напряжение питания, температура, момент нагрузки, временные зависимости параметров и т. д.

Таким образом, основным принципом управления является принцип обратной связи, позволяющий осуществить контроль качества регулирования по отклонению управляемого параметра от заданного.

Регуляторы мехатронных систем являются цифровыми, т. к. они в обязательном порядке содержат микроконтроллер или компьютер с платами расширения. При цифровой реализации регулятора связь между непрерывным объектом управления и регулятором осуществляется преобразователями аналоговых величин в цифровой код (АЦП) и цифрового кода в аналоговую величину (ЦАП). При этом сигналы с

АЦП и сигналы, поступающие на ЦАП, обычно квантуются синхронно с периодом дискретизации T . Функциональная схема системы приведена на рис. 3.25 а.

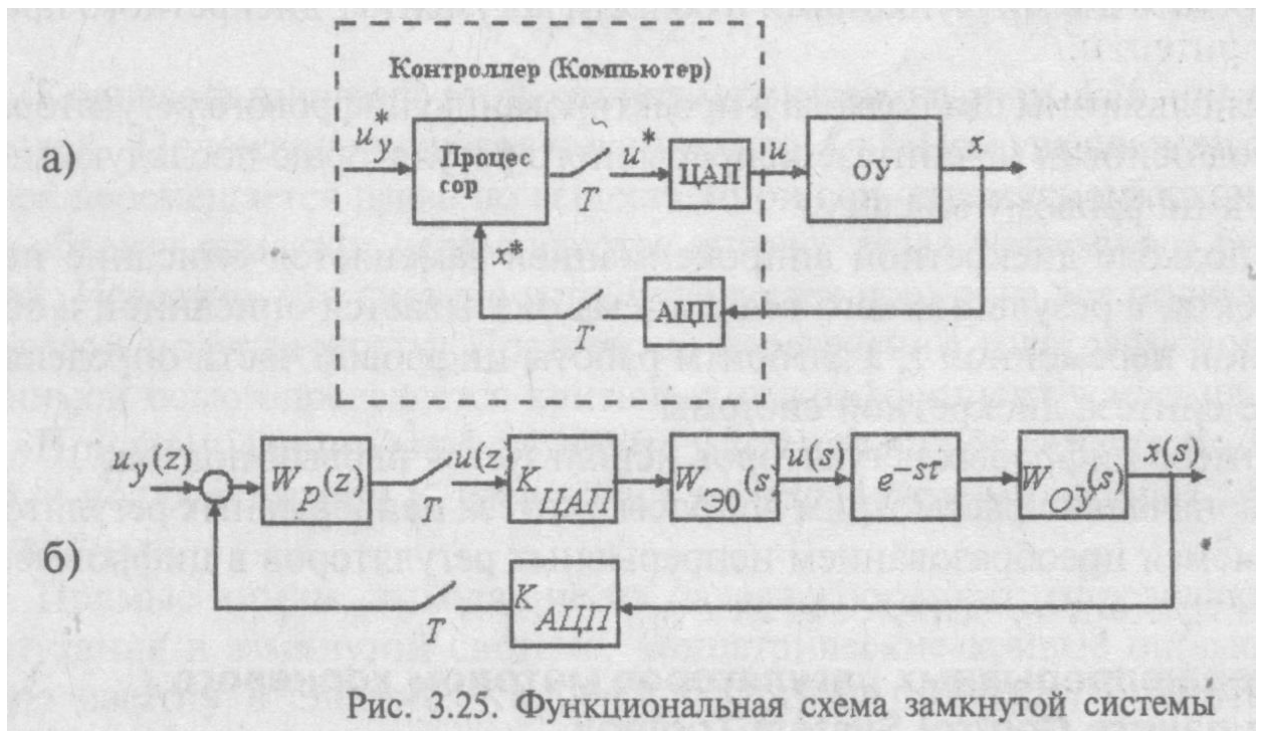


Рис. 3.25. Функциональная схема замкнутой системы

Входной сигнал u_y и сигнал, пропорциональный истинному значению регулируемой величины x^* в цифровой форме, обрабатываются с помощью компьютера (микропроцессора), выполняющего роль регулятора. Цифровой сигнал на выходе процессора u^* преобразуется ЦАП, благодаря чему аналоговый сигнал на входе непрерывного объекта u остается постоянным в течение периода дискретизации.

Сигналы АЦП и ЦАП квантованы по уровню, вследствие чего системы управления непрерывными объектами с компьютером в контуре регулирования относятся в общем случае к классу дискретных нелинейных систем. Однако, если разрядность преобразователей достаточно велика, то можно пренебречь квантованием сигналов по уровню, заменив нелинейные статические характеристики АЦП и ЦАП линейными и введя коэффициенты передачи

$K_{\text{АЦП}} = \frac{1}{\Delta}$, где Δ — приращение аналоговой величины x на входе АЦП, соответствующее изменению выходной величины x^* на одну дискретную единицу;

$K_{\text{ЦАП}} = \Delta_1$, где Δ_1 — приращение выходного напряжения ЦАП при изменении на одну дискретную единицу входного сигнала u^* . Тогда математическое описание всей системы с компьютером в контуре регулирования может быть представлено линеаризованной структурной схемой на рис. 3.25. б, на которой обозначено:

$W_p(z)$ — передаточная функция цифрового регулятора при описании алгоритма его работы в области комплексной, переменной z ;

$W_{\text{ЭО}}(s)$ — передаточная функция экстраполятора нулевого порядка;

$W_{\text{ОУ}}(s)$ — передаточная функция объекта управления. В схему введено звено чистого запаздывания $e^{-s\tau}$, учитывающее, что на вычисление управляющего воздействия в соответствии с передаточной функцией регулятора $W_p(z)$ процессор затрачивает время τ .

Таким образом, в мехатронной системе объект управления описывается системой дифференциальных уравнений или передаточными функциями в области комплексного аргумента s , а алгоритм работы компьютера — разностными уравнениями или передаточными функциями в области аргумента z дискретного преобразования.

Могут быть использованы два подхода к проектированию цифрового регулятора.

Первый подход основан на синтезе непрерывного регулятора с последующим пересчетом его к цифровому аналогу.

При втором подходе дискретной аппроксимацией заменяется описание непрерывного объекта, в результате чего вся система оказывается описанной в области комплексной переменной z , а алгоритм работы цифровой части определяется в результате синтеза дискретной системы.

Далее при синтезе цифровых регуляторов используется первый подход.

Поэтому первоначально рассмотрим вопросы синтеза непрерывных регуляторов, а затем займемся преобразованием непрерывных регуляторов в цифровые.

2. Синтез непрерывных регуляторов методом корневого годографа в пакете Control System Toolbox

Метод корневого годографа широко используется для анализа и синтеза динамических систем, он достаточно подробно описан в литературе [21]. Ниже очень коротко рассмотрены его некоторые свойства.

Определение. Корневой годограф — это траектория корней характеристического уравнения (полюсов передаточной функции) замкнутой системы при изменении какого-либо параметра системы. Обычно при построении корневого годографа варьируемым параметром служит коэффициент усиления регулятора.

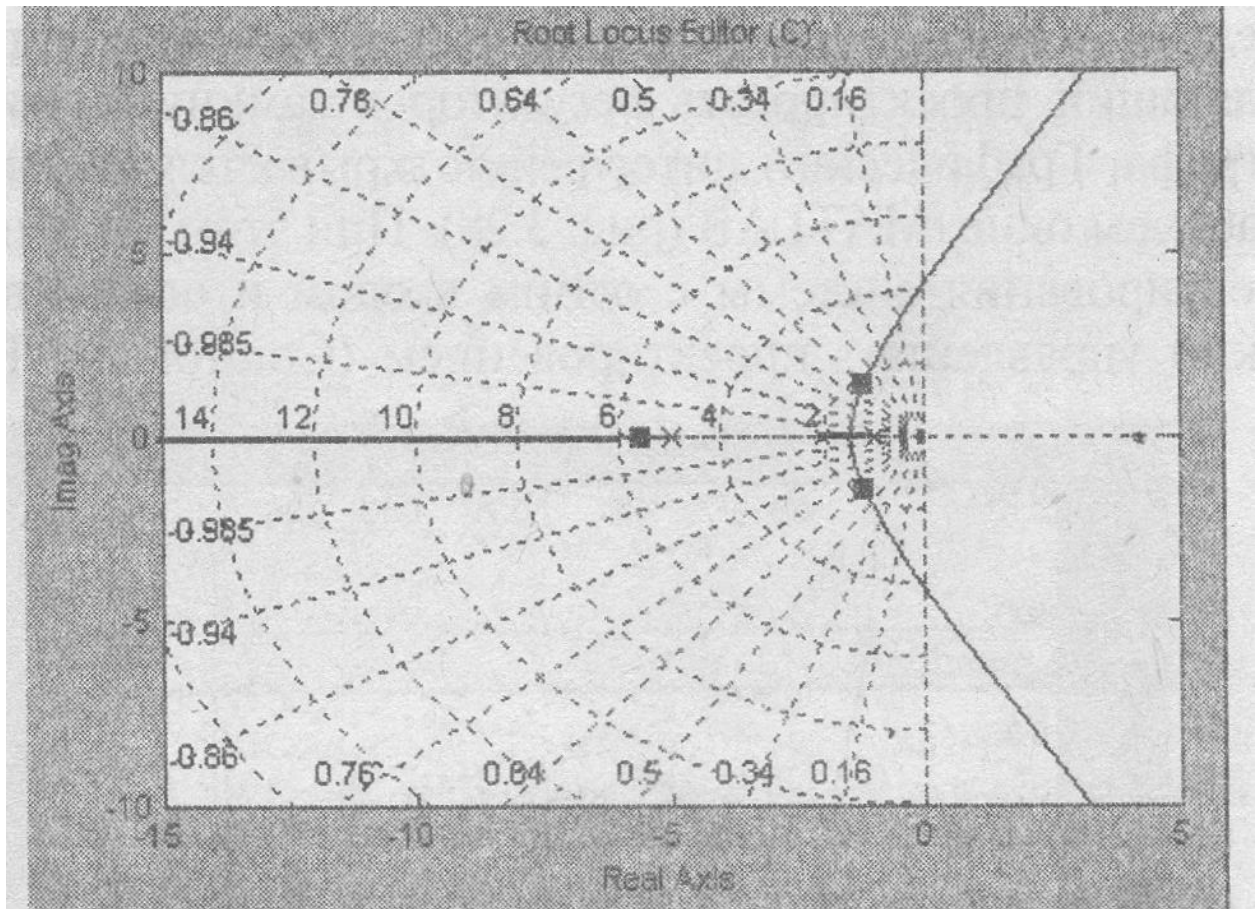


Рис. 3.26. Корневой годограф

Пример 3.4. Рассмотрим пример замкнутой системы с единичной обратной связью, в которой передаточные функции объекта регулирования и регулятора имеют вид:

$$W_o(s) = \frac{2}{s^2 + 3s + 2} \quad W_p(s) = \frac{K}{2s + 10}$$

Корневой годограф этой системы показан на рис. 3.26, он состоит из трех ветвей. Положение полюсов показано для $K=1$. При увеличении K полюс регулятора перемещается влево по вещественной оси, стремясь к бесконечности. Полюса объекта при этом перемещаются вправо, делая систему все более колебательной. Известно, что система устойчива до тех пор, пока все полюса располагаются в левой полуплоскости. Поэтому на пересечении годографа полюсов объекта с мнимой осью определяется критический коэффициент усиления регулятора.

При уменьшении коэффициента усиления полюс регулятора сдвигается вправо, а полюса объекта — влево вниз, переходя от комплексных значений к вещественным.

Прямые линии, выходящие из начала координат, определяют коэффициент затухания в замкнутой системе, concentрические кривые определяют собственную частоту в системе. Корневой годограф позволяет оценить динамические характеристики замкнутой системы. Кроме того, корневой годограф позволяет синтезировать параметры регулятора. При синтезе параметров регулятора следует использовать два основных положения:

1. Добавление нуля в передаточную функцию регулятора смещает годограф влево;
2. Добавление полюса в передаточную функцию регулятора смещает годограф вправо.

На рис. 3.27 показан корневой годограф рассмотренной системы при добавлении нуля в начало координат ($z=0$).

В пакете Control System Toolbox для синтеза регуляторов имеются удобные графические средства **rltool** и **sisotool**. Функция **rltool** открывает графический интерфейс, позволяющий проектировать регулятор в замкнутой системе методом корневого годографа. Графический интерфейс открывается при выполнении команды **rltool** в рабочем окне MATLAB (рис. 3.28). При этом открывается два окна: 1. Окно проектирования системы с одним входом и одним выходом (SISO Design). 2. Окно управления проектированием (Control and Estimation Tools Manager).

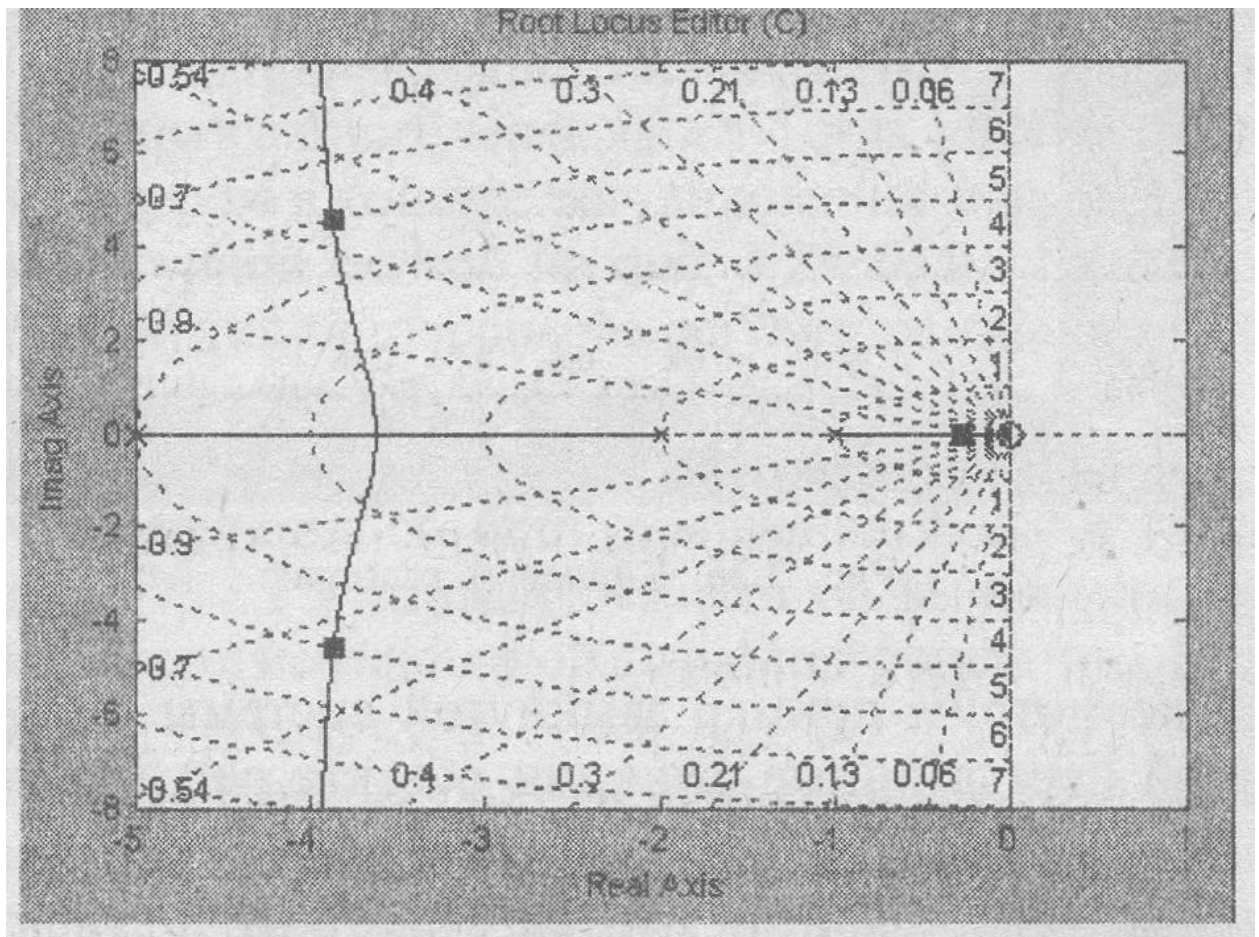


Рис. 3.27. Корневой годограф системы с добавленным нулем ($z=0$)

Если нажать на вкладку Control Architecture, то откроется окно (рис. 3.29), в котором можно задать структуру замкнутой системы. В этом окне предлагается четыре варианта структур, состоящих из четырех блоков:

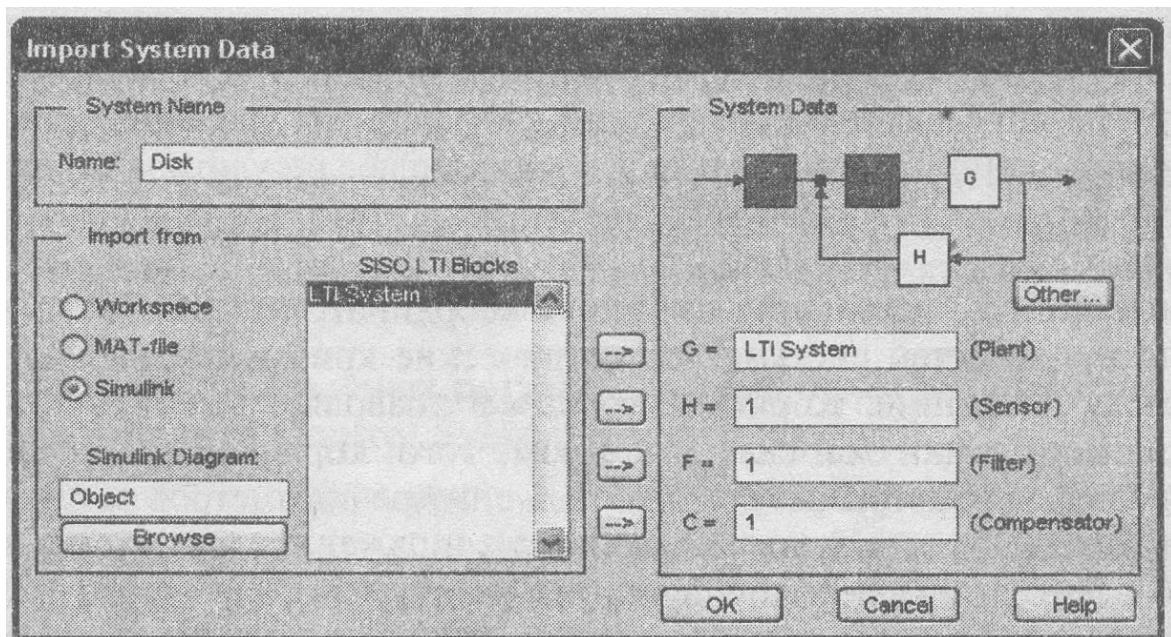


Рис. 3.28. Графический интерфейс

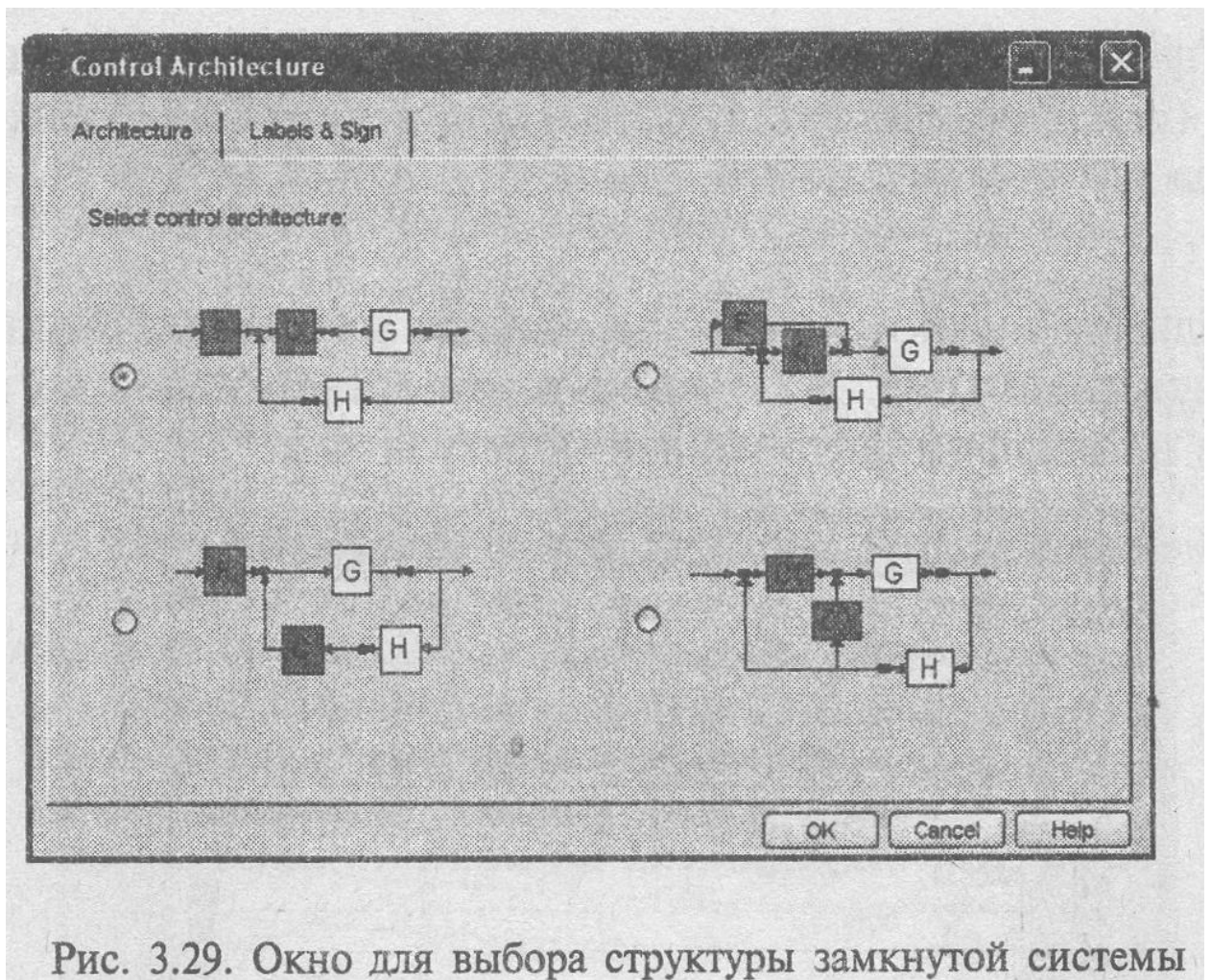


Рис. 3.29. Окно для выбора структуры замкнутой системы

F — фильтр на входе системы;

C — регулятор, параметры которого нужно рассчитать;

G — объект управления;

H — звено в цепи обратной связи.

Интерфейс предоставляет возможность выбрать одну из предлагаемых четырех структур.

Пример 3.5. Работу с интерфейсом рассмотрим на примере синтеза регулятора для системы управления устройством чтения-записи жесткого диска компьютера.

Напомним, что LTI-модель объекта сохранена на диске в MAT файле *Disk*.

В меню интерфейса выбираем команду *File/Import*. Выполнение данной команды меню приводит к открытию диалогового окна загрузки модели и задания параметров отдельных звеньев.

Выбираем импорт MAT файла *Disk* в блок G (Plant). Если предварительно созданы модели фильтра и звена в цепи обратной связи, то алгоритм их загрузки такой же, как рассмотренный. По умолчанию передаточные функции этих звеньев

устанавливаются единичными. После нажатия кнопки ОК окно загрузки закроется, а в основном окне интерфейса отобразятся полюса передаточной функции объекта и годограф при увеличении коэффициента усиления регулятора. В данном случае имеем два комплексно сопряженных полюса (рис. 3.30):

$$p_{12} = -0,2 \pm j'31,6228$$

Годограф при увеличении коэффициента усиления представляет собой две вертикальные прямые. Такая система, как известно, обладает сильной колебательностью. В этом легко убедиться, просмотрев переходной процесс и частотные характеристики системы, выполнив команды Analysis/Respon to Step и Analysis/Close-Loop Bode.

Для компенсации влияния комплексно-сопряженных полюсов объекта выберем регулятор с передаточной функцией

рем регулятор с передаточной функцией

$$W_R(s) = \frac{s^2 + 0,4s + 1000}{5s} = 0,08 + \frac{200}{s} + 0,2s \quad (3.37)$$

состоящего из пропорционального, интегрального и идеального дифференцирующего звеньев (ПИД-регулятор). Из выражения (3.37) определяем нули и полюсы регулятора

$$z_{1,2} = -0.2 \pm j31.6, p_1 = 0$$

В окне менеджера нужно «кликнуть» мышью на вкладке Compensator Editor и в открывшемся окне (рис. 3.31) вписать в соответствующие поля значения нулей, полюсов и коэффициента усиления регулятора.

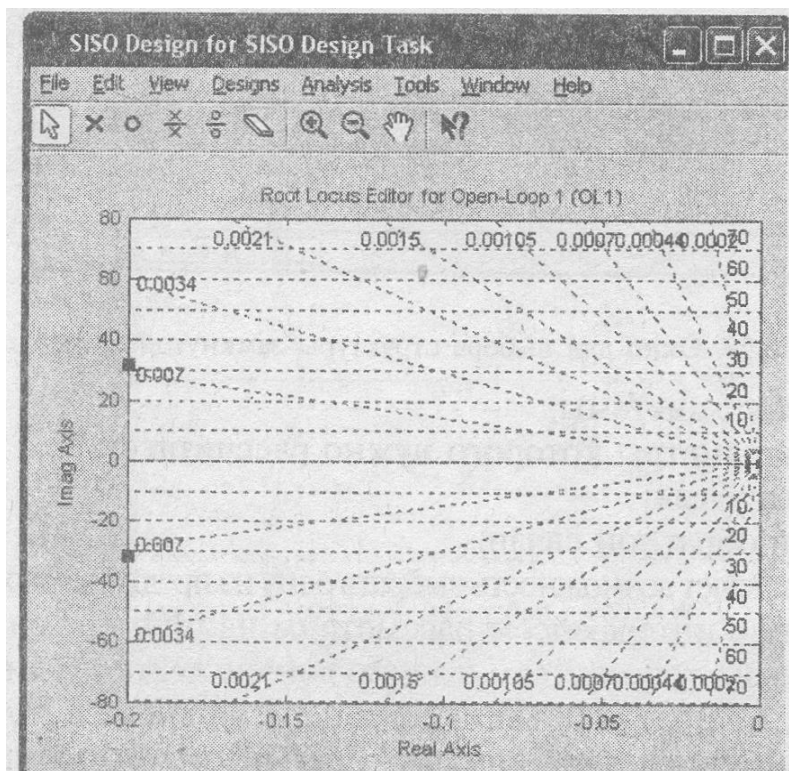


Рис. 3.30. Годограф системы по рис. 3.9

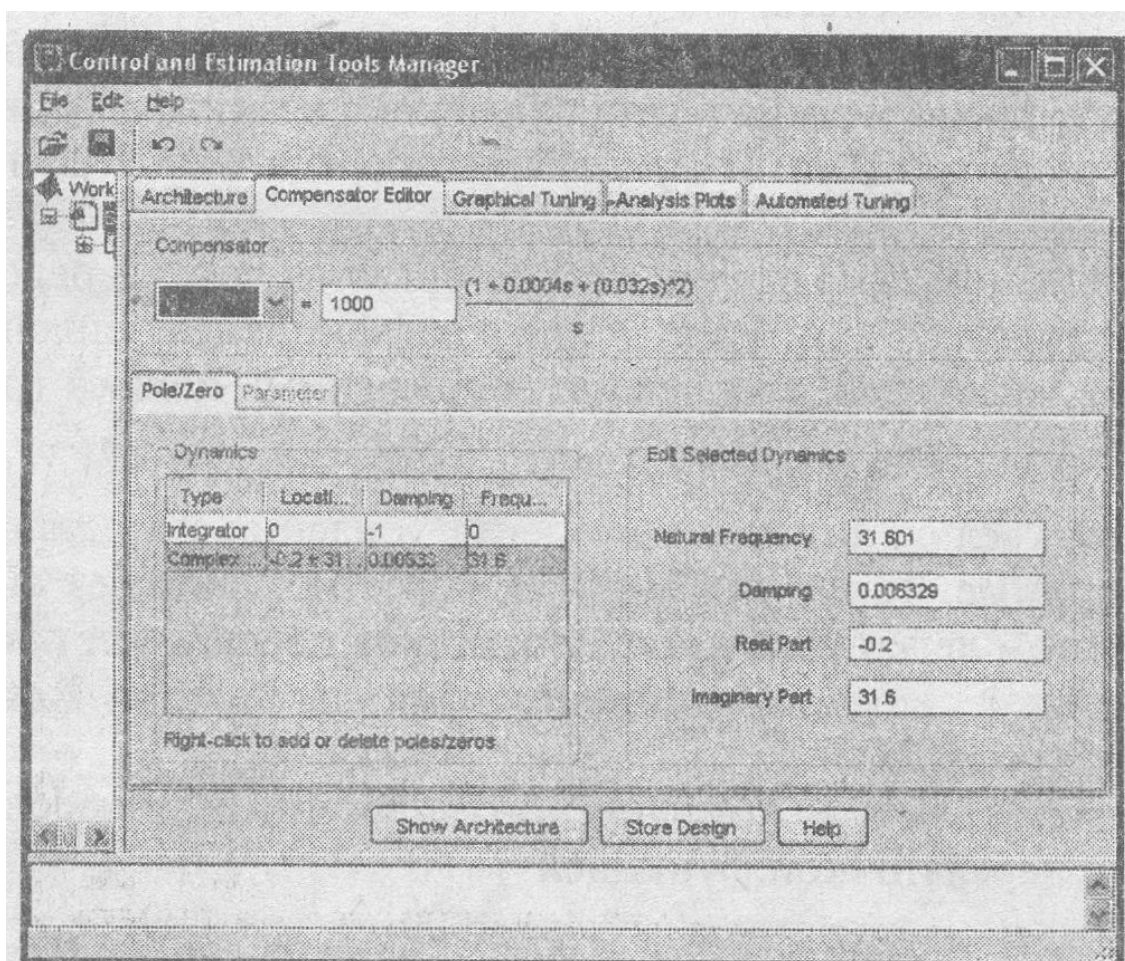


Рис. 3.31. Control and Estimation Tools Manager

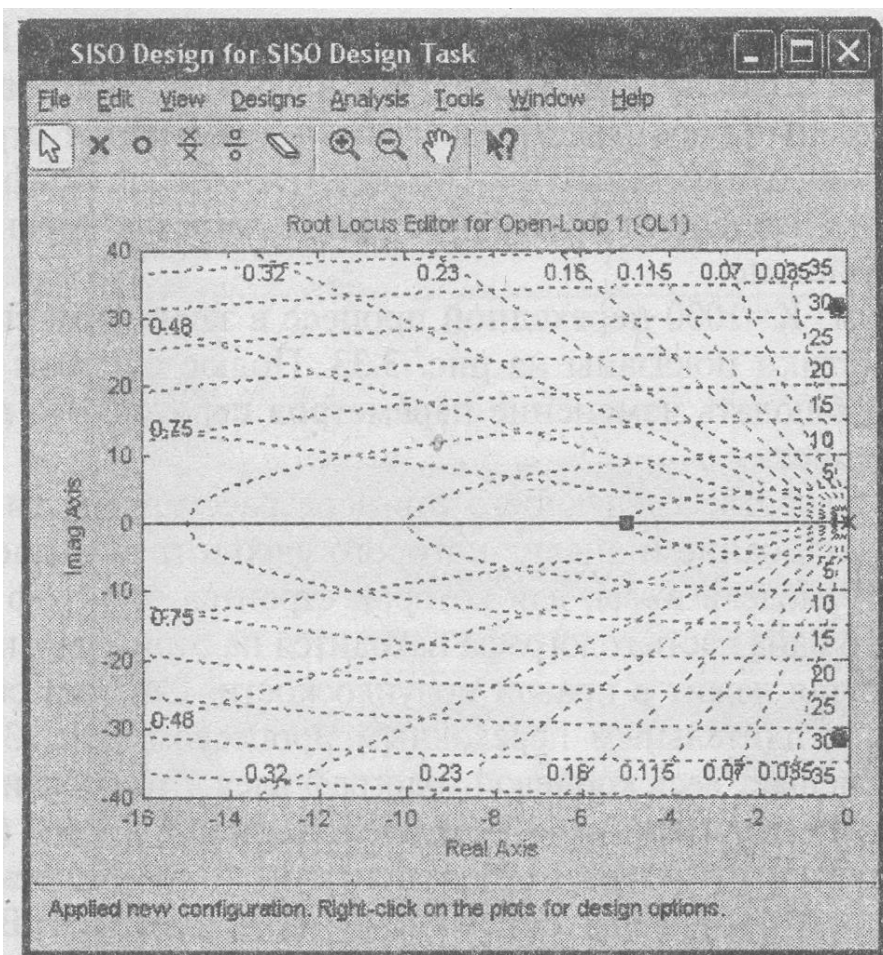


Рис. 3.32. Годограф замкнутой системы

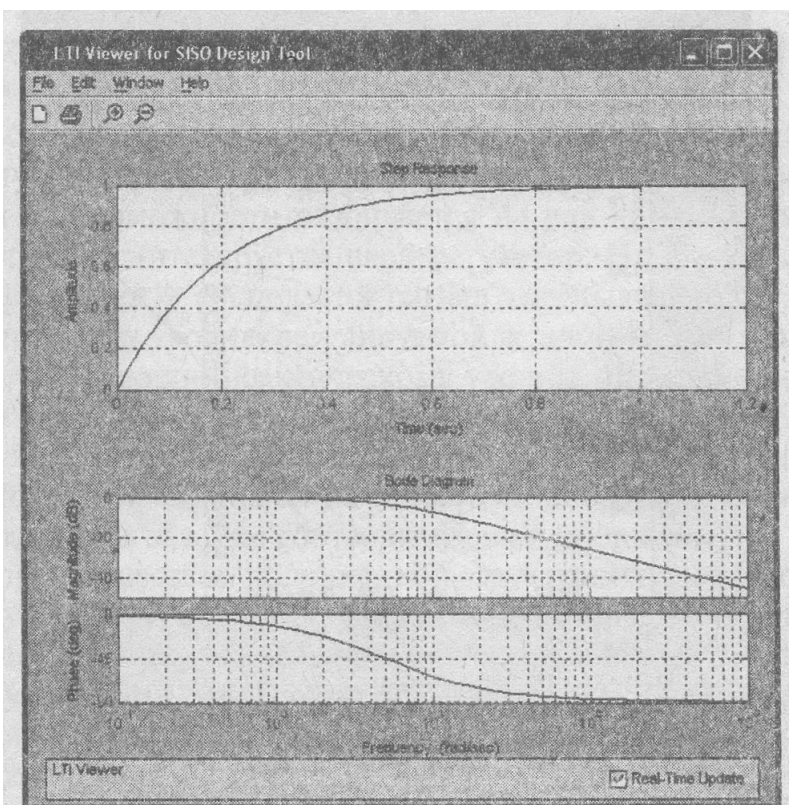


Рис. 3.33. Динамические характеристики замкнутой системы

Теперь окно интерфейса принимает новый вид (рис. 3.32). Комплексно-сопряженные полюса объекта компенсированы нулями регулятора, и в замкнутой системе остался один полюс, годографом которого является отрицательная вещественная полуось комплексной плоскости. Чем больше коэффициент усиления регулятора, тем дальше от мнимой оси располагается корень и тем выше в системе быстродействие.

При выбранном $K=1000$ переходной процесс в замкнутой системе и ее частотные характеристики показаны на рис. 3.33. Полюс системы можно перемещать мышью и наблюдать изменение параметров переходного процесса и вида частотных характеристик.

Пример 3.6. В качестве следующего примера рассмотрим синтез регулятора для звена робота, описание и анализ которого рассмотрен выше.

Загружаем МАТ модель *Robot*, для которой строится годограф (рис. 3.34). Из рис. 3.34 видно, что одна часть годографа находится на отрицательной действительной полуоси, а другая лежит в правой полуплоскости. Система обладает сильной колебательностью и длительным переходным процессом (рис. 3.16). Поскольку добавление нуля смещает весь корневой годограф влево, то добавим ноль в начало координат при этом выберем иную структуру замкнутой системы (верхняя правая, рис. 3.29). Используя графический интерфейс подберем коэффициент усиления звена F и звена C так, чтобы перерегулирование не превышало 6%. В окончательном виде передаточные функции звеньев равны $C(s) = 405$, $F(s) = 10$. Переходной процесс и частотные характеристики замкнутой системы представлены на рис. 3.35.

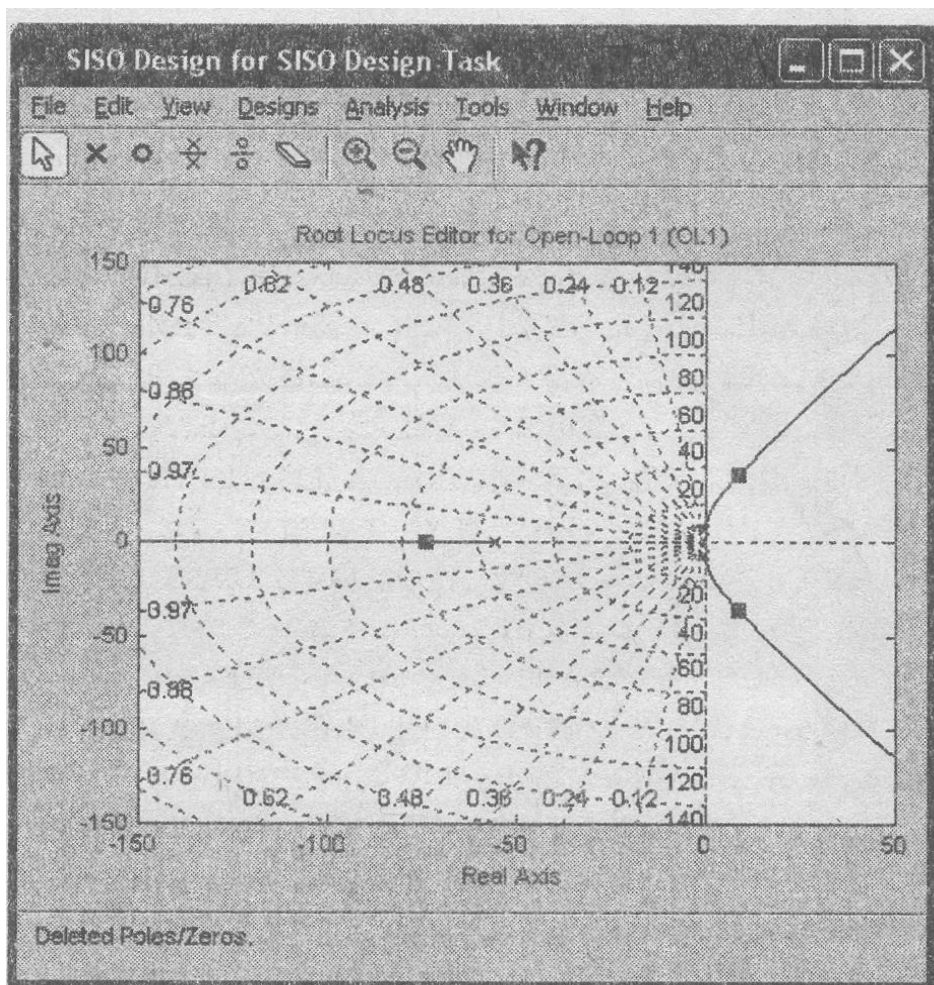


Рис. 3.34. Годограф звена робота

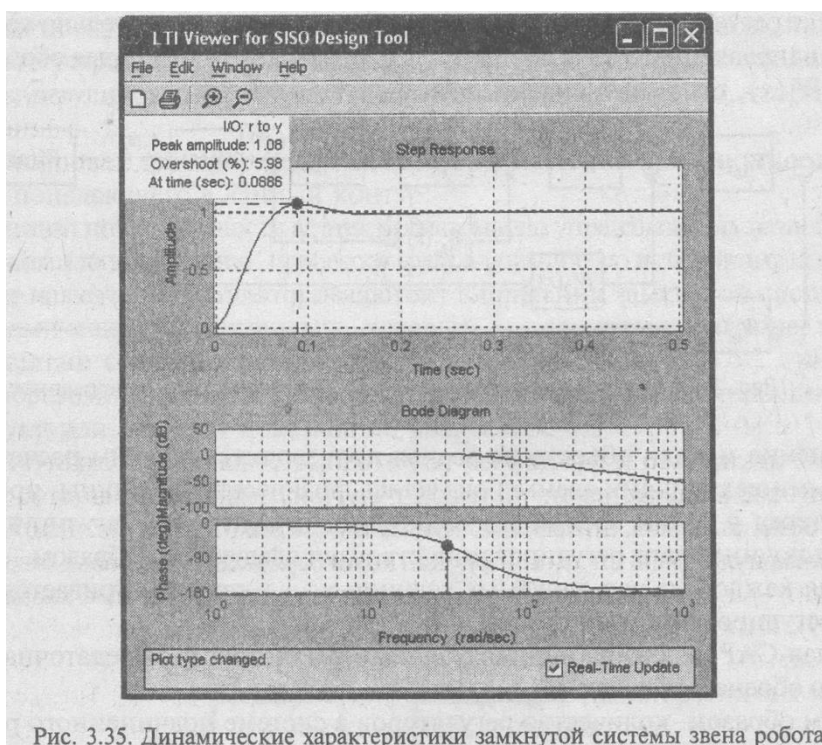


Рис. 3.35. Динамические характеристики замкнутой системы звена робота

3. Синтез непрерывных регуляторов во временной и частотной области в подчиненных структурах

Из всех способов построения систем мехатроники преимущественное распространение получили системы с подчиненным регулированием. В них объект регулирования по возможности разбивается на ряд динамических звеньев, для каждого из которых синтезируется свой регулятор. На вход k -ого регулятора с передаточной функцией $W_p(s)$ подается сигнал с предыдущего регулятора, соответствующий задаваемому уровню регулируемой величины, и сигнал с выхода k -ого звена системы, отвечающий фактическому уровню. Важным достоинством данной структуры является возможность простыми средствами достичь желаемых динамических характеристик всей системы. Кроме того, подчиненная структура позволяет осуществить ограничение любой из координат системы. Для этого достаточно ограничить задание соответствующей координаты.

Основным преимуществом подчиненной структуры является возможность компенсации возмущений на объект регулирования, которые могут быть вызваны как внешними воздействиями (температура, напряжение питания, момент нагрузки и т. д.), так и внутренними перекрестными связями в многомерных системах.

Обобщенная структурная схема многоконтурной системы подчиненного регулирования представлена на рис. 3.36.

Объект регулирования представлен в виде цепи последовательно соединенных звеньев направленного действия, передаточные функции которых обозначены как $W_1(s)$ - $W_n(s)$, где n - количество звеньев модели объекта.

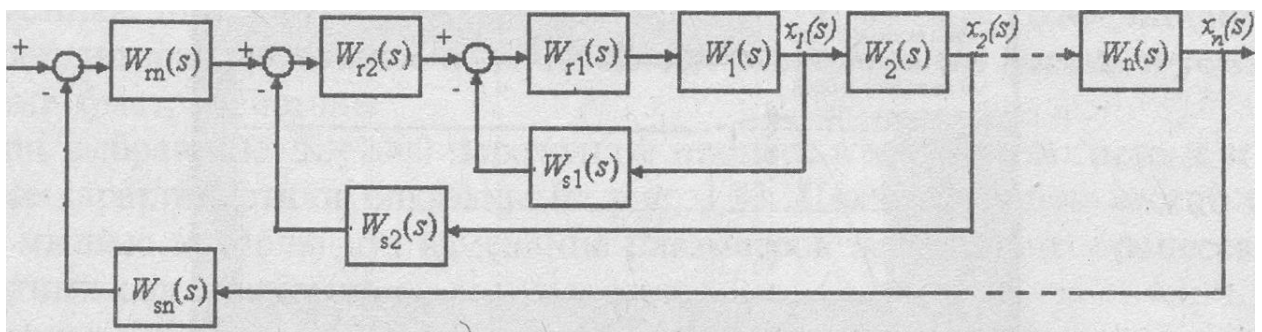


Рис. 3.36. Структурная схема системы с подчиненным регулированием

Разбиение модели объекта на звенья производится с таким расчетом, чтобы выходными величинами звеньев оказались физические величины, представляющие интерес с точки зрения регулирования и контроля. Регулирующая часть системы подчиненного регулирования строится следующим образом.

1. Для каждой из регулируемых величин $x_1 \dots x_n$ предусматривается замкнутая САР с регулированием по отклонению.

Каждая САР снабжена индивидуальным регулятором, передаточная функция которого обозначается как $W_{rk}(s)$ ($k=1,2,3, \dots n$).

Таким образом, количество регуляторов в системе подчиненного регулирования равно количеству выделенных звеньев объекта.

В дальнейшем рассматривается обобщенный ПИД-регулятор с реальным дифференцирующим звеном, передаточная функция этого регулятора определяется выражением:

$$W_p(s) = k_{\Pi} + \frac{k_I}{s} + \frac{k_D s}{T_D s + 1}. \quad (3.38)$$

Регуляторы типа П, PI, PD являются частными случаями обобщенного регулятора при равенстве нулю соответствующих коэффициентов.

Для формирования сигнала обратной связи в каждой из САР предусматривается датчик соответствующей регулируемой величины, передаточная функция которого на рис. 3.36 обозначена как $W_{sk}(s)$.

2. Подобно звеньям объекта регуляторы соединяются между собой последовательно, но в обратном порядке по отношению к порядку связи звеньев объекта.

Каждый последующий регулятор вырабатывает задание для предыдущего регулятора.

Задача синтеза заключается в определении структуры и параметров контурных регуляторов.

Синтез осуществляется по так называемой стандартной методике и заключается в следующем:

1. Синтез регуляторов производится последовательно, начиная с регулятора внутреннего контура. После этого синтезируются регуляторы промежуточных контуров и, наконец, регулятор внешнего контура.

2. Каждый контурный регулятор выполняется в виде последовательного корректирующего устройства, обеспечивающего желаемые свойства данной локальной системы регулирования. Регулятор строится с таким расчетом, чтобы своим действием он:

а) компенсировал действие (и прежде всего проявление инерционности) звена объекта, попадающего в данный контур;

б) обеспечивал по возможности астатизм системы по управляющему воздействию;

в) обеспечивал оптимизацию процессов регулирования по выбранному критерию.

Основное назначение регуляторов состоит в придании замкнутой системе заданных динамических характеристик, которые, как это отмечено выше, в определенной степени стандартизированы.

Таким образом, на каждом этапе синтеза регуляторов проектировщик имеет дело со структурой, которая показана на рис. 3.37.

В этой структуре необходимо выбрать тип регулятора и рассчитать его параметры, при которых замкнутая система удовлетворяет определенным динамическим требованиям. *Далее рассматриваются системы, в которых звено в цепи обратной связи является безинерционным $W_{oc}(s) = K_{ж}$, т. к. инерционностью датчиков в цепях обратной связи обычно можно пренебречь.*

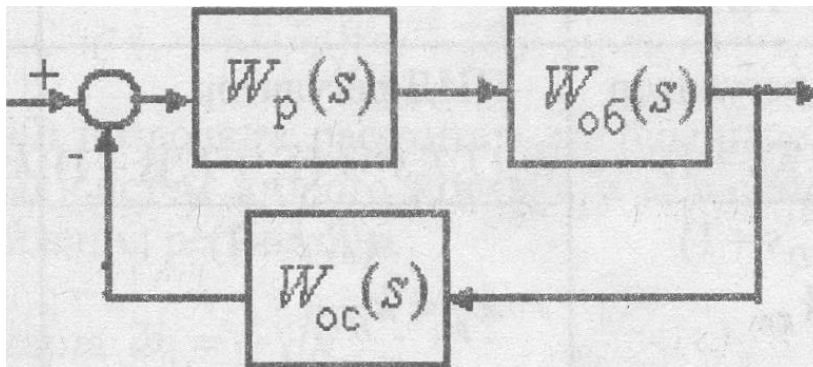


Рис. 3.37. Обобщенная структура

Передаточную функцию объекта в структуре рис. 3.37 всегда можно представить динамическим звеном не выше второго порядка. Возможные варианты описания конечной передаточной функции $W_{об}(s)$ представлены в первом столбце таблицы 3.2

1. Регулятор в структуре (рис. 3.37) может быть синтезирован двояким способом.

В первом случае он компенсирует одну (большую) постоянную времени объекта. Такие регуляторы в таблице обозначены как регуляторы первого типа.

Во втором случае он компенсирует обе постоянные времени объекта. Такие регуляторы в таблице 3.2. обозначены как регуляторы второго типа.

Передаточные функции замкнутых систем с различными типами регуляторов помещены в соответствующие ячейки таблицы.

Из таблицы видно, что замкнутые системы с рассмотренными передаточными функциями объекта описываются также звеньями второго порядка.

Динамическое звено второго порядка можно принять за базу при проектировании мехатронной системы любой сложности.

Из уравнений, приведенных в таблице 3.2, видно, что параметры замкнутых систем вычисляются по аналогичным формулам. Это позволяет осуществлять обобщенный синтез регуляторов для систем, передаточные функции которых могут быть сведены к выражениям, приведенным в таблице 3.2. Для реализации обобщенного синтеза этих систем введем в рассмотрение относительные единицы для коэффициента передачи регулятора и резонансной частоты.

$$\bar{K}_p = \frac{K_p}{K_{кр}}, \quad \bar{\omega}_0 = \omega_0 T_1, \quad (3.39)$$

где $K_{кр}$ находится из выражений таблицы 3.2 при $\xi = 1$. В этом случае параметры всех систем второго порядка (табл. 3.2) опишутся уравнениями

$$\begin{aligned} 2\xi\bar{\omega}_0 &= 1, \\ \bar{\omega}_0^2 &= \frac{1}{4}\bar{K}_p \end{aligned} \quad (3.40)$$

Передаточная функция объекта	$\frac{K_{об}}{T_2 s(T_1 s + 1)}$	$\frac{K_{об}}{(T_2 s + 1)(T_1 s + 1)}$	$\frac{K_{об}}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}$
Передаточная функция регулятора 1-го типа	П регулятор k_p	ПИ регулятор $\frac{k_p(T_2 s + 1)}{T_2 s}$ $k_p = k_{\Pi}, k_{И} = \frac{k_p}{T_2}$	
Передаточная функция замкнутой системы	$\frac{\frac{K_p K_{об}}{T_1 T_2}}{s^2 + 2\xi \omega_0 s + \omega_0^2},$ $2\xi \omega_0 = \frac{1}{T_1},$ $\omega_0^2 = \frac{K_p K_{об} K_{ос}}{T_1 T_2}$	$\frac{\frac{K_p K_{об}}{T_1 T_2}}{s^2 + 2\xi \omega_0 s + \omega_0^2},$ $2\xi \omega_0 = \frac{1}{T_1},$ $\omega_0^2 = \frac{K_p K_{об} K_{ос}}{T_1 T_2}$	
Передаточная функция регулятора 2-го типа	ПД регулятор $\frac{k_p(T_1 s + 1)}{(T_D s + 1)}$ $k_p = k_{\Pi},$ $T_1 = \frac{k_{\Pi} T_D + k_D}{k_{\Pi}}$	ПИД регулятор $\frac{k_p(T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2)s + 1)}{s(T_D s + 1)}$ $k_p = k_{И},$ $T_1 T_2 = \frac{k_{\Pi} T_D + k_D}{k_{И}}$ $T_1 + T_2 = \frac{k_{И} T_D + k_{\Pi}}{k_{И}}$	ПИД регулятор $\frac{k_p(T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1)}{s(T_D s + 1)}$ $k_p = k_{И},$ $T^2 = \frac{k_{\Pi} T_D + k_D}{k_{И}}$ $2\xi T = \frac{k_{И} T_D + k_{\Pi}}{k_{И}}$
Передаточная функция замкнутой системы	$\frac{\frac{k_p k_{об}}{T_D T_2}}{s^2 + 2\xi \omega_0 s + \omega_0^2},$ $2\xi \omega_0 = \frac{1}{T_D},$ $\omega_0^2 = \frac{K_p K_{об} K_{ос}}{T_D T_2}$	$\frac{\frac{k_p k_{об}}{T_D}}{s^2 + 2\xi \omega_0 s + \omega_0^2},$ $2\xi \omega_0 = \frac{1}{T_D},$ $\omega_0^2 = \frac{K_p K_{об} K_{ос}}{T_D}$	$\frac{\frac{k_p k_{об}}{T_D}}{s^2 + 2\xi \omega_0 s + \omega_0^2},$ $2\xi \omega_0 = \frac{1}{T_D},$ $\omega_0^2 = \frac{K_p K_{об} K_{ос}}{T_D}$

Уравнения (3.40) позволяют рассчитать обобщенные динамические характеристики замкнутых систем второго порядка в зависимости от относительного коэффициента усиления регулятора.

$$\text{Резонансная частота } \bar{\omega}_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\bar{\kappa}_p}. \quad (3.41)$$

$$\text{Коэффициент затухания в системе } \xi = \frac{1}{\sqrt{\bar{\kappa}_p}}. \quad (3.42)$$

$$\text{Перерегулирование в системе } \delta = \exp\left(-\pi \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) = \exp\left(\frac{-\pi}{\sqrt{\bar{\kappa}_p}-1}\right). \quad (3.43)$$

При изменении коэффициента усиления регулятора изменяются все обобщенные параметры замкнутой системы. Эти зависимости показаны на рис. 3.38.

По зависимостям (рис. 3.38) и таблице 3.2 можно для любого объекта второго порядка, исходя из требуемых динамических характеристик к замкнутой системе, определить структуру и параметры регулятора.

Пример 3.7. Рассмотрим синтез регулятора для объекта с передаточной функцией $\frac{\kappa_{об}}{(T_2s+1)(T_1s+1)}$ с параметрами: $\kappa_{об} = 10$, $T_1 = 0,01с.$, $T_2 = 0,1с.$, $\kappa_{ос} = 0,1$.

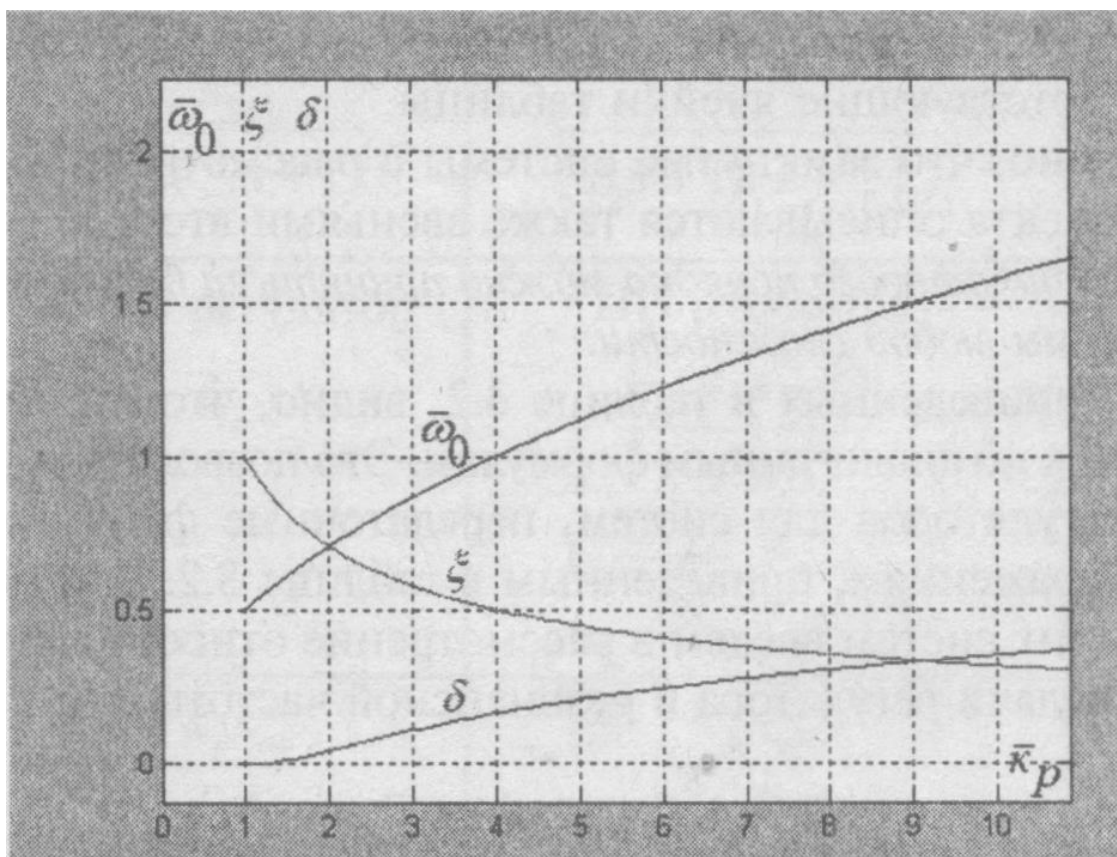


Рис. 3.38. Обобщенные динамические параметры замкнутых систем второго порядка

Выбираем регулятор первого типа (табл. 3.2) с передаточной функцией

$$W_p(s) = \frac{k_p(T_2s + 1)}{T_2s}$$

Зададимся в замкнутой системе коэффициентом затухания $\xi = 0,5$ (перерегулирование, $\delta \approx 20\%$) и по графику рис. 3.38 определим относительный коэффициент усиления регулятора $\bar{k}_p = 4$. Далее, вычислив критический коэффициент усиления

регулятора (табл. 3.2) $k_{kp} = \frac{T_2}{4T_1k_{oc}k_{oc}} = 2,5$, определим коэффициент усиления

регулятора, придающий замкнутой системе заданные качества $k_p = \bar{k}_p k_{kp} = 10$. Модель замкнутой системы представлена файлом (*Trans_Func1*), (рис. 3.39), динамические характеристики, полученные на этой модели, показаны на рис. 3.40.

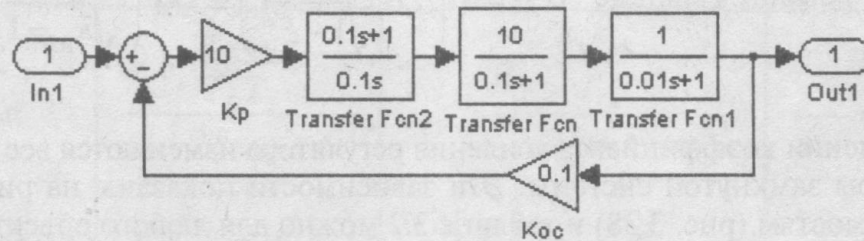


Рис. 3.39. Simulink — модель замкнутой системы

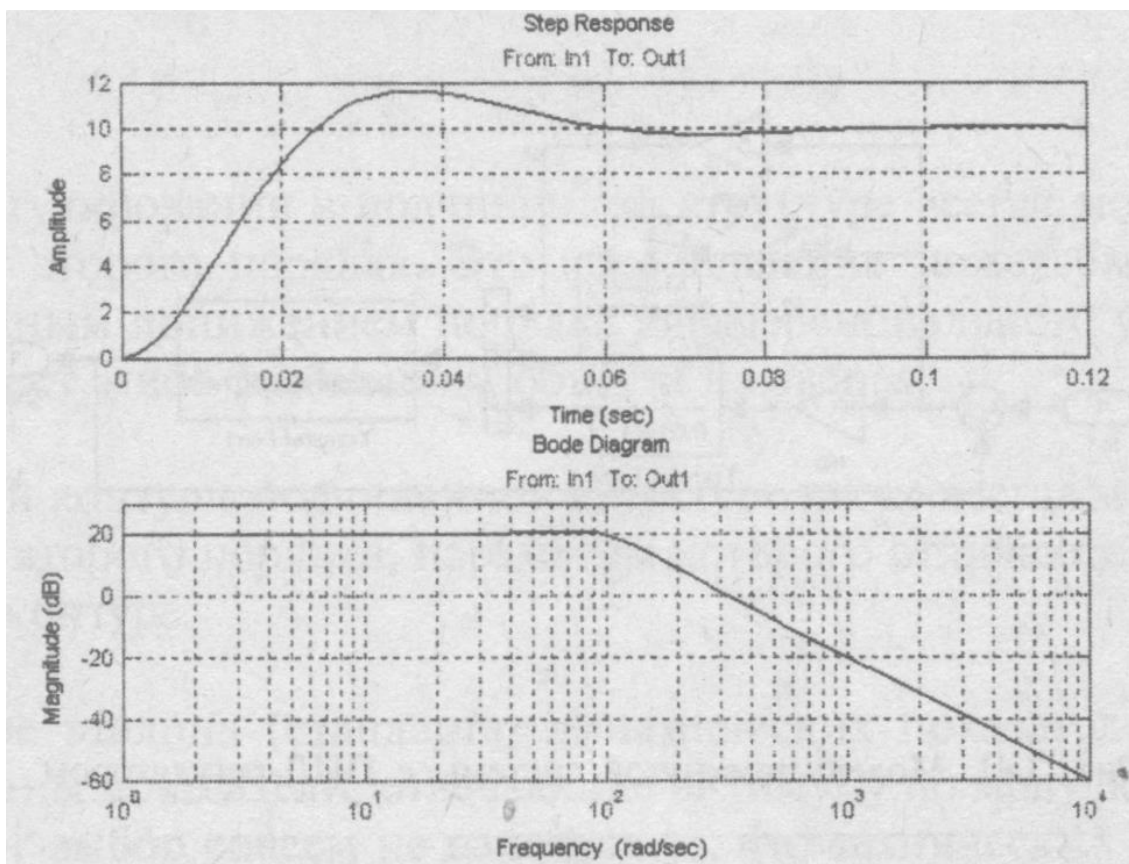


Рис. 3.40. Динамические характеристики замкнутой системы

Пример 3.8. Объект регулирования описывается передаточной функцией $W_{об}(s) = \frac{k_{об}}{T_{об}^2 s^2 + 2T_{об}\xi s + 1}$ с параметрами $T_{об} = 0,05с.$, $\xi = 0,707$, $k_{об} = 2$.

Для управления таким объектом синтезируем ПИД регулятор с реальным дифференцирующим звеном $W_p(s) = \frac{k_p(T_{об}^2 s^2 + 2T_{об}\xi s + 1)}{s(T_D s + 1)}$ (табл. 3.2), параметры

которого должны удовлетворять условиям: $\frac{k_{\Pi} T_D + k_D}{k_{\Pi}} = T_{об}^2$, $\frac{k_{\Pi} T_D + k_{\Pi}}{k_{\Pi}} = 2\xi T_{об}$

Откуда $k_{\Pi} = k_p$, $k_{\Pi} = k_{\Pi}(2\xi T_{об} - T_D)$, $k_D = k_{\Pi} T_{об}^2 - k_{\Pi} T_D$.

Задавшись $T_D = 0,01с. < 2\xi T$, $k_{oc} = 1$, рассчитаем параметры ПИД регулятора для реализации в замкнутой системе технического оптимума $\bar{k}_p = 2$ (рис. 3.38)

определим из таблицы. 3.2

$$k_{kp} = \frac{1}{4T_D k_{об} k_{oc}} = 12,5, \quad k_p = \bar{k}_p k_{kp} = 25, \quad k_{\Pi} = 1,5, \quad k_D = 0,0475$$

Модель замкнутой системы (файл *Trans Func2*) показана на рис. 3.41.

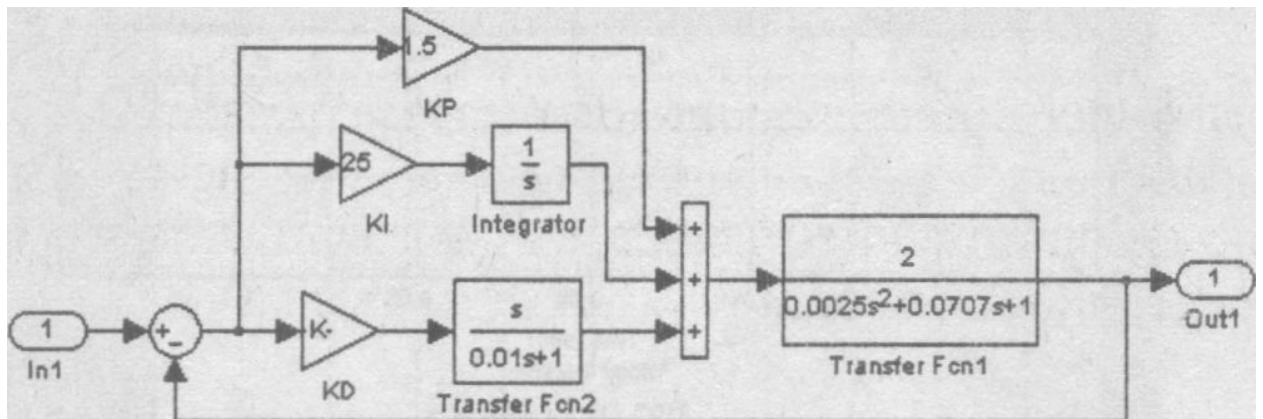


Рис. 3.41. Модель замкнутой системы с ПИД-регулятором

Переходной процесс и амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы приведены на рис. 3.42.

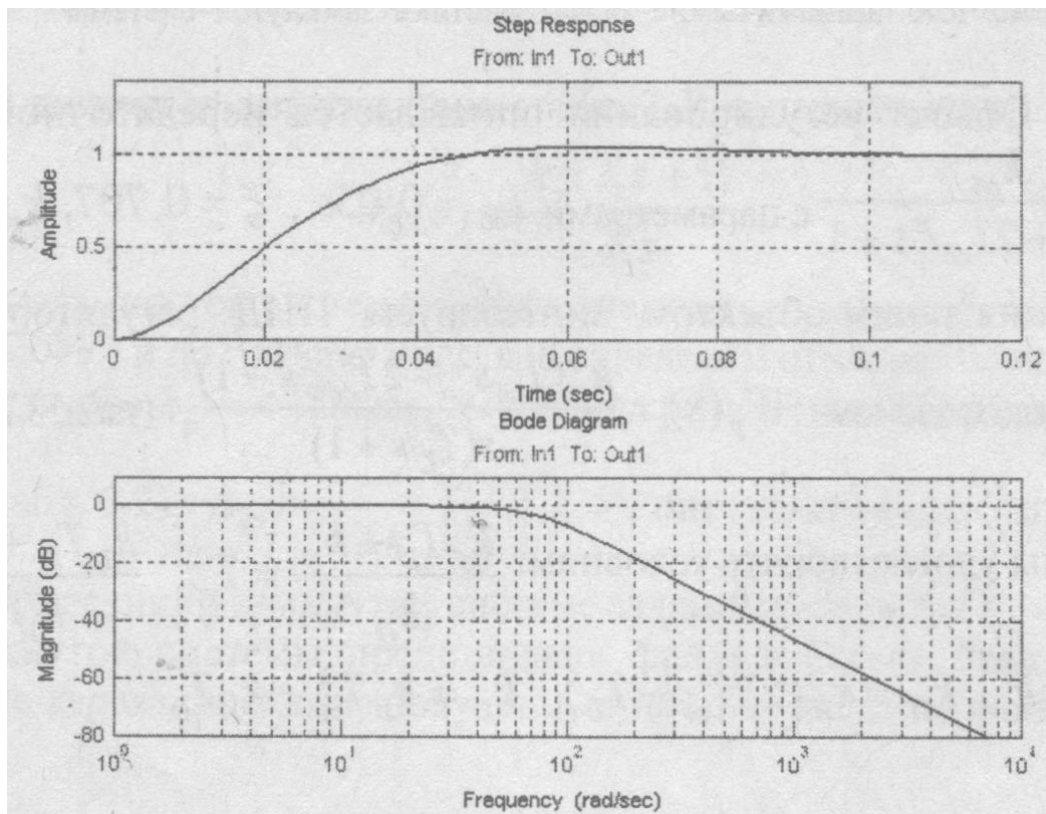


Рис. 3.42. Динамические характеристики замкнутой системы

Оптimum по модулю (технический optimum) в замкнутом контуре имеет место при $\bar{k}_p = 2$, в точке пересечения кривых $\bar{\omega}_0 = f(\bar{k}_p)$, $\xi = f(\bar{k}_p)$.

Этот критерий принят за основной при синтезе регуляторов в мехатронных системах постоянного и переменного тока (гл. 7, 8, 9).

Выводы:

- 10) Объект регулирования в подчиненной структуре всегда может быть представлен звеном второго порядка. Это представление может быть реализовано либо обоснованным понижением порядка дифференциального уравнения, описывающего объект, либо разбиением объекта на звенья.
- 11) Замкнутый контур в подчиненной структуре также всегда может быть представлен звеном второго порядка, параметры которого отличаются от параметров объекта в этом контуре.
- 12) В качестве эталона (стандарта) динамических показателей в замкнутой структуре выбраны показатели, отвечающие optimum по модулю (техническому optimum). Этот выбор совсем не означает то, что технический optimum всегда в наилучшей степени отвечает требованиям. Он означает лишь то обстоятельство, что при построении модели исследователь должен иметь дело с конкретными цифровыми значениями.

13) В разработанной модели регулятор можно легко рассчитать на любой выбранный критерий.

Лекция

Тема 2.1.9. Преобразование непрерывных регуляторов к цифровым аналогам

ВОПРОСЫ

1. Метод параллельного программирования.
2. Метод прямого программирования.
3. Динамические характеристики импульсного звена мехатронной системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

Определение параметров цифрового регулятора осуществляется путем пересчета параметров синтезированного непрерывного регулятора.

Замена непрерывного регулятора эквивалентным цифровым в [29] назван переоборудованием. Этот термин в наибольшей степени отражает суть осуществляемых преобразований в синтезируемой мехатронной системе.

Идея переоборудования поясняется рис. 3.43. Здесь замкнутая система с непрерывным объектом управления $W_o(s)$ и синтезированным непрерывным регулятором с передаточной функцией $W_p(s)$ (рис. 3.43, а) переоборудуется к системе с цифровым регулятором $W_p(z)$ и фиксатором вычисленных значений ЦАП с передаточной функцией

$W_{\text{эо}}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s}$.

Переоборудование базируется на представлении интеграла суммой. Эта сумма может быть вычислена различными способами.

Рассмотрим способы численного интегрирования, которые использованы в среде MATLAB-Simulink.

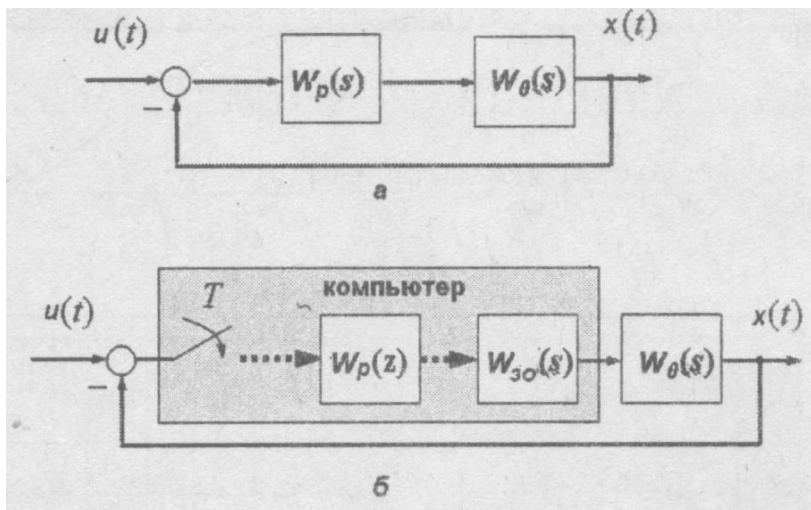


Рис. 3.43. Функциональные схемы непрерывной и дискретной системы

Прямой метод Эйлера.

Прямой метод Эйлера демонстрирует рис. 3.44. Значение выходного сигнала в момент $t=nT$ здесь находится из выражения

$$x[nT] = x[(n-1)T] + T \cdot u[(n-1)T]. \quad (3.44)$$

При подстановке оператора запаздывания в выражение (3.44), получим:

$$x[nT] = x[nT] \cdot z^{-1} + T \cdot u[nT] \cdot z^{-1}; \quad (3.45)$$

Сигнал на выходе может быть представлен в виде:

$$x[nT] = \frac{T}{z-1} u[nT]. \quad (3.46)$$

Таким образом при использовании прямого метода Эйлера осуществляется замена переменной.

$$\frac{1}{s} \approx \frac{T}{z-1}; \text{ или } s \approx \frac{z-1}{T} \quad (3.47)$$

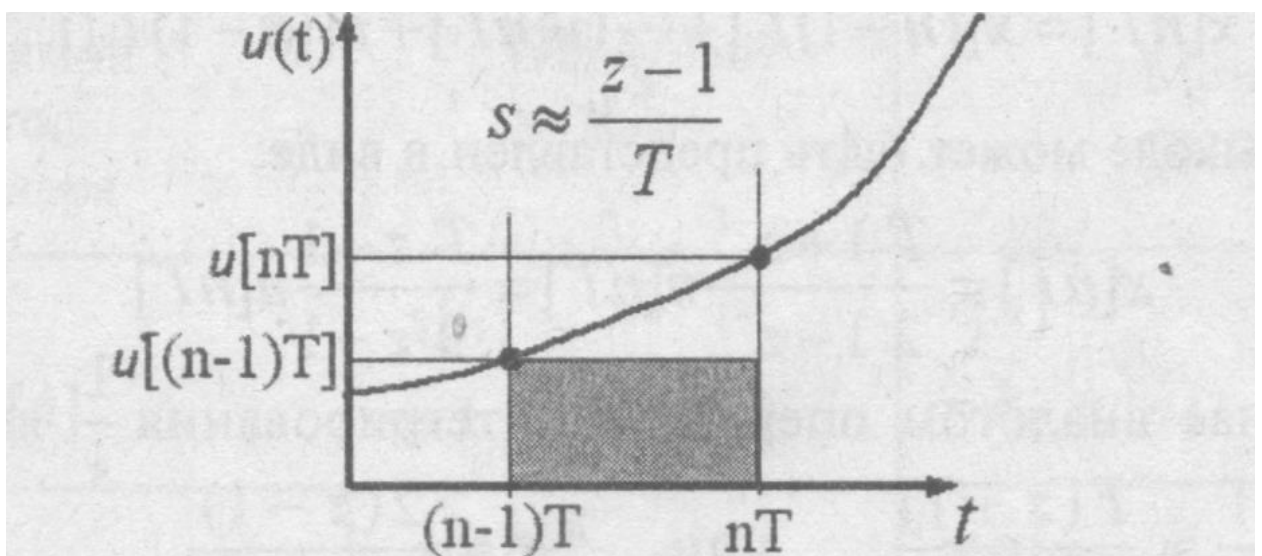


Рис. 3.44. Интегрирование по прямому методу Эйлера

Обратный метод Эйлера.

Рассмотрим другой пример, когда аппроксимирующая функция характеризуется «перебором» значений, как это показано на рис. 3.45.

Значение выходного сигнала в момент $t=nT$ здесь находится из выражения

$$x[nT] = x[(n-1)T] + T \cdot u[nT]. \quad (3.48)$$

При подстановке оператора запаздывания получим:

$$x[nT] = x[nT] \cdot z^{-1} + T \cdot u[nT]. \quad (3.49)$$

Сигнал на выходе может быть представлен в виде:

$$x[nT] = \frac{Tz}{z-1} u[nT]. \quad (3.50)$$

Таким образом при использовании обратного метода Эйлера осуществляется замена переменной

$$\frac{1}{s} \approx \frac{Tz}{z-1}; \quad \text{или} \quad s \approx \frac{z-1}{Tz} \quad (3.51)$$

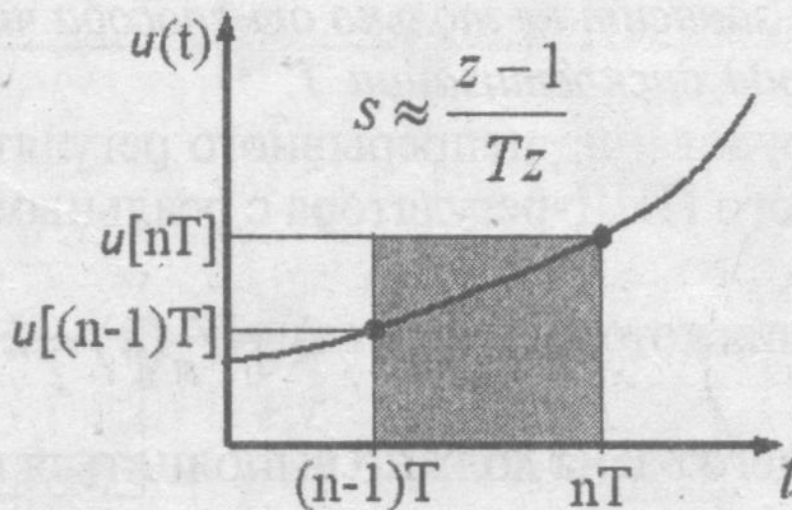


Рис. 3.45. Интегрирование по обратному методу Эйлера

Метод трапеций.

В пакете Simulink используется еще одна (трапецеидальная) аппроксимирующая функция (метод Тастина) (рис. 3.46).

Значение выходного сигнала в момент $t=nT$ здесь находится из выражения

$$x[nT] = x[(n-1)T] + \frac{T}{2} (u[nT] + u[(n-1)T]). \quad (3.52)$$

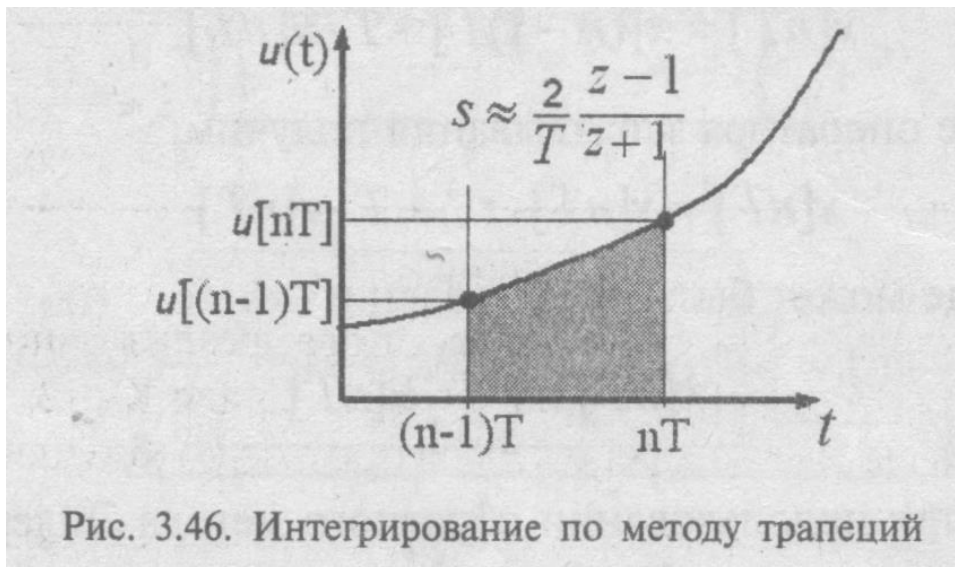
Сигнал на выходе может быть представлен в виде:

$$x[nT] = \frac{T}{2} \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} u[nT] = \frac{T}{2} \frac{z+1}{z-1} u[nT]. \quad (3.53)$$

В этом случае аналогом оператора интегрирования $\frac{1}{s}$ является оператор

$$\frac{1}{s} \approx \frac{T(z+1)}{2(z-1)}; \quad \text{или} \quad s \approx \frac{2(z-1)}{T(z+1)}. \quad (3.54)$$

Таким образом, ту роль, которую в непрерывных системах играет оператор интегрирования $\frac{1}{s}$, в дискретных системах играет оператор $\frac{T}{z-1}$, либо $\frac{zT}{z-1}$, либо $\frac{T(z+1)}{2(z-1)}$ в зависимости от выбора способа численного интегрирования.



Если известна операторная передаточная функция непрерывного регулятора, то, используя различные методы численного интегрирования, можно определить передаточную функцию цифрового регулятора.

Заметим, что последняя зависит не только от способа численного интегрирования, но и от значения периода дискретизации T .

В дальнейшем переоборудование непрерывного регулятора будем рассматривать на примере обобщенного ПИД-регулятора с реальным дифференцирующим звеном, передаточная функция которого имеет вид

$$W_p(s) = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + \frac{k_D s}{T_D s + 1}$$

при этом для дифференцирующего звена должно выполняться неравенство $T < T_D$. При переоборудовании используется несколько методов представления операторной функции.

1. Метод параллельного программирования

При использовании метода параллельного программирования каждое отдельное слагаемое в операторной функции заменяется ее дискретным аналогом с их последующим параллельным суммированием. Эти преобразования помещены в таблицу 3.3.

	Прямой метод Эйлера	Обратный метод	Метод трапеций
K_{Π}	$x[n] = k_{\Pi} \cdot u[n]$	$x[n] = k_{\Pi} \cdot u[n]$	$x[n] = k_{\Pi} \cdot u[n]$
$\frac{K_{\Pi}}{s}$	$x[n] = k_{\Pi} T \cdot \frac{z^{-1} \cdot u[n]}{1 - z^{-1}}$	$x[n] = k_{\Pi} T \cdot \frac{u[n]}{1 - z^{-1}}$	$x[n] = \frac{k_{\Pi} T}{2} \cdot \frac{(1 + z^{-1}) \cdot u[n]}{1 - z^{-1}}$
$\frac{K_D s}{T_D s + 1}$	$x[n] = \frac{k_D}{T_D} \cdot \frac{(1 - z^{-1}) \cdot u[n]}{1 - z^{-1} + \frac{T}{T_D} z^{-1}}$	$x[n] = \frac{k_D}{T_D} \cdot \frac{(1 - z^{-1}) \cdot u[n]}{1 - z^{-1} + \frac{T}{T_D}}$	$x[n] = \frac{k_D}{T_D} \times \frac{(1 - z^{-1}) \cdot u[n]}{\left(1 + \frac{T}{2T_D}\right) + z^{-1} \left(\frac{T}{2T_D} - 1\right)}$

Таблица 3.3.

На рис. 3.47 представлены модели И регулятора, реализованные тремя методами (файл *I_z_Reg*) в соответствии с уравнениями табл. 3.3 для $K_{\Pi}=2$, $T=0,5$, на рис. 3.48 показаны процессы на выходе этих регуляторов при скачкообразном входном сигнале.

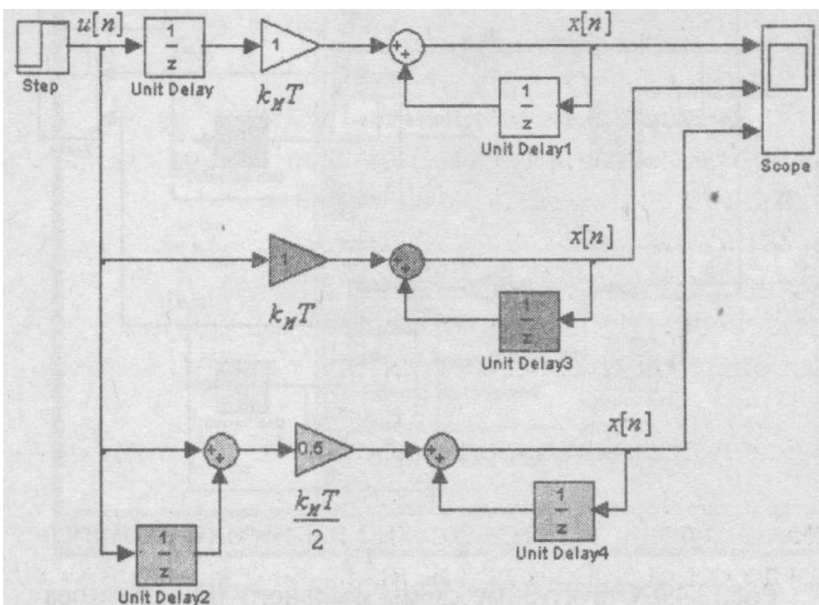


Рис. 3.47. Структурные схемы цифровых И-регуляторов

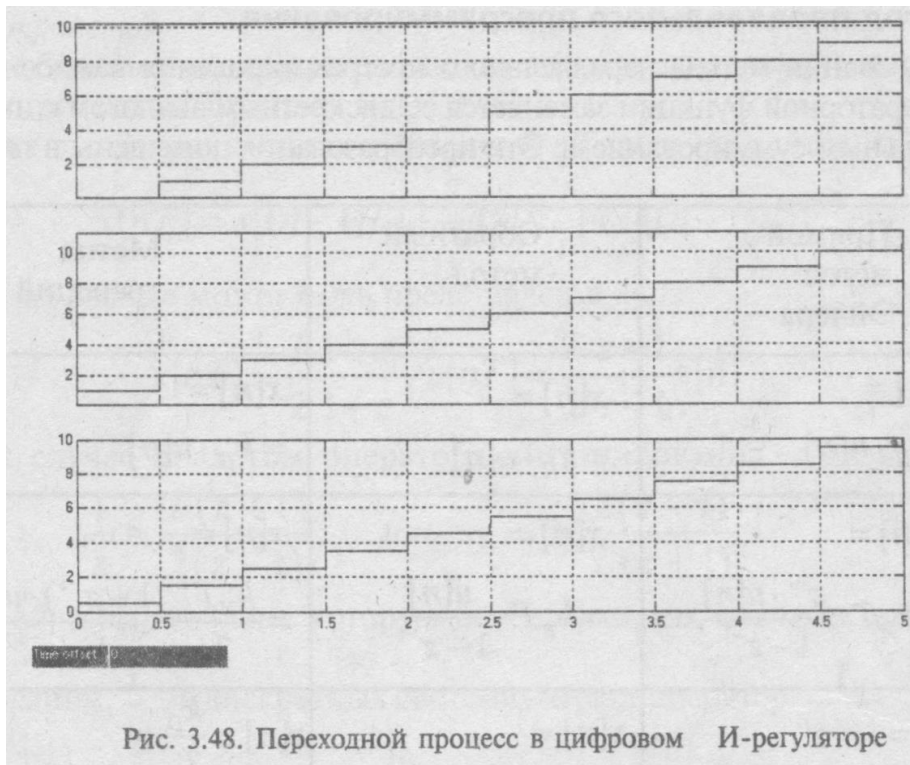


Рис. 3.48. Переходной процесс в цифровом И-регуляторе

Для реального дифференцирующего звена на рис. 3.49 построены модели, соответствующие трем методам преобразований (*файл D_z_Reg*), а на рис. 3.50 — переходные процессы на выходе этих моделей при скачкообразном входном сигнале для $K_D = 1$, $T_D = 0,5$, $T = 0,1$

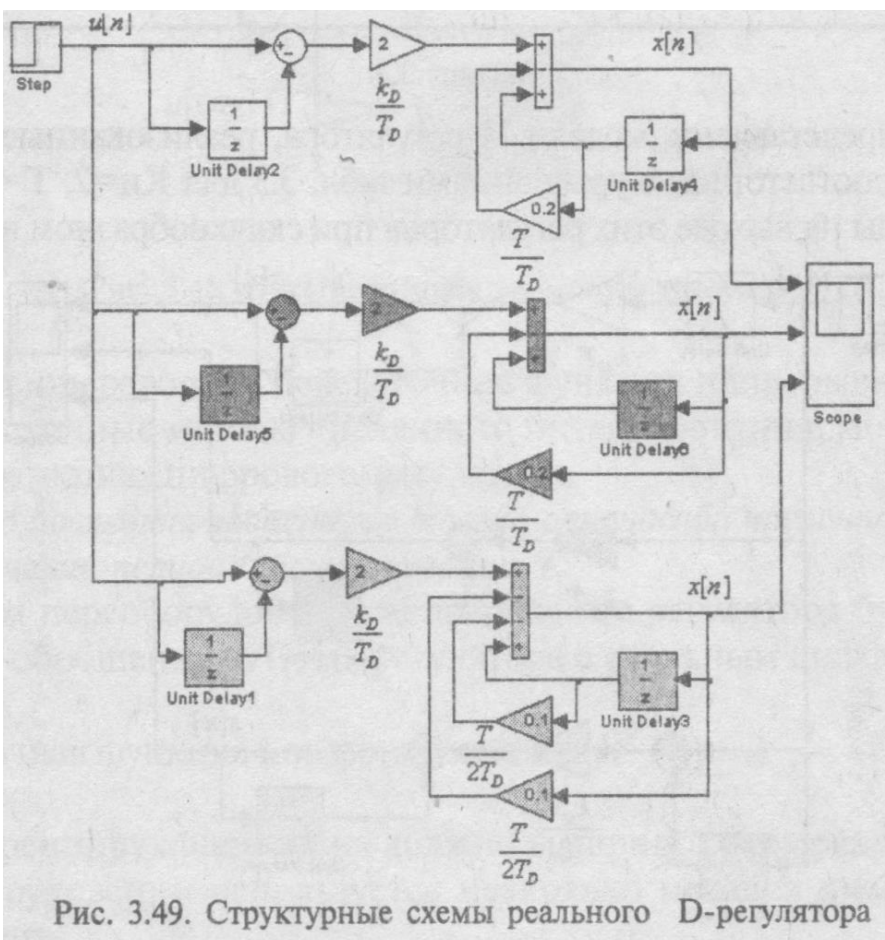
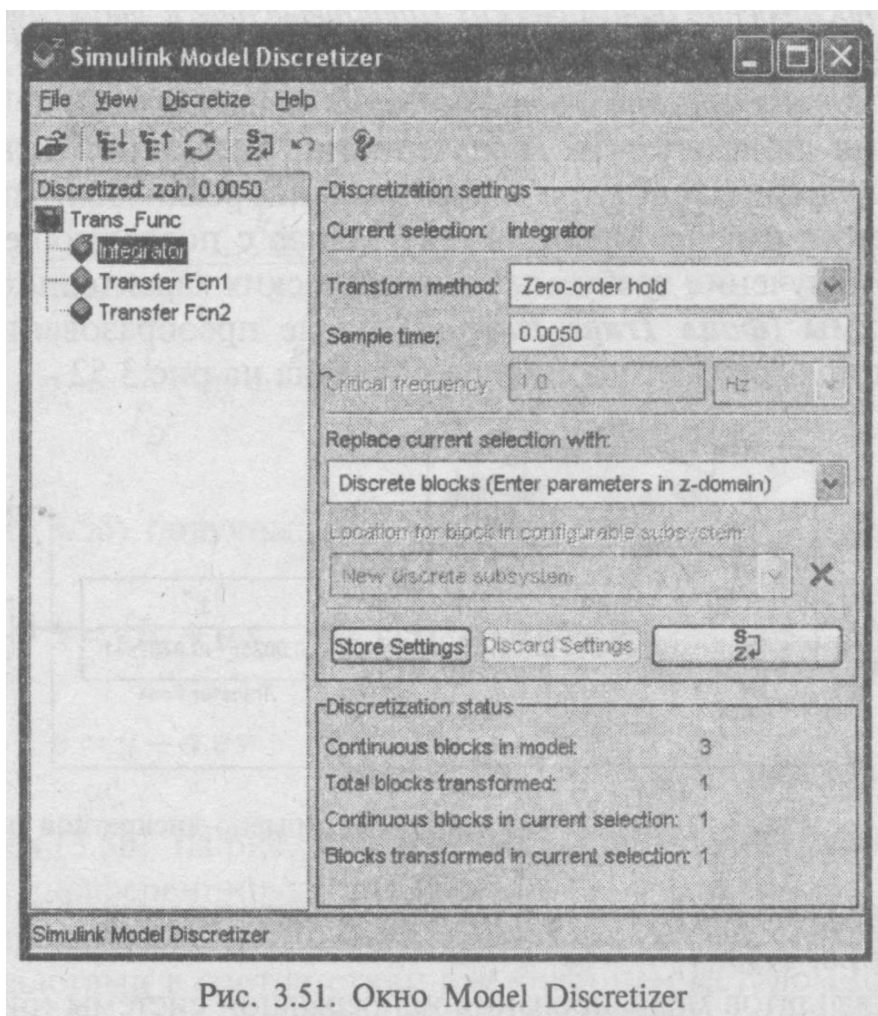
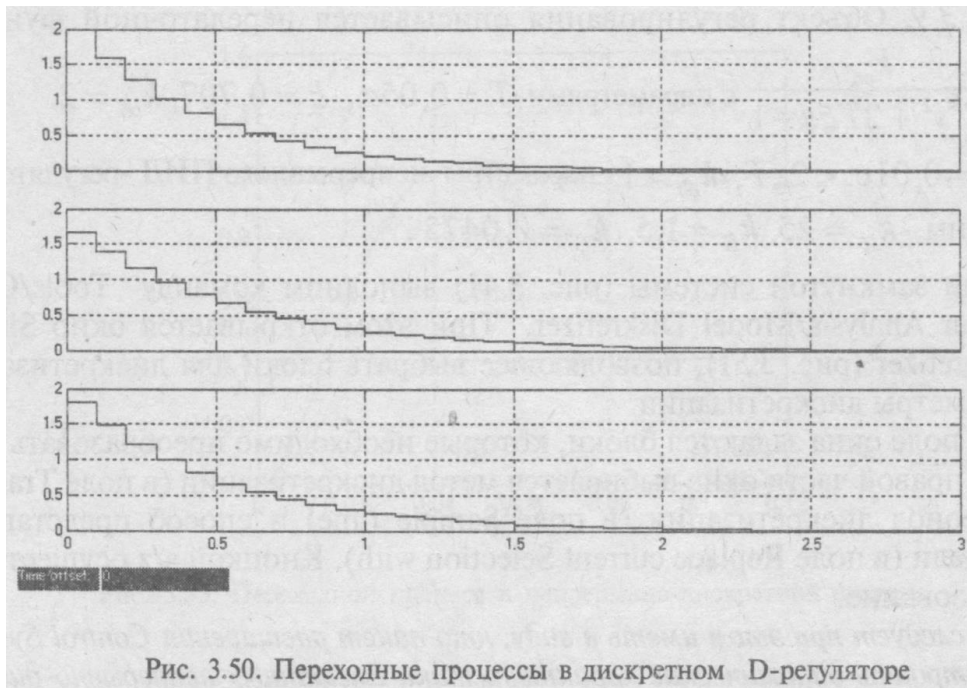


Рис. 3.49. Структурные схемы реального D-регулятора

Для реализации пропорционального дискретного регулятора необходимо последовательно с непрерывным звеном включить экстраполятор нулевого уровня (рис. 3.52).



Пакет Simulink предоставляет иные возможности переоборудования непрерывных регуляторов в дискретные. Рассмотрим этот вопрос на примере переоборудования непрерывного регулятора, синтезированного в примере 3.8.

Пример 3.9. Объект регулирования описывается передаточной функцией $W_{об}(s) = \frac{k_{об}}{T^2 s^2 + 2T\xi s + 1}$ с параметрами $T = 0,05с.$, $\xi = 0,707$, $k_{об} = 2$.
При $T_D = 0,01с. < 2\xi T$, $k_{ос} = 1$ параметры непрерывного ПИД-регулятора для $\bar{k}_p = 2$, равны $k_{И} = 25$, $k_{П} = 1,5$, $k_{D} = 0,0475$.

В модели замкнутой системы (рис. 3.41) выполним команду Tools/Control design/Linear Analysis/Model Diskretizer. При этом открывается окно Simulink Model Diskretizer (рис. 3.51), позволяющее выбрать блоки для дискретизации и задать параметры дискретизации.

В левом поле окна задаются блоки, которые необходимо преобразовать в дискретные. В правой части окна выбирается метод дискретизации (в поле Transform Method, период дискретизации (в поле Sample time) и способ представления звена в модели (в поле Replace current Selection with). Кнопкой s/z осуществляется преобразование.

Однако, следует при этом иметь в виду, что пакет расширения Control System не позволяет строить динамические характеристики смешанных непрерывно-дискретных систем. При построении динамических характеристик в этом случае Control System преобразует модель непрерывной части в дискретную, а обозреватель **LT1- Viewer** строит динамические характеристики этой преобразованной модели.

Для получения динамических характеристик смешанной непрерывно-дискретной системы удобнее всего при моделировании реализовать переходной процесс, записать его в рабочее пространство Matlab с последующей программной обработкой для получения требуемых динамических характеристик.

Модель системы **{файл Trans Func zI}** после преобразования регулятора с использованием прямого метода Эйлера показана на рис.3.52

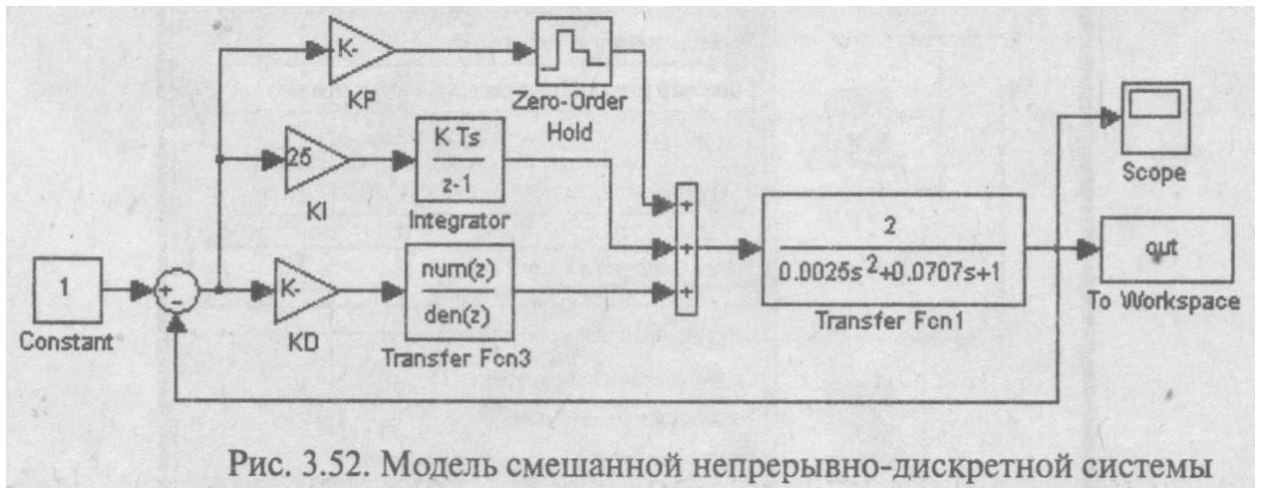


Рис. 3.52. Модель смешанной непрерывно-дискретной системы

Переходной процесс в системе при периоде дискретизации $T = 0,5T_D = 0,005c$ представлен на рис. 3.53.

Сравнение результатов моделирования непрерывной системы (рис.3.42) с результатами моделирования дискретно-непрерывной системы (рис. 3.53) показывают некоторое различие в динамике. Эти различия можно свести к нулю, выбирая другой (например трапецеидальный) способ представления интеграла и (или) уменьшая период дискретизации.

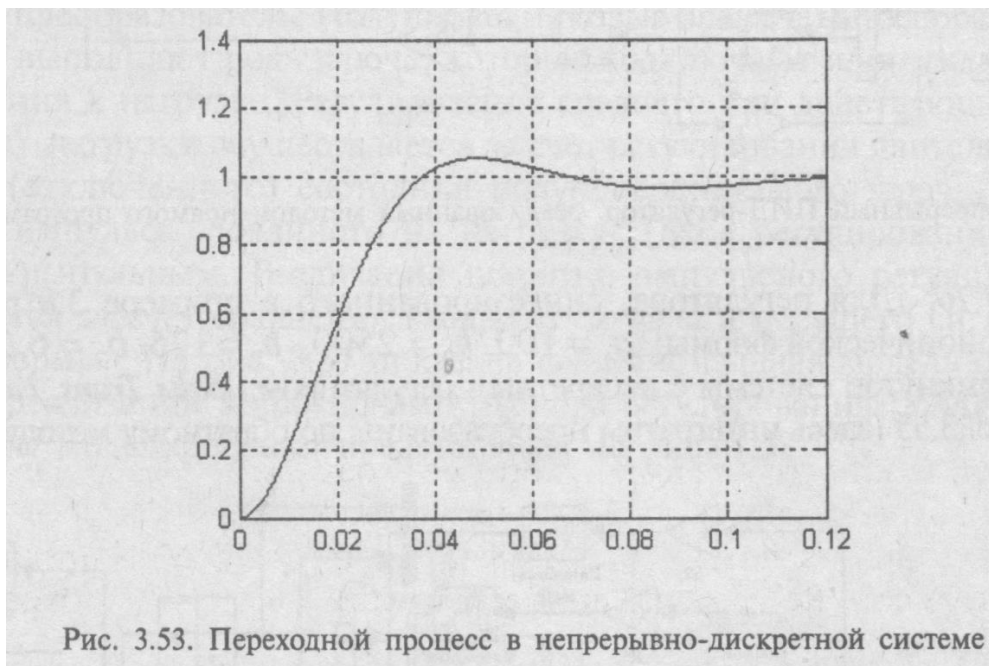


Рис. 3.53. Переходной процесс в непрерывно-дискретной системе

2. Метод прямого программирования

Представим передаточную функцию ПИД-регулятора с реальным дифференцирующим звеном в виде

$$W_p(s) = \frac{x}{u} = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s} + \frac{k_D s}{T_D s + 1} = \frac{b_2 + b_1 s^{-1} + b_0 s^{-2}}{1 + a_1 s^{-1}},$$

$$\text{где } a_1 = \frac{1}{T_D}, b_0 = \frac{k_{\text{И}}}{T_D}, b_1 = \frac{k_{\Pi} + T_D k_{\text{И}}}{T_D}, b_2 = \frac{k_D + T_D k_{\Pi}}{T_D} \quad (3.55)$$

Из уравнения (3.55) получим:

$$x = (b_2 + b_1 s^{-1} + b_0 s^{-2}) \cdot e, \text{ где } e = \frac{u}{1 + a_1 s^{-1}}, \quad (3.56)$$

$$e = u - a_1 e s^{-1}$$

По уравнениям (3.56) на рис. 3.54 построена структурная схема ПИД-регулятора с реальным дифференцирующим звеном.

Далее для получения дискретного регулятора следует интеграторы заменить их дискретными аналогами в соответствии с выбранным методом интегрирования.

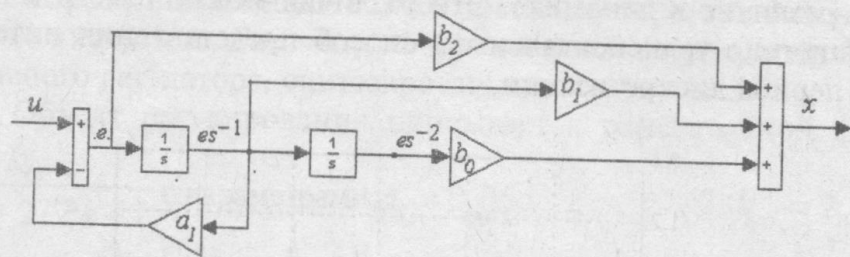


Рис. 3.54. Непрерывный ПИД-регулятор, реализованный методом прямого программирования

Пример 3.10. Для регулятора, синтезированного в примере 3.8 рассчитаем параметры канонической формы: $a_1 = 100$, $b_0 = 2500$, $b_1 = 175$, $b_2 = 6,25$.

Модель замкнутой системы с дискретным регулятором (файл *Trans_Func_z2*) показана на рис. 3.55 (здесь интеграторы преобразованы по обратному методу Эйлера).

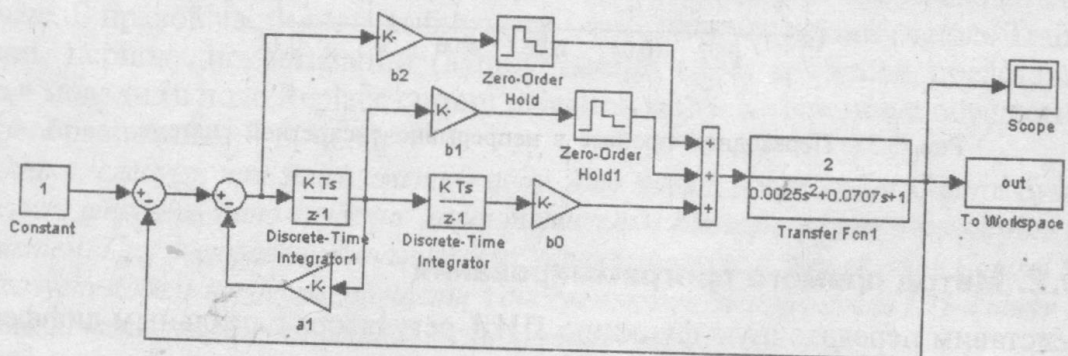


Рис. 3.55. Модель цифрового ПИД-регулятора, реализованный методом прямого программирования

Переходной процесс в модели при непрерывном регуляторе (рис. 3.42) и дискретном регуляторе (рис. 3.56), показывают, что в данном случае практически отсутствует различие в динамике непрерывной системы с системой, в которой использован переоборудованный дискретный регулятор.



Рис. 3.56. Переходной процесс в системе с дискретным регулятором

3. Динамические характеристики импульсного звена мехатронной системы

Импульсным звеном мехатронной системы, является силовой полупроводниковый преобразователь. Полупроводниковые элементы преобразователя, как правило, выполняют роль ключа, которые подключают или отключают источник питания к нагрузке. Регулирование среднего или действующего напряжения (тока) нагрузки осуществляется за счет регулирования длительности включенного (отключенного) состояния полупроводникового ключа, т. е. за счет ширины импульса, поданного на нагрузку. Такое регулирование называется широтно-импульсным. Реализация широтно-импульсного регулирования осуществляется за счет сравнения входного сигнала и несущего сигнала пилообразной формы. На рис. 3.57 показана функциональная модель одной из возможных реализаций широтно-импульсного регулирования (**файл ModJPWM**). Результаты моделирования представлены на рис. 3.58.

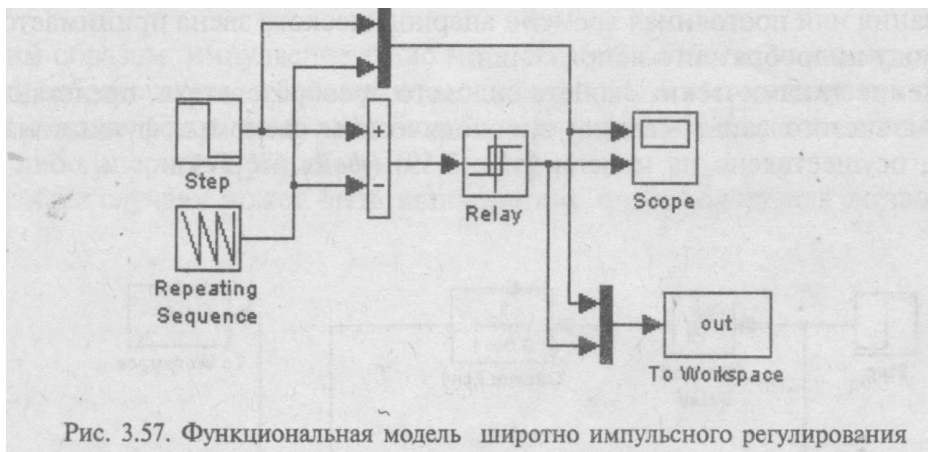


Рис. 3.57. Функциональная модель широтно импульсного регулирования

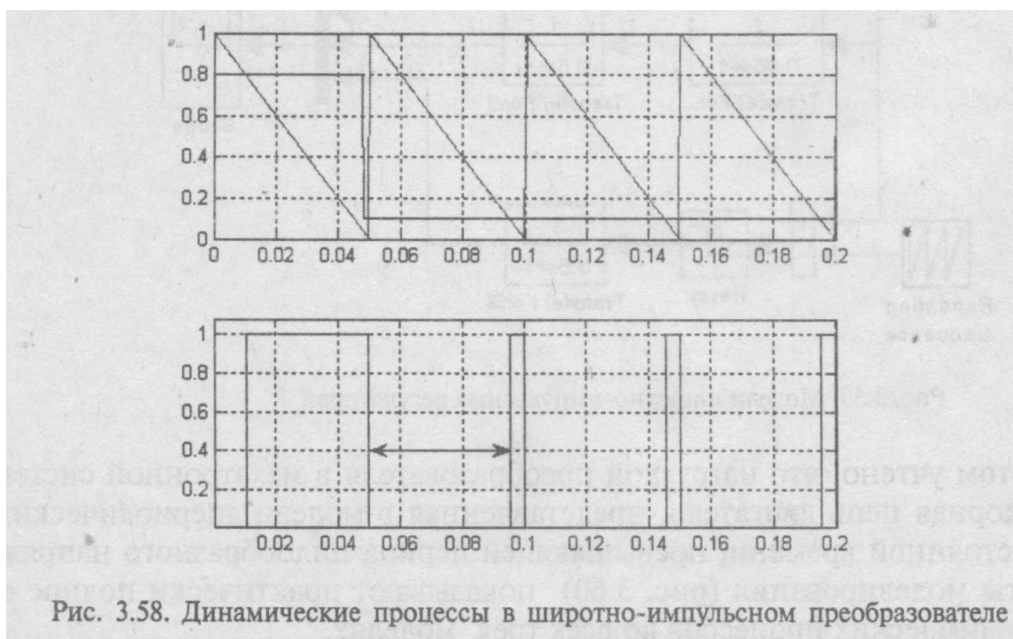


Рис. 3.58. Динамические процессы в широтно-импульсном преобразователе

На рисунке 3.58 показаны сигнал на входе, который в момент $t=0,049$ с. изменяется скачком от величины 0,8 до 0,1 В и сигнал с генератора пилообразного напряжения. На нижнем рисунке показано напряжение на выходе широтно-импульсного преобразователя. Стрелкой показано запаздывание, которое вносит преобразователь во входной сигнал. Время этого запаздывания зависит от момента изменения входного сигнала и от величины его изменения, но не может превышать периода пилообразного напряжения.

Поэтому в общем случае силовой преобразователь является нелинейным динамическим звеном. Частота пилообразного напряжения, которая определяет частоту переключения полупроводниковых элементов преобразователя, в современных системах значительно превышает полосу пропускания системы. Поэтому чаще всего силовой преобразователь рассматривается как безынерционное звено. При необходимости учета динамических свойств преобразователя (эта необходимость определяется разработчиком системы) его представляют либо звеном чи-

стого запаздывания, либо апериодическим звеном. При этом величина запаздывания или постоянная времени апериодического звена принимается равной периоду пилообразного напряжения.

Сравнение динамических свойств силового преобразователя, представленного звеном чистого запаздывания, апериодическим звеном и функциональной моделью, осуществлено на модели (рис. 3.59) (*файл Sil_Prl*).

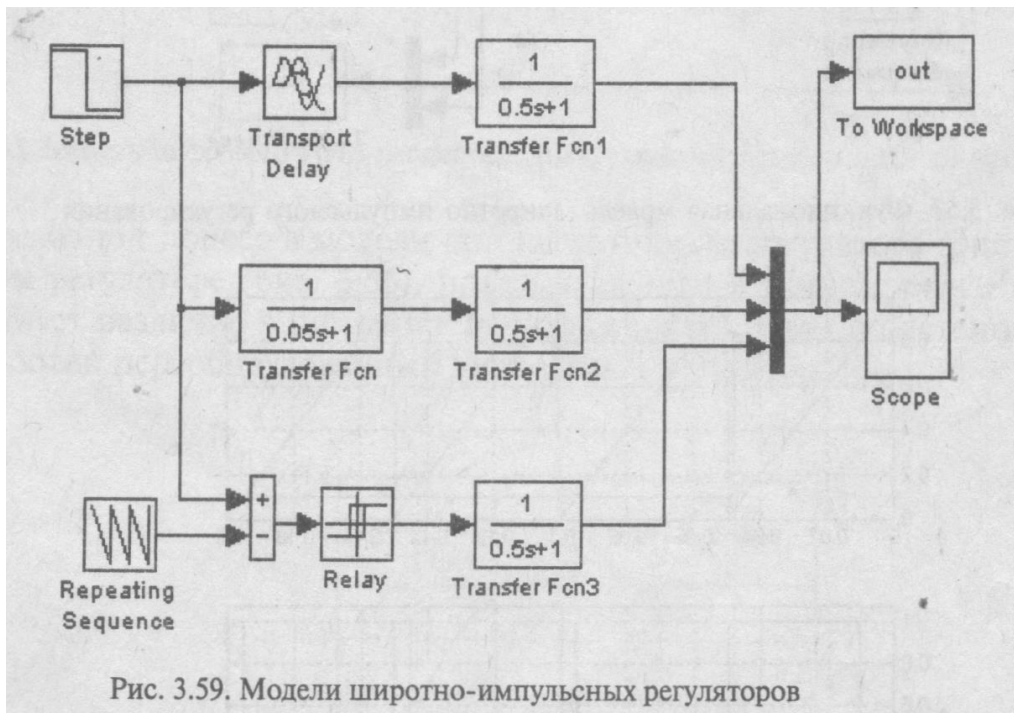


Рис. 3.59. Модели широтно-импульсных регуляторов

При этом учтено, что нагрузкой преобразователя в мехатронной системе является якорная цепь двигателя, представленная в модели апериодическим звеном с постоянной времени, превышающей период пилообразного напряжения. Результаты моделирования (рис. 3.60) показывают практически полное совпадение динамических процессов во всех трех моделях.



Таким образом, импульсное звено мехатронной системы, каким является силовой преобразователь, в большинстве случаев можно рассматривать как непрерывное динамическое звено либо безынерционное, либо звено чистого запаздывания, либо апериодическое звено.

В особых случаях может быть использована функциональная динамическая модель.

Лекция

Тема 2.2.1. Элементы устройств силовой электроники в пакете Sim Power System

ВОПРОСЫ

1. Введение.
2. Пакет расширения Sim Power System. Основные особенности создания моделей.
3. Библиотека пакета расширения Sim Power System:
 - 3.1. Electrical Sources – источники электрической энергии.
 - 3.2. Elements – электротехнические элементы.
 - 3.3. Power Electronics – устройства силовой электроники.
 - 3.4. Measurements – измерительные и контрольные устройства.
 - 3.5. Powerlib Extras – расширенные библиотеки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-БЕК, 2008. – 368 с.

1. Введение

Первые преобразователи электрической энергии появились в 20-х годах прошлого столетия (XX века). Силовыми элементами этих преобразователей служили мощные ламповые тиратроны и игнитроны. Эти преобразователи имели значительные веса и габариты, имели сложные и громоздкие системы охлаждения, были крайне ненадежны. Несмотря на все недостатки, уже тогда они нашли практическое применение в городском и железнодорожном транспорте.

Существенный скачок в развитии преобразовательной техники произошел в шестидесятых годах, когда были созданы первые неуправляемые (диоды) и управляемые (тиристоры) силовые полупроводниковые элементы. Эти элементы позволили создать силовые полупроводниковые неуправляемые и управляемые выпрямители, которые получили широкое распространение на железнодорожном транспорте, в электроприводах постоянного тока и электротермии.

Третий, самый значительный этап в развитии преобразовательной техники наступил с появлением на рынке первоначально биполярных высоковольтных транзисторов и полностью управляемых (GTO) тиристоров, а затем биполярных транзисторов с изолированной базой IGBT (Insuled Gate Bipolar Transistor) и мощных полевых транзисторов MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).

Основной особенностью этого этапа является, можно сказать, революционное изменение техники преобразования энергии. Это изменение базируется на значительном увеличении быстродействия полупроводниковых преобразователей, что, в свою очередь, позволяет существенно уменьшить массу и габариты, повысить КПД и надежность, реализовать широтно-импульсную модуляцию и микропроцессорное управление.

Использование силовых полупроводниковых преобразователей в электроэнергетике, на транспорте, в металлургии и других отраслях дает громадный экономический эффект. Например, в США на сегодняшний день преобразовывается до 70% всей вырабатываемой энергии.

Преобразовательная техника — наука сравнительно молодая. Огромный теоретический вклад в эту науку внесли советские ученые. Учеными Москвы, Ле-

нинграда (Санкт-Петербурга), Киева, Минска, Харькова, Новосибирска, Свердловска (Екатеринбурга) Таллинна, Ташкента, Алма-Аты и др. Были созданы научные школы, много давшие развитию преобразовательной техники.

Однако жизнь выдвигает все новые и новые задачи, и решение этих задач вызывает необходимость дальнейшего развития теории и практики преобразовательной техники. Несомненно, что в этой отрасли ожидаются новые открытия, интересные научные и технические разработки.

2. Пакет расширения Sim Power System. Основные особенности создания моделей

Библиотека блоков Sim Power System является одной из множества дополнительных библиотек Simulink-6, ориентированных на моделирование устройств силовой электроники. В состав библиотеки входят модели пассивных и активных электротехнических элементов, источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи и т. п. оборудования. Имеется также раздел, содержащий блоки для моделирования полупроводниковых устройств, включая системы управления для них. Используя специальные возможности Sim Power System пользователь может не только имитировать работу устройств во временной области, но и выполнять различные виды анализа таких устройств.

Несомненным достоинством Sim Power System является то, что сложные электротехнические системы можно моделировать, сочетая методы виртуального и структурного моделирования. Например, силовую часть полупроводникового преобразователя электрической энергии можно выполнить с использованием виртуальных блоков Sim Power System, а систему управления — с помощью обычных блоков Simulink, отражающих лишь алгоритм работы, а не ее электрическую схему. Такой подход, в отличие от пакетов схемотехнического моделирования, позволяет значительно упростить всю модель, а значит, повысить ее работоспособность и скорость работы. Кроме того, в модели с использованием блоков Sim Power System можно использовать блоки и других библиотек Simulink, а также функции MATLAB, что дает практически неограниченные возможности для моделирования электротехнических систем.

Библиотека Sim Power System достаточно обширна. В случае, если все же нужного блока в библиотеке нет, пользователь имеет возможность создать свой собственный блок как с помощью уже имеющихся в библиотеке блоков (реализуя

возможности Simulink по созданию подсистем), так и на основе блоков основной библиотеки Simulink и управляемых источников тока или напряжения.

Методика создания модели в Sim Power System ничем не отличается от методики создания модели на основе базовой библиотеки Simulink. Так же как и для обычной Simulink-модели, необходимо выполнить расстановку блоков на схеме, задать их параметры, соединить блоки и установить параметры расчета модели в целом. Для моделей пакета расширения Sim Power System доступен ускоренный режим расчета и все возможности Simulink, включая набор инструментов Simulink Performance Tools линейный анализ, отладчик и т. д. Однако эти модели имеют и некоторые особенности [23].

1. Входы и выходы блоков, в отличие от блоков Simulink, не являются направленными, поскольку фактически являются эквивалентами электрических контактов. Таким образом, электрический ток может через вход или выход блока протекать в двух направлениях - как вовнутрь блока, так и наружу. Изображение порта на пиктограмме блока представляет собой небольшой квадрат. Эти порты не являются направленными, что соответствует физической природе сигнала, проходящего через такие порты (электрический ток).

2. Соединительные линии между блоками являются, по сути, моделями электрических проводов, по которым ток может протекать в двух направлениях. В Simulink-моделях информационный сигнал распространяется только в одном направлении — от выхода одного блока к входу другого.

3. Simulink-блоки и Sim Power System-блоки не могут быть непосредственно соединены друг с другом, поскольку имеют сигналы разной природы. Сигнал от S-блока можно передать к SPS-блоку через управляемые источники тока или напряжения, а наоборот — с помощью измерителей тока или напряжения.

4. Несколько линий связи (проводов) могут быть соединены между собой. Для выполнения такого соединения в Sim Power System 3 не требуется использование специальных блоков (соединителей), как это было в предшествующих версиях.

5. При расчете схемы, содержащей нелинейные блоки, следует использовать методы:

- ode 15s — многошаговый метод переменного порядка;
- ode23tb — неявный метод Рунге-Кутты.

3. Библиотека пакета Sim Power Systems 3

Библиотека Sim Power Systems имеет семь основных разделов (рис. 4.1):

1. *Electrical Sources* — источники электрической энергии;
2. *Elements* — электротехнические элементы;
3. *Power Electronics* — устройства силовой электроники;
4. *Machines* — электрические машины;
5. *Measurements* — измерительные и контрольные устройства;
6. *Application Library* — библиотека инженерных приложений;
7. *Extra Library* — дополнительные библиотеки.

Используя блоки из этих разделов, пользователь в состоянии за короткое время создать полноценную модель достаточно сложной электромеханической системы. В основной библиотеке находится также блок Powergui, используемый для анализа электрических схем.

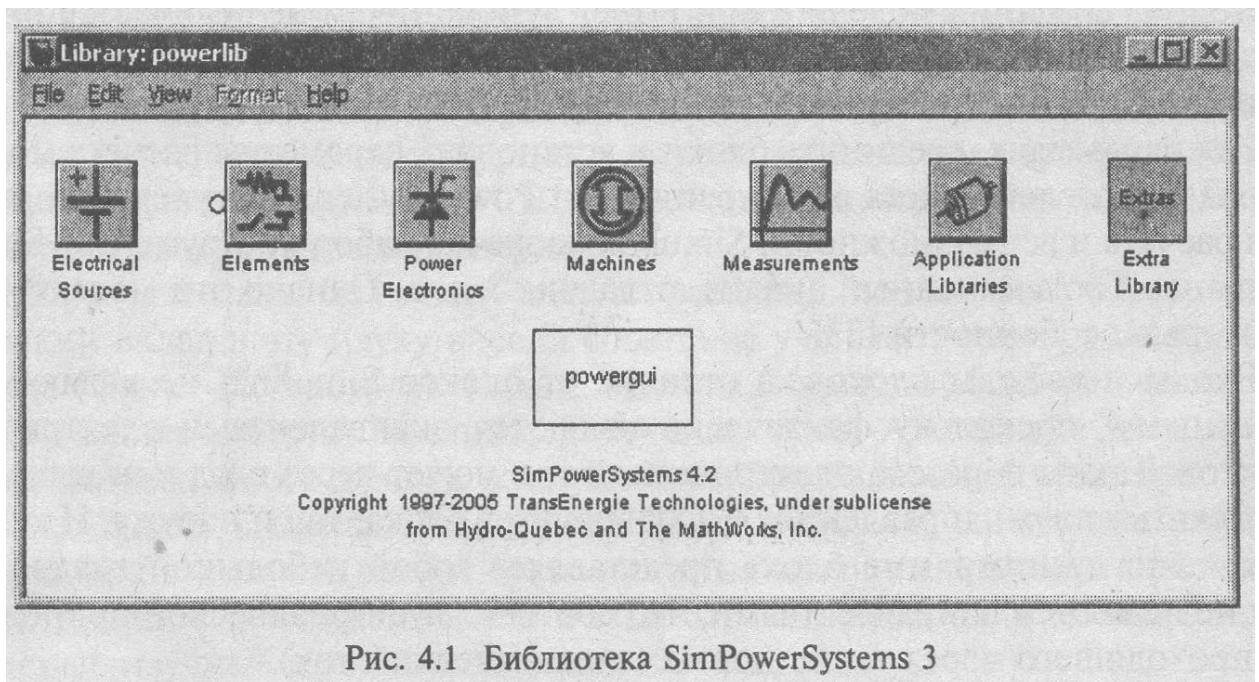
Данный блок обеспечивает выполнение следующих задач:

- 1) расчет схемы комплексным методом;
- 2) расчет установившегося режима;
- 3) дискретизация модели;
- 4) задание начальных условий;
- 5) инициализация трехфазных схем, содержащих электрические машины, таким образом, чтобы расчет начался с установившегося режима;
- 6) частотный анализ схемы с помощью инструмента Use LTI Viewer;
- 7) определение полного сопротивления (импеданса) цепи;
- 8) выполнение гармонического анализа;
- 9) определение матрицы уравнений модели в пространстве состояний.

Ниже дается краткое описание пяти библиотек, библиотеки *Machines*, *Application Library* рассматриваются в отдельных 6, 7, 8 и 9 главах.

3.1. Electrical Sources - источники электрической энергии

Эта библиотека содержат неуправляемые и управляемые источники постоянного и переменного напряжения и тока (рис. 4.2). В полях окна настройки параметров каждого блока устанавливаются значения амплитуды напряжения, начальной фазы и частоты.



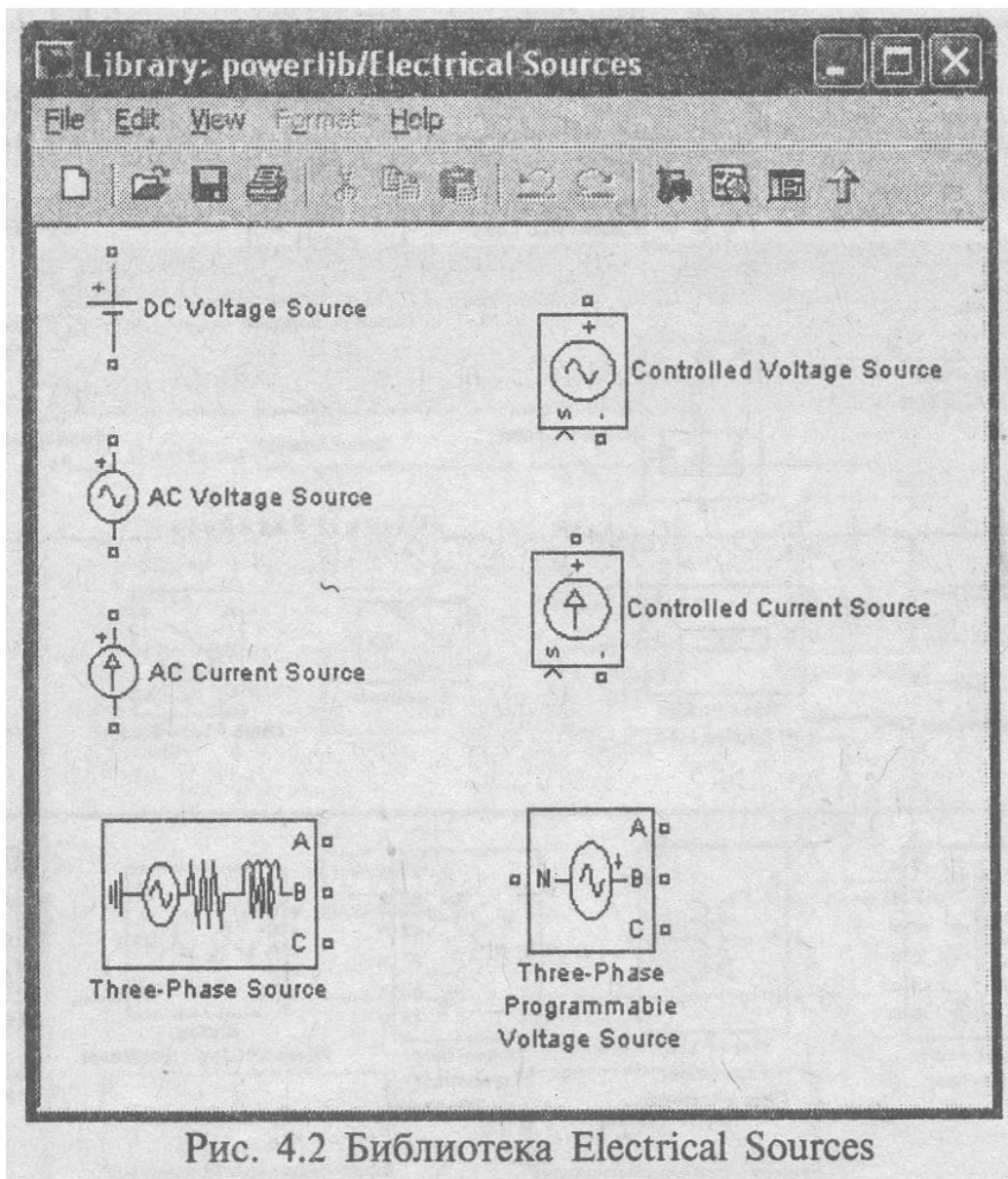


Рис. 4.2 Библиотека Electrical Sources

Поле «Measurements» позволяет подключать блок Multimeter для измерения и наблюдения выходных параметров источника.

Блоки управляемых источников позволяют связать структурные или функциональные схемы основных библиотек «Simulink Blok Library» с элементами библиотеки Sim Power System.

3.2. Elements - электротехнические элементы

На рис. 4.3 представлен состав этой библиотеки, она содержит:

1. Последовательные и параллельные, однофазные и трехфазные пассивные элементы R, L, C, которые могут быть заданы в параметрах этих элементов (Ом, Генри, Фарада «RLC Branch»), а могут быть заданы значениями активной, реактивной индуктивной, либо реактивной емкостной мощностей («RLC Load»).

2. Однофазные и трехфазные магнитосвязанные цепи (цепи с взаимной индукцией) (Mutual Inductance, Three-phase Mutual Inductance).

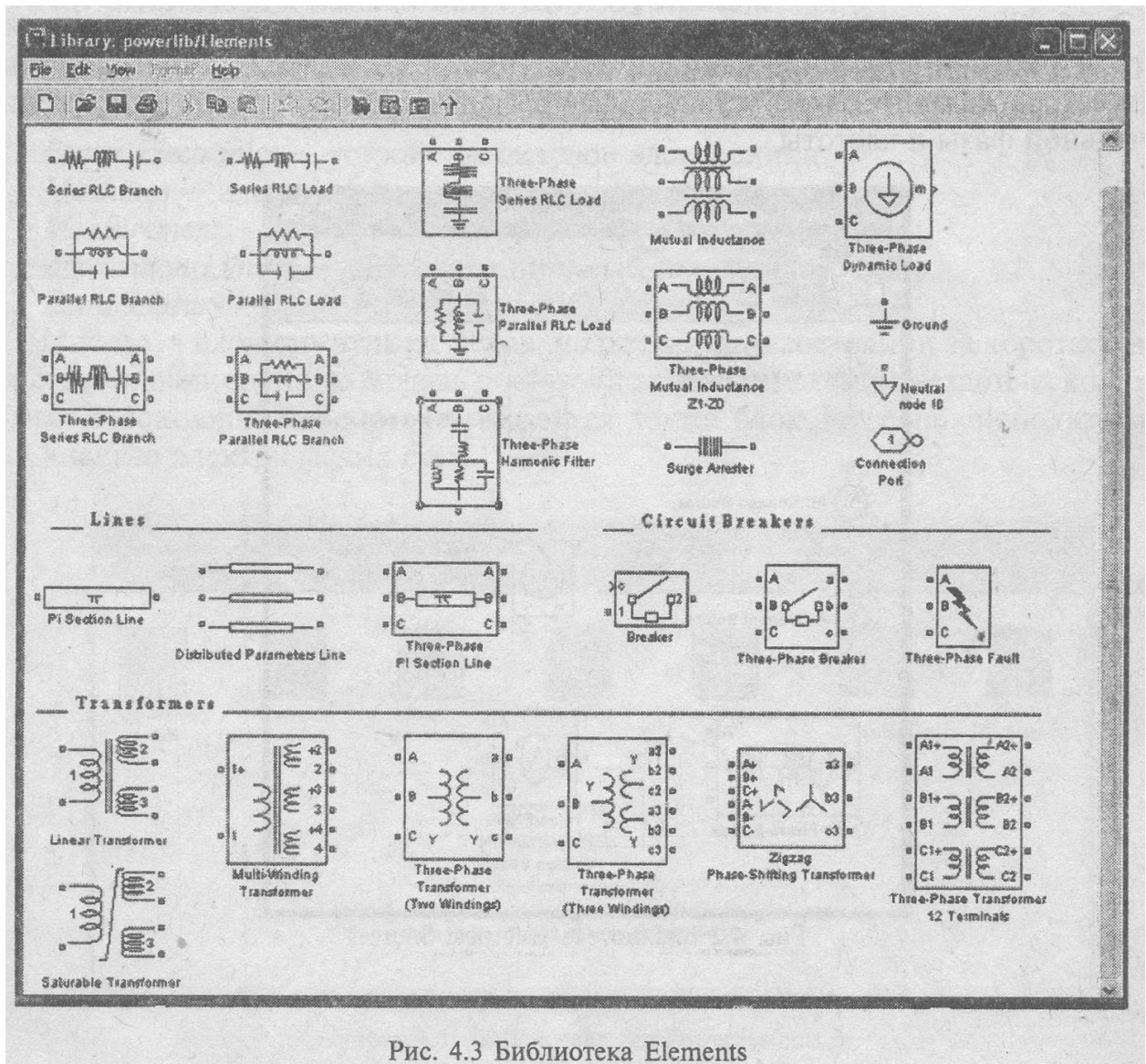


Рис. 4.3 Библиотека Elements

3. Линейные однофазные и трехфазные трансформаторы (Linear Transformer, Three-Phase Transformer) и трансформатор с реальным магнитным сердечником, учитывающим его насыщение (Saturable Transformer).

4. Нелинейный элемент (Surge Arrester), позволяющий сформировать требуемую нелинейную зависимость между входным и выходным сигналами.

5. Однофазный и трехфазный ключ (Breaker), параметры (сопротивление, индуктивность) которого в открытом состоянии задаются в полях настройки. Там же задается состояние ключа (открыт, закрыт) при нулевом входном сигнале.

6. Трехфазный двухобмоточный и трехобмоточный трансформаторы (Three-Phase Transformer, Two windings, Three windings).

7. Блоки, реализующие параметры однофазной и трехфазной линии передачи (PI Section Line, Distributed Parameters Line).

3.3. Power Electronics - устройства силовой электроники

В библиотеке устройств силовой электроники (рис. 4.4) находятся модели полупроводниковых приборов (диод, тиристор, запираемый тиристор, IGBT и MOSFET транзисторы), а также универсальный мост, позволяющий моделировать одно-, двух- и трехфазные выпрямительные или инверторные схемы. Кроме того, в библиотеке присутствует модель трехуровневого моста и модель идеального ключа.

Каждый единичный полупроводниковый элемент содержит выход m , на котором с помощью измерительных приборов можно посмотреть форму напряжения и тока на элементе и измерить их значения. Все блоки имеют управляющие входы, обозначенные буквой g .

В дополнительных библиотеках Extras помещены дополнительные дискретные и непрерывные блоки управления.

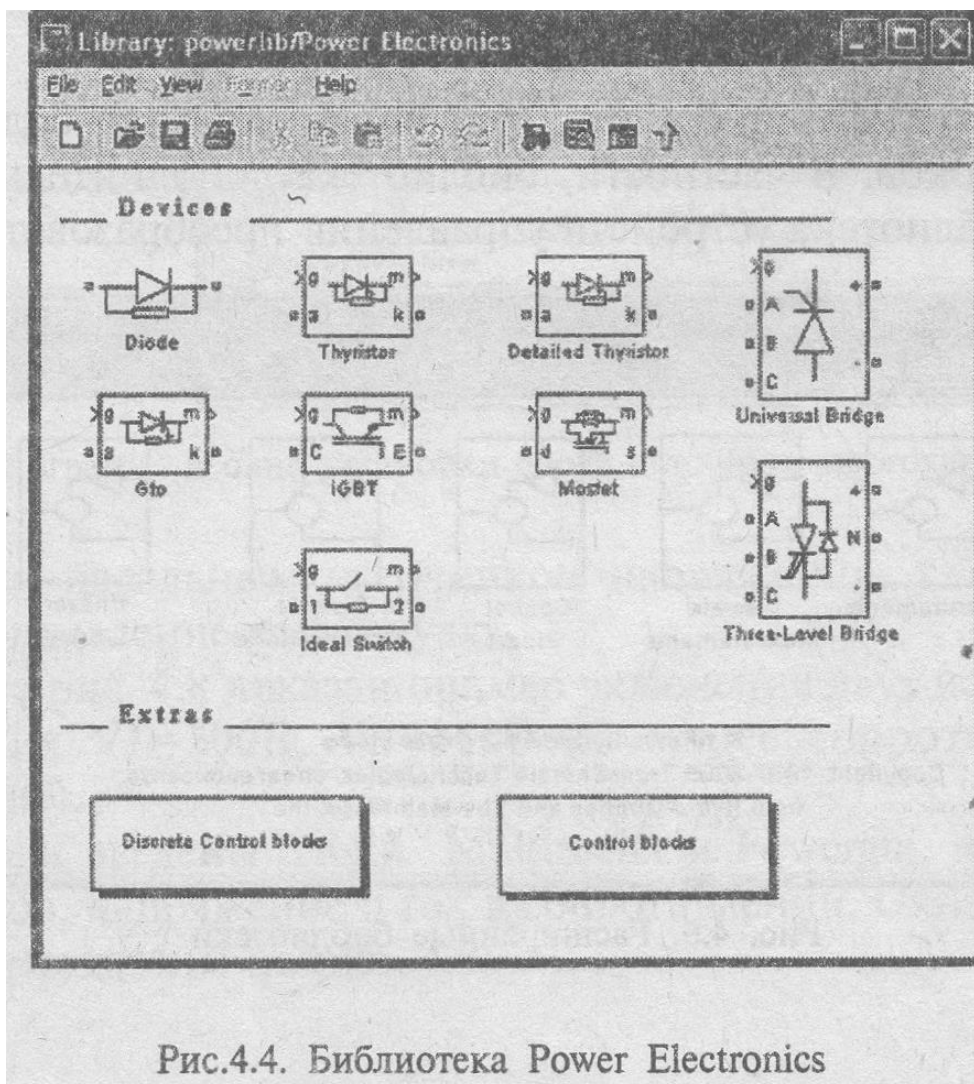


Рис.4.4. Библиотека Power Electronics

3.4. Measurements - измерительные и контрольные устройства

Библиотека измерительных устройств показано на рис. 4.5.

В библиотеке измерительных устройств находятся блоки измерения мгновенного значения тока и напряжения, блок измерения токов и напряжений в трехфазной системе, измеритель полного сопротивления участка электрической схемы, а также блок Multimeter, позволяющий измерять переменные блоков без непосредственного подключения измерительных устройств. Блок Multimeter аккумулирует переменные тех блоков, для которых в окне их параметров в графе Measurement заданы измеряемые переменные. Выходными сигналами измерительных блоков являются обычные сигналы Simulink, которые можно подать на блоки отображения (Scope, Display) или на вход любого обычного Simulink-блока.

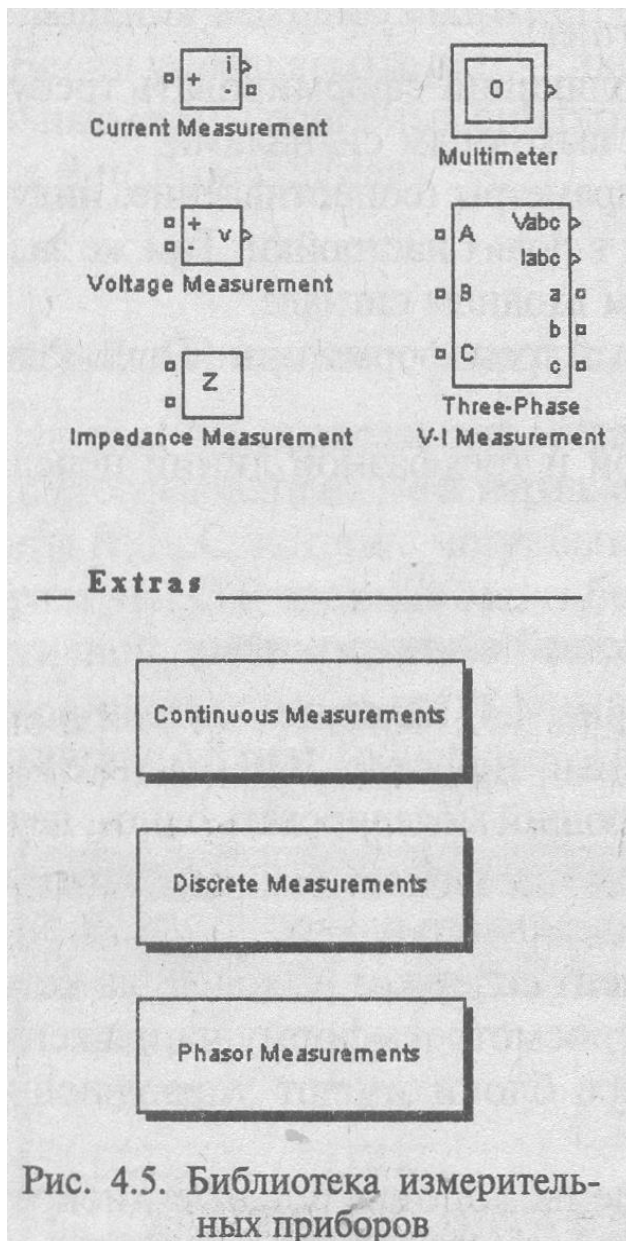


Рис. 4.5. Библиотека измерительных приборов

3.5. Powerlib Extras - расширенные библиотеки

Среди дополнительных библиотек (рис. 4.6) находится большое количество разнообразных блоков. В частности, библиотека дополнительных измерительных приборов, библиотека устройств управления преобразователями и т. д.

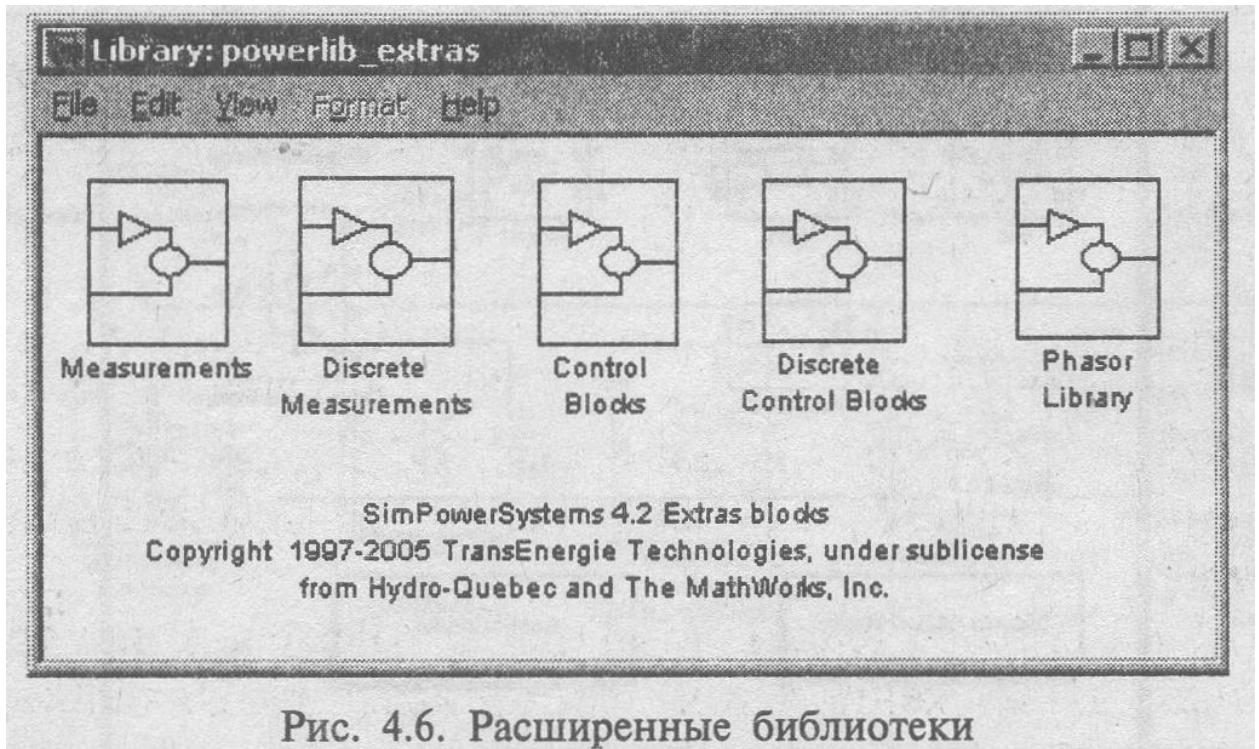


Рис. 4.6. Расширенные библиотеки

Пакет расширения Sim Power System обеспечивает широкие возможности для расчета электротехнических устройств и систем и в настоящее время может считаться одним из лучших пакетов для моделирования устройств силовой электроники.

Рассмотрим основные элементы силовых полупроводниковых преобразователей и их представление в пакете Sim Power System.

В примерах, помещенных ниже, будут одновременно показаны возможности пакетов Simulink, Control System и Sim Power System по визуализации, измерению и исследованию электромагнитных процессов в схемах.

Лекция

Тема 2.1.2. Пакет Simulink – визуальная среда проектирования мехатронных систем

ВОПРОСЫ

1. Общие вопросы создания моделей в пакете Simulink.
 - Обзорщик разделов библиотек в пакете Simulink.
 - Создание модели.
2. Установка параметров расчета и его выполнение.

- Установка параметров обмена с рабочей областью.
- Выполнение расчета.

ЛИТЕРАТУРА

2. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

1. Общие вопросы создания моделей в пакете Simulink

а. Обзорщик разделов библиотек в пакете Simulink

Библиотека Simulink представляет собой набор визуальных блоков, используя которые можно исследовать практически любую мехатронную систему. Практически для всех блоков существует возможность настройки параметров. Параметры настройки отражаются в полях окна настройки выбранного блока. Кнопка Help в окне настройки открывает подробную информацию о блоке и его параметрах настройки.

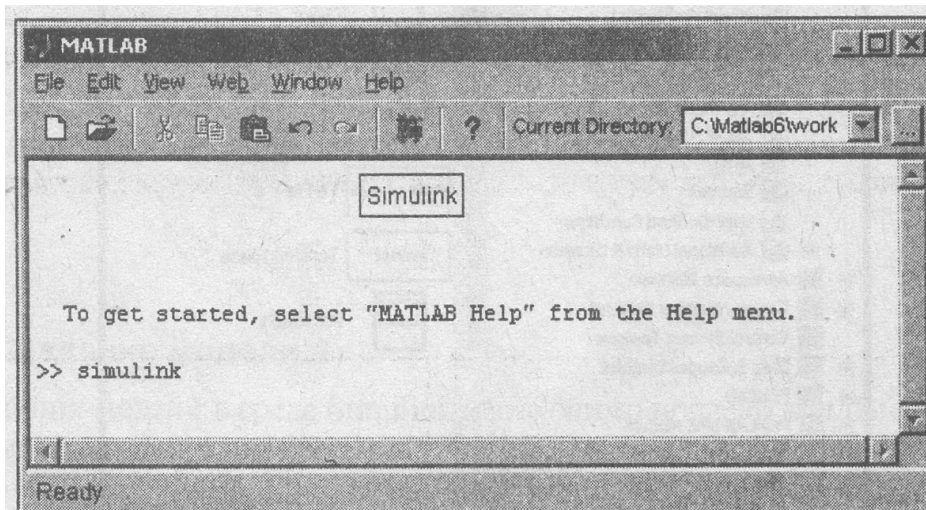


Рис. 2.1. Основное окно программы Matlab

Для запуска программы необходимо предварительно запустить пакет MATLAB. Основное окно пакета MATLAB показано на рис. 2.1. Там же показана подсказка, появляющаяся в окне при наведении указателя мыши на ярлык Simulink в панели инструментов. Запуск программы Simulink приводит к открытию окна обзорщика разделов библиотеки Simulink (рис. 2.2).

Окно обзорщика разделов библиотек содержит следующие элементы:

- Заголовок, с названием окна — SimulinkLibraryBrowser.
- Меню, с командами File, Edit, View, Help.
- Панель инструментов, с ярлыками наиболее часто используемых команд.
- Окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном блоке.
- Список разделов библиотеки, реализованный в виде дерева.

Управление цифровых образовательных технологий

- Окно содержимого раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков).
- Строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию.

На рис. 2.2 выделен раздел Sinks в основной библиотеке Simulink (в левой части окна) и показаны его блоки (в правой части окна).

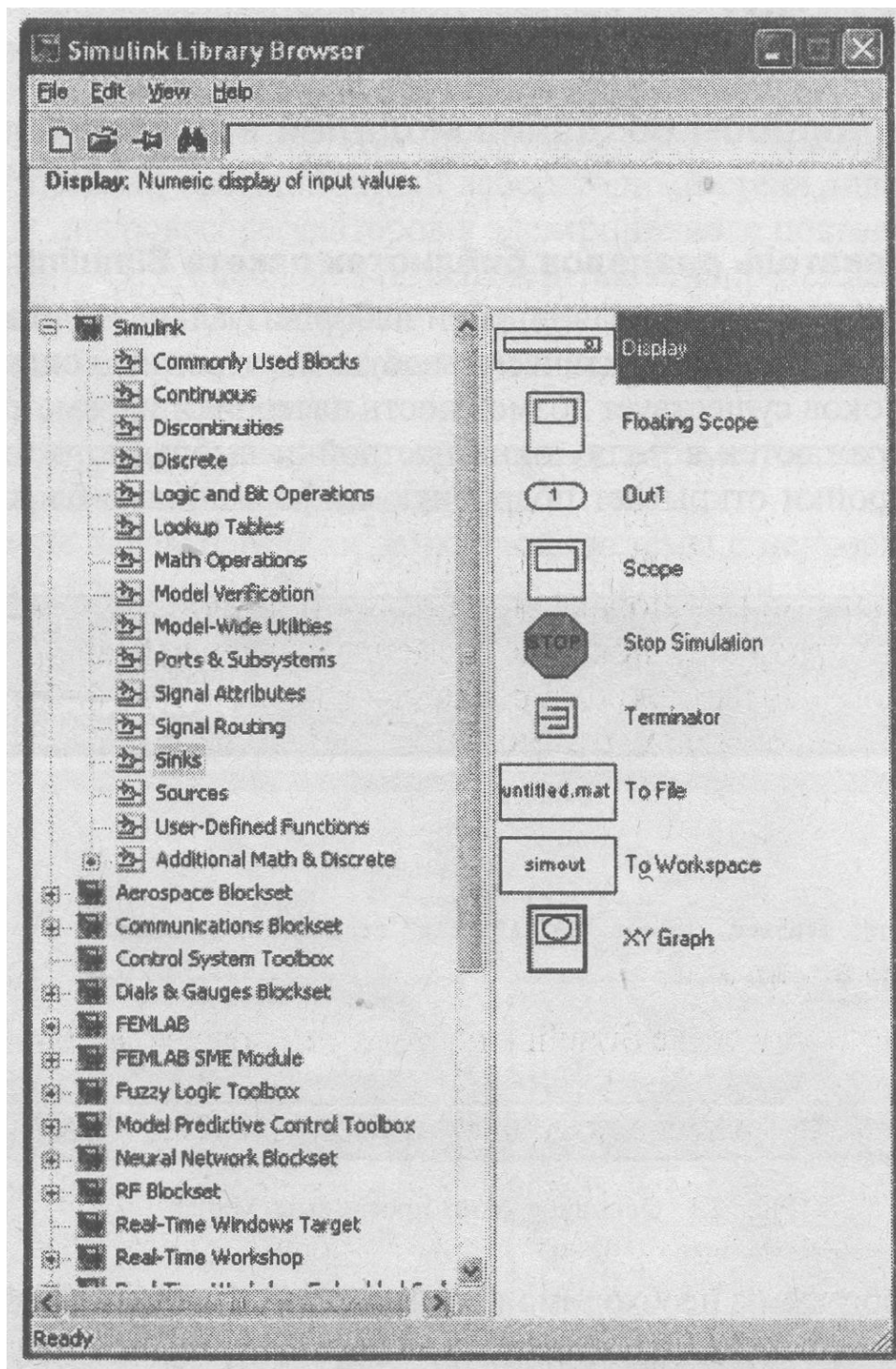


Рис. 2.2. Окно обозревателя разделов библиотеки Simulink

Библиотека Simulink содержит следующие основные разделы:

- ❖ *CommonlyUsedBlocks*— обычно используемые блоки.
- ❖ *Continuous*— линейные блоки.
- ❖ *Discontinuous*— нелинейные блоки.
- ❖ *Discrete*— дискретные блоки.

- ❖ *LogicandBitOperation* —логические и битовые операции.
- ❖ *LookupTables*— таблицы соответствия.
- ❖ *MathOperation*— математические операции.
- ❖ *Model Verification*— проверка модели.
- ❖ *Model- Wide Utilities* — таблицы.
- ❖ *Ports & Subsystems* —порты и подсистемы.
- ❖ *Signal Attributes* —параметры сигнала.
- ❖ *Signal Routing* -направление сигнала.
- ❖ *Sinks* — регистрирующие устройства.
- ❖ *Sources*— источники сигналов и воздействий.
- ❖ *User-DefinenFunctions*— функции пользователя
- ❖ *AditionMath&Diskrete*— дополнительные математические и дискретные блоки.

Список разделов библиотеки Simulinkпредставлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида.

При выборе соответствующего раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое (Рис.2.2).

Для работы с окном используются команды, собранные в меню. Меню обозревателя библиотек содержит следующие пункты:

- *File*(Файл) — Работа с файлами библиотек.
- *Edit*(Редактирование) — Добавление блоков и их поиск (по названию).
- *View*(Вид) — Управление показом элементов интерфейса.
- *Help*(Справка) — Вывод окна справки по обозревателю библиотек.

Для работы с обозревателем можно также использовать кнопки на панели инструментов.

1.2. Создание модели

Для создания модели в среде Simulinkнеобходимо последовательно выполнить ряд действий:

Создать новый файл модели с помощью команды *File/New/Model*, или используя кнопку *Q* на панели инструментов (здесь и далее с помощью символа «/»

указаны пункты меню программы, которые необходимо последовательно выбрать для выполнения указанного действия). Вновь созданное окно модели показано на рис. 2.3.

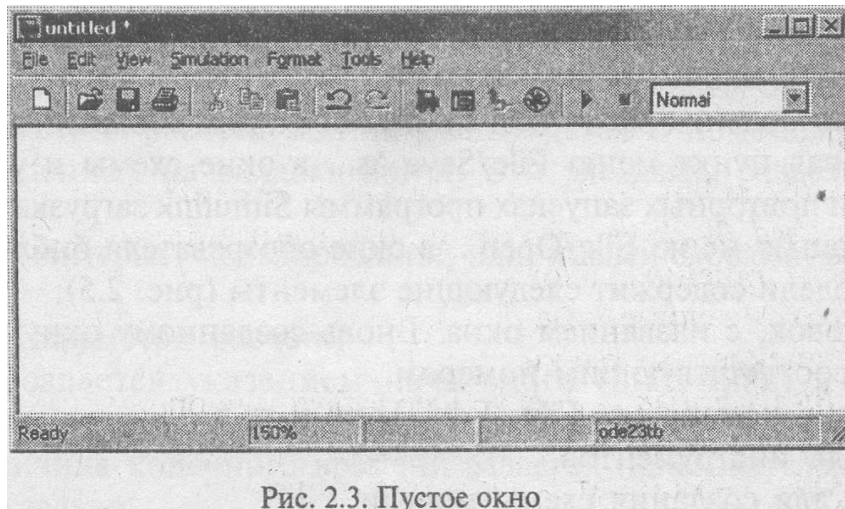


Рис. 2.3. Пустое окно

Расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки (Например, Sources— Источники). Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу «мыши» — «перетащить» блок в созданное окно. Клавишу мыши нужно держать нажатой.

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу «мыши»), а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре.

Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные программой «по умолчанию». Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей «мыши», указав курсором на изображение блока. Откроется окно настройки параметров данного блока. После внесения изменений нужно закрыть окно кнопкой ОК.

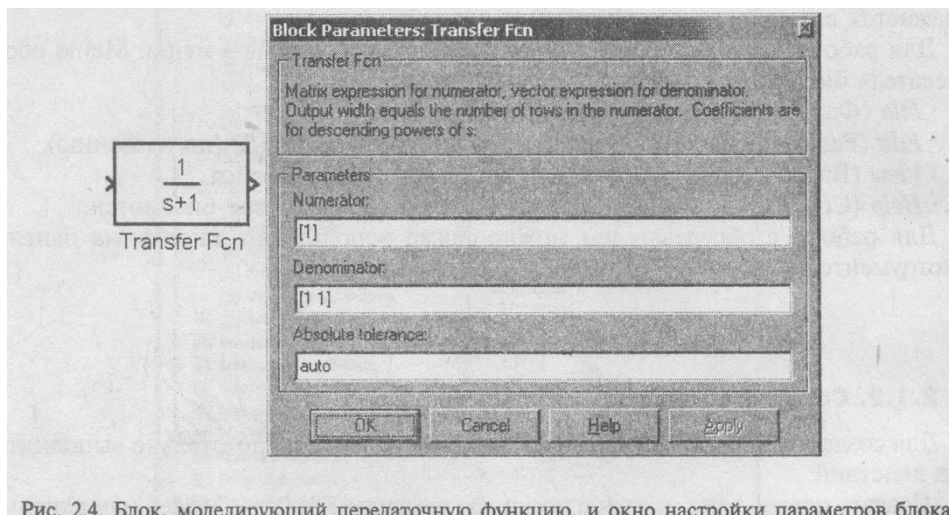


Рис. 2.4. Блок, моделирующий передаточную функцию, и окно настройки параметров блока

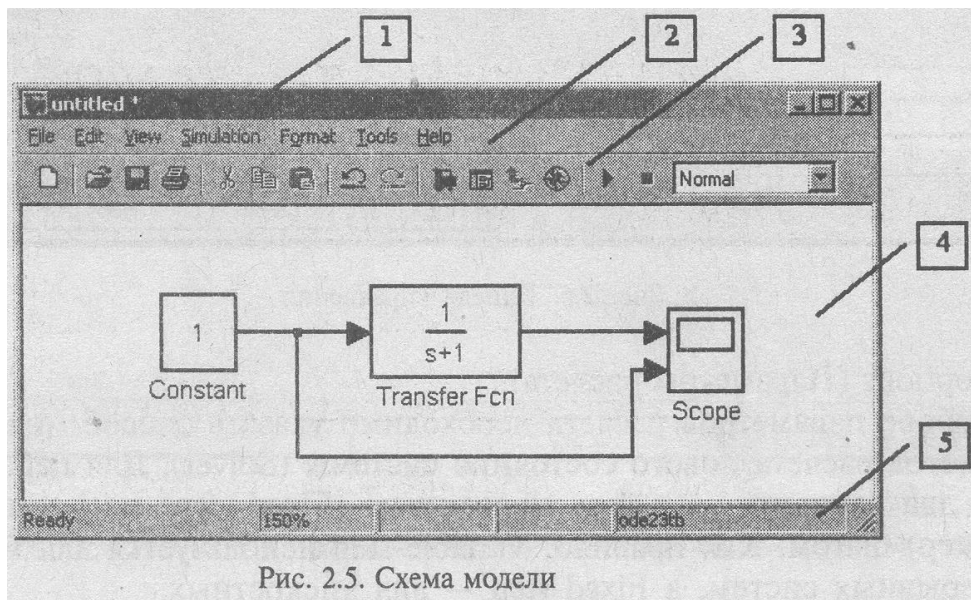
На рис. 2.4 в качестве примера показаны блок, моделирующий передаточную функцию, и окно настройки параметров данного блока.

После установки на схеме всех блоков из требуемых библиотек нужно выполнить соединение элементов схемы. Схема модели, в которой выполнены соединения между блоками, показана на рис. 2.5.

После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню File/SaveAs... в окне схемы и указав папку и имя файла. При повторных запусках программы Simulink загрузка схемы осуществляется с помощью меню File/Open... в окне обозревателя библиотеки.

Окно модели содержит следующие элементы (рис. 2.5):

5. Заголовок, с названием окна. Вновь созданному окну присваивается имя Untitledc соответствующим номером.
6. Меню с командами File, Edit, View и т. д.
7. Панель инструментов.
8. Окно для создания схемы модели.
5. Строка состояния, содержащая информацию о текущем состоянии модели.
14. Меню окна содержит команды для редактирования модели, ее настройки и управления процессом расчета, работы с файлами и т. п.:
15. *File*(Файл) - Работа с файлами моделей.
16. *Edit*(Редактирование) - Изменение модели и поиск блоков.
17. *View*(Вид) - Управление показом элементов интерфейса.
18. *Simulation*(Моделирование) - Задание настроек для моделирования и управление процессом расчета.
19. *Format*(Форматирование) - Изменение внешнего вида блоков и модели в целом.
20. *Tools*(Инструментальные средства) - Применение специальных средств для работы с моделью (отладчик, линейный анализ и т. п.)
21. *Help*(Справка) - Вывод окон справочной системы.



3. Установка параметров расчета и его выполнение

Перед выполнением расчетов, необходимо предварительно задать параметры расчета. Задание параметров расчета выполняется в панели управления меню Simulation/ConfigurationParameters(вкладка Solver). Вид панели управления приведен на рис. 2.6. Ниже коротко описаны только те функции, которые используются в дальнейшем при моделировании устройств мехатроники.

Установка параметров расчета модели выполняется с помощью элементов управления, размещенных на вкладке Solver. Эти элементы разделены на две группы:

3. Simulationtime(Интервал моделирования, или, иными словами, время расчета),
4. Solver options (Параметры расчета).

Время расчета задается указанием начального (Starttime) и конечного (Stoptime) значений времени расчета. Начальное время, как правило, задается равным нулю. Величина конечного времени задается пользователем исходя из условий решаемой задачи.

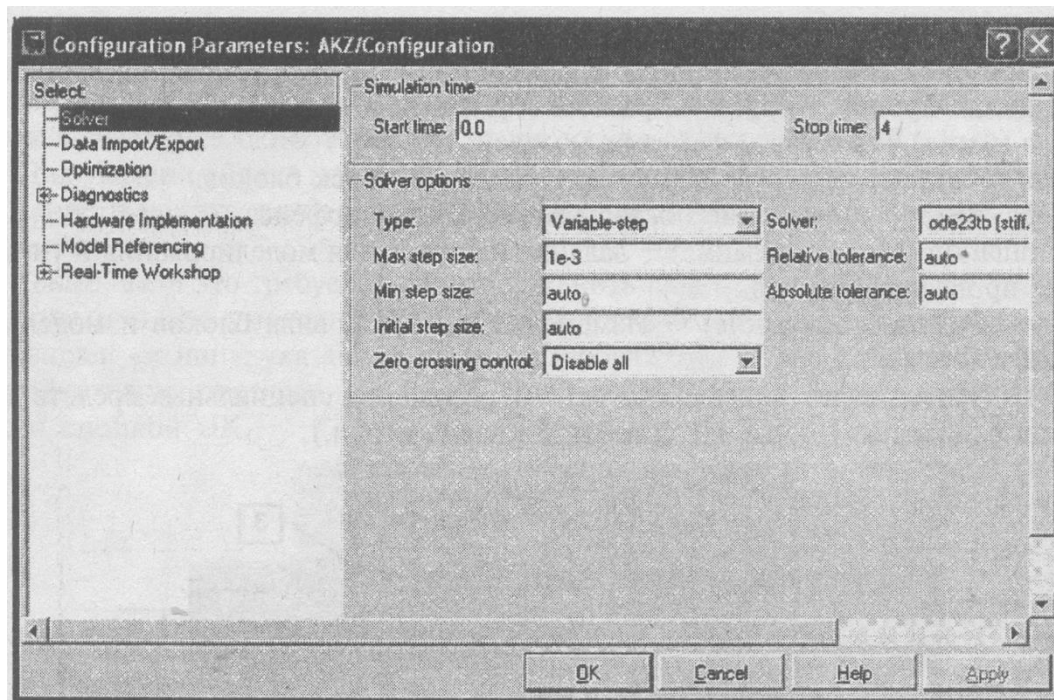


Рис. 2.6. Панель управления

При выборе параметров расчета необходимо указать способ моделирования (Type) и метод расчета нового состояния системы (Solver). Для параметра Type доступны два варианта — с фиксированным (Fixed-step) или с переменным (Variable-step) шагом. Как правило, Variable-step используется для моделирования непрерывных систем, а Fixed-step — для дискретных.

Список методов расчета нового состояния системы (Solver) содержит несколько вариантов. Эти методы различны для переменного (Variable-step) и для фиксированного (Fixed-step) шага времени, но, по сути, представляют собой процедуры решения систем дифференциальных уравнений. Величина шага моделирования по умолчанию устанавливается системой автоматически (auto). Требуемая величина шага может быть введена вместо значения auto. При выборе Variable-step в области появляются поля для установки трех параметров:

4. Maxstepsize- максимальный шаг расчета. По умолчанию он устанавливается автоматически (auto) и его значение в этом случае равно $(\text{StopTime} - \text{StartTime})/50$. Довольно часто это значение оказывается слишком большим, и наблюдаемые графики представляют собой ломаные (а не плавные) линии. В этом случае величину максимального шага расчета необходимо задавать явным образом.
5. Minstepsize—минимальный шаг расчета.
6. Initialstepsize— начальное значение шага моделирования.

При моделировании непрерывных систем с использованием переменного шага необходимо указать точность вычислений: относительную (Relativetolerance) и абсолютную (Absolutetolerance). По умолчанию они равны соответственно 10—3 и auto.

Установка параметров обмена с рабочей областью

Элементы, позволяющие управлять вводом и выводом в рабочую область MATLAB промежуточных данных и результатов моделирования, расположены на вкладке DataImport/Export(рис. 2.7).

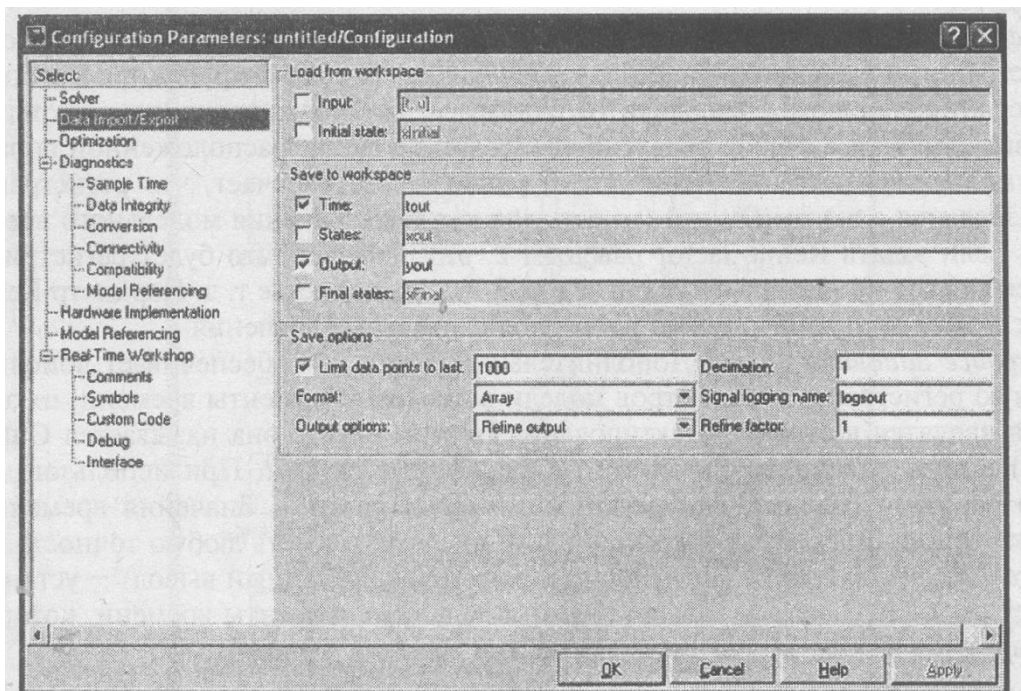


Рис. 2.7. Вкладка Workspace I/O диалогового окна установки параметров моделирования

Элементы вкладки разделены на 3 поля:

4. *Loadfromworkspace*(Загрузить из рабочей области). Если флажок Input(Входные данные) установлен, то в расположенном справа текстовом поле можно ввести формат данных, которые будут считываться из рабочей области Matlab. Установка флажка InitialState(Начальное состояние) позволяет ввести в связанном с ним текстовом поле имя переменной, содержащей параметры начального состояния модели. Данные, указанные в полях Inputи InitialState, передаются в исполняемую модель посредством одного или более блоков In(из раздела библиотеки Sources).
5. *Savetoworkspace*(Записать в рабочую область) — позволяет установить режим вывода значений сигналов в рабочую область MATLABи задать их имена.

6. *Saveoptions*(Параметры записи) — задает количество строк при передаче переменных в рабочую область. Если флажок *Limitrowstolast* установлен, то в поле ввода можно указать количество передаваемых строк (отсчет строк производится от момента завершения расчета). Если флажок не установлен, то передаются все данные. Параметр *Decimation*(Разряжение) задает шаг записи переменных в рабочую область. Параметр *Format*(формат данных) задает формат передаваемых в рабочую область данных. Доступные форматы *Array*(Массив), *Structure*(Структура), *StructureWithTime*(Структура с дополнительным полем — «время»).

Outputoptions(Параметры вывода) - задает настройки параметров вывода выходных сигналов моделируемой системы. Возможен выбор одного из трех вариантов:

- *Refineoutput*(Скорректированный вывод) — позволяет изменять дискретность регистрации модельного времени и тех сигналов, которые сохраняются в рабочей области Matlabc помощью блока To Workspace. Установка величины дискретности выполняется в строке редактирования *Refinefactor*, расположенной справа. По умолчанию значение *Refinefactor* равно 1, это означает, что регистрация производится с шагом $\Delta t = 1$ (то есть для каждого значения модельного времени:). Если задать *Refinefactor* равным 2, это означает, что будет регистрироваться каждое второе значение сигналов, 3 — каждое третье т. д. Параметр *Refinefactor* может принимать только целые положительные значения
- *Produceadditionaloutput*(Дополнительный вывод) — обеспечивает дополнительную регистрацию параметров модели в заданные моменты времени; их значения вводятся в строке редактирования (в этом случае она называется *Outputtimes*) в виде списка, заключенного в квадратные скобки. При использовании этого варианта базовый шаг регистрации (Δt) равен 1. Значения времени в списке *Outputtimes* могут быть дробными числами и иметь любую точность.
- *Producespecifiedoutputonly*(Формировать только заданный вывод) - устанавливает вывод параметров модели только в заданные моменты времени, которые указываются в поле *Outputtimes*(Моменты времени вывода).

Выполнение расчета

Запуск расчета выполняется с помощью выбора пункта меню Simulation/Start или инструмента ► на панели инструментов. Процесс расчета можно завершить досрочно, выбрав пункт меню Simulation/Stop или инструмент ■ . Расчет также можно остановить (Simulation/Pause) и затем продолжить (Simulation/Continue).

Далее рассмотрим средства пакета Simulink, позволяющие решить задачи анализа, синтеза, расчета и проектирования мехатронных систем. Отдельные библиотеки пакета можно открыть при помощи правой кнопки мышки. Ниже, при описании библиотек, рассматриваются те блоки, которые в дальнейшем используются при моделировании мехатронных устройств.

Лекция

Тема 2.1.2. Пакет Simulink – визуальная среда проектирования мехатронных систем

ВОПРОСЫ

1. Общие вопросы создания моделей в пакете Simulink.
 - Обзорщик разделов библиотек в пакете Simulink.
 - Создание модели.
2. Установка параметров расчета и его выполнение.
 - Установка параметров обмена с рабочей областью.
 - Выполнение расчета.

ЛИТЕРАТУРА

4. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-БЕК, 2008. – 368 с.

1. Общие вопросы создания моделей в пакете Simulink

а. Обзорщик разделов библиотек в пакете Simulink

Библиотека Simulink представляет собой набор визуальных блоков, используя которые можно исследовать практически любую мехатронную систему. Практически для всех блоков существует возможность настройки параметров. Параметры настройки отражаются в полях окна настройки выбранного блока. Кнопка Help в окне настройки открывает подробную информацию о блоке и его параметрах настройки.

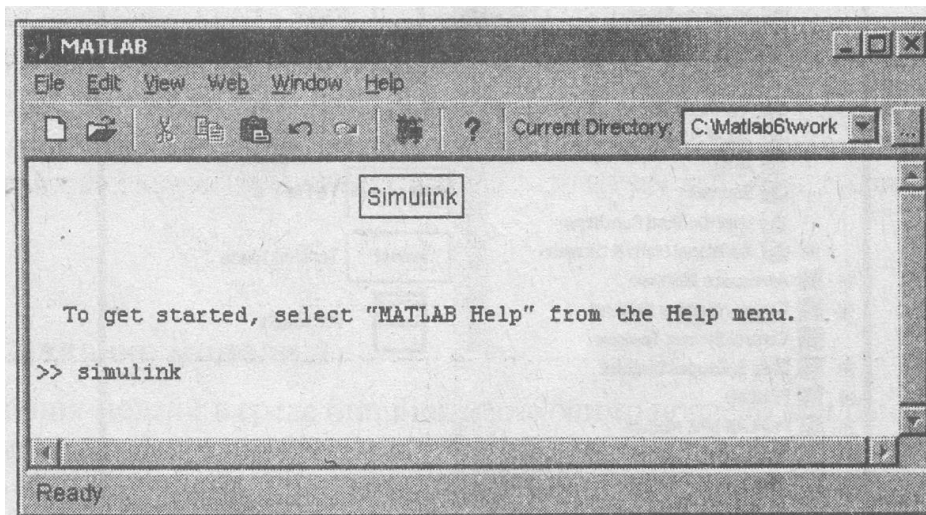


Рис. 2.1. Основное окно программы Matlab

Для запуска программы необходимо предварительно запустить пакет MATLAB. Основное окно пакета MATLAB показано на рис. 2.1. Там же показана подсказка, появляющаяся в окне при наведении указателя мыши на ярлык Simulink панели инструментов. Запуск программы Simulink приводит к открытию окна обозревателя разделов библиотеки Simulink (рис. 2.2).

Окно обозревателя разделов библиотек содержит следующие элементы:

- Заголовок, с названием окна — SimulinkLibraryBrowser.
- Меню, с командами File, Edit, View, Help.
- Панель инструментов, с ярлыками наиболее часто используемых команд.
- Окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном блоке.
- Список разделов библиотеки, реализованный в виде дерева.
- Окно содержимого раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков).
- Строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию.

На рис. 2.2 выделен раздел Sinks в основной библиотеке Simulink (в левой части окна) и показаны его блоки (в правой части окна).

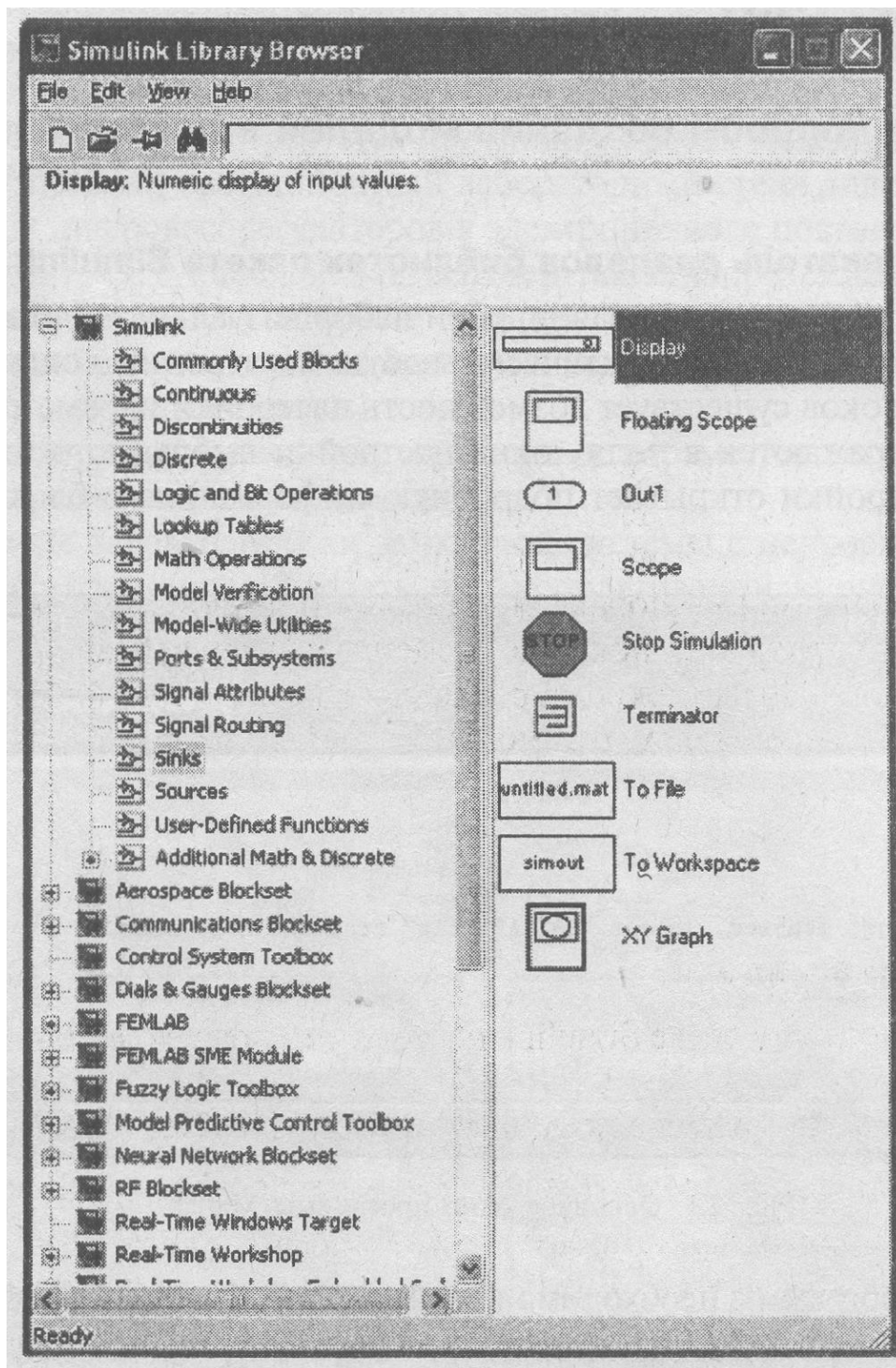


Рис. 2.2. Окно обозревателя разделов библиотеки Simulink

Библиотека Simulink содержит следующие основные разделы:

- ❖ *CommonlyUsedBlocks*— обычно используемые блоки.
- ❖ *Continuous*— линейные блоки.
- ❖ *Discontinuous*— нелинейные блоки.
- ❖ *Discrete*— дискретные блоки.

- ❖ *LogicandBitOperation* —логические и битовые операции.
- ❖ *LookupTables*— таблицы соответствия.
- ❖ *MathOperation*— математические операции.
- ❖ *Model Verification*— проверка модели.
- ❖ *Model- Wide Utilities* — таблицы.
- ❖ *Ports & Subsystems* —порты и подсистемы.
- ❖ *Signal Attributes* —параметры сигнала.
- ❖ *Signal Routing* -направление сигнала.
- ❖ *Sinks* — регистрирующие устройства.
- ❖ *Sources*— источники сигналов и воздействий.
- ❖ *User-DefinenFunctions*— функции пользователя
- ❖ *AditionMath&Diskrete*— дополнительные математические и дискретные блоки.

Список разделов библиотеки Simulinkпредставлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида.

При выборе соответствующего раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое (Рис.2.2).

Для работы с окном используются команды, собранные в меню. Меню обозревателя библиотек содержит следующие пункты:

- *File*(Файл) — Работа с файлами библиотек.
- *Edit*(Редактирование) — Добавление блоков и их поиск (по названию).
- *View*(Вид) — Управление показом элементов интерфейса.
- *Help*(Справка) — Вывод окна справки по обозревателю библиотек.

Для работы с обозревателем можно также использовать кнопки на панели инструментов.

1.2. Создание модели

Для создания модели в среде Simulinkнеобходимо последовательно выполнить ряд действий:

Создать новый файл модели с помощью команды *File/New/Model*, или используя кнопку *Q* на панели инструментов (здесь и далее с помощью символа «/» указаны пункты меню программы, которые необходимо последовательно выбрать для выполнения указанного действия). Вновь созданное окно модели показано на рис. 2.3.

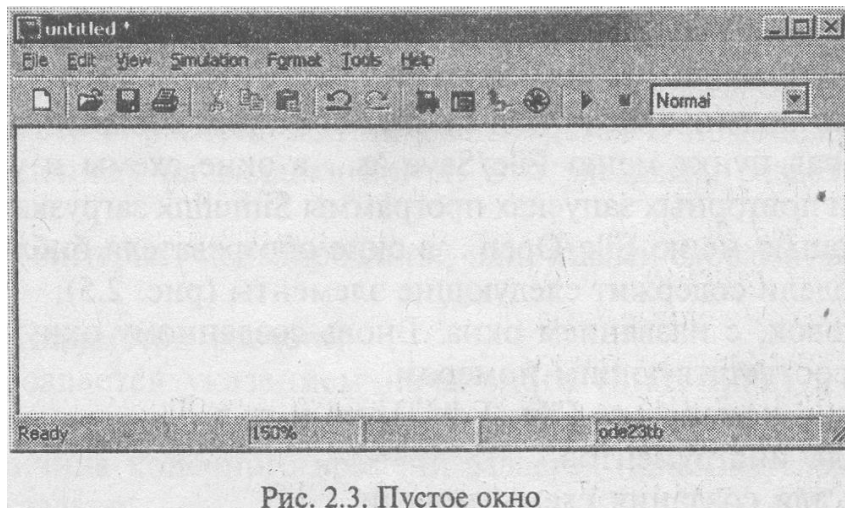


Рис. 2.3. Пустое окно

Расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки (Например, Sources— Источники). Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу «мыши» — «перетащить» блок в созданное окно. Клавишу мыши нужно держать нажатой.

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу «мыши»), а затем нажать клавишу Delete на клавиатуре.

Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные программой «по умолчанию». Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей «мыши», указав курсором на изображение блока. Откроется окно настройки параметров данного блока. После внесения изменений нужно закрыть окно кнопкой ОК.

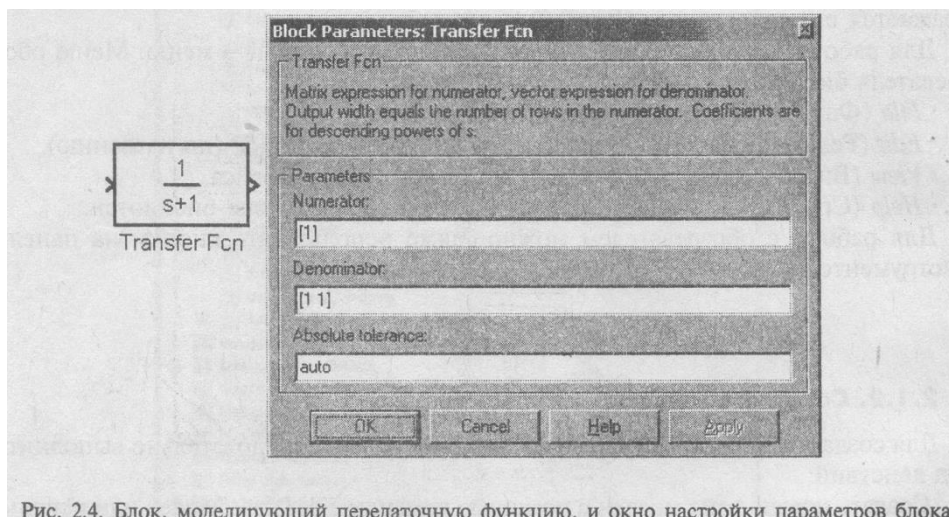


Рис. 2.4. Блок, моделирующий передаточную функцию, и окно настройки параметров блока

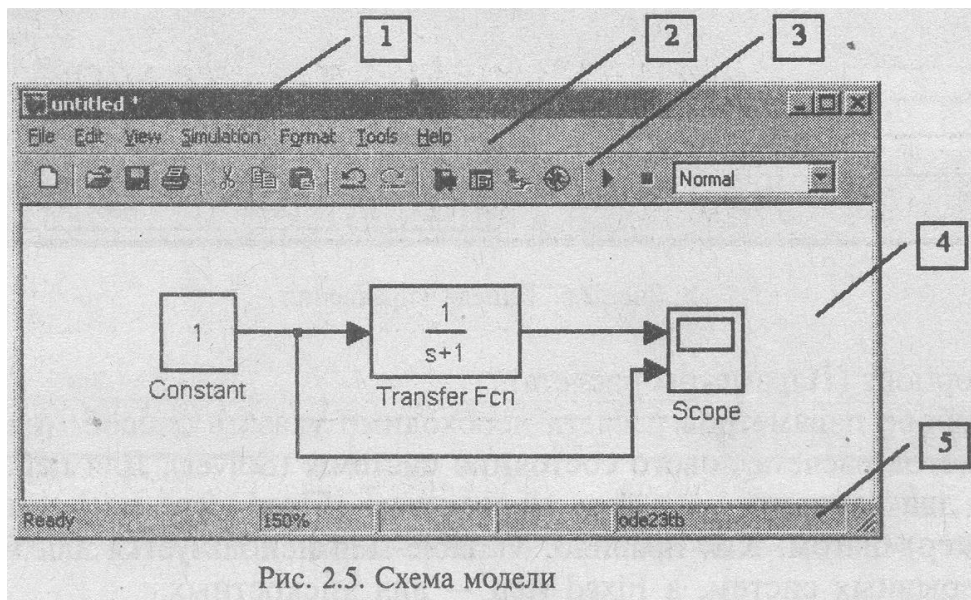
На рис. 2.4 в качестве примера показаны блок, моделирующий передаточную функцию, и окно настройки параметров данного блока.

После установки на схеме всех блоков из требуемых библиотек нужно выполнить соединение элементов схемы. Схема модели, в которой выполнены соединения между блоками, показана на рис. 2.5.

После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню File/SaveAs... в окне схемы и указав папку и имя файла. При повторных запусках программы Simulink загрузка схемы осуществляется с помощью меню File/Open... в окне обозревателя библиотеки.

Окно модели содержит следующие элементы (рис. 2.5):

9. Заголовок, с названием окна. Вновь созданному окну присваивается имя Untitled с соответствующим номером.
10. Меню с командами File, Edit, View и т. д.
11. Панель инструментов.
12. Окно для создания схемы модели.
5. Строка состояния, содержащая информацию о текущем состоянии модели.
22. Меню окна содержит команды для редактирования модели, ее настройки и управления процессом расчета, работы с файлами и т. п.:
23. *File*(Файл) - Работа с файлами моделей.
24. *Edit*(Редактирование) - Изменение модели и поиск блоков.
25. *View*(Вид) - Управление показом элементов интерфейса.
26. *Simulation*(Моделирование) - Задание настроек для моделирования и управление процессом расчета.
27. *Format*(Форматирование) - Изменение внешнего вида блоков и модели в целом.
28. *Tools*(Инструментальные средства) - Применение специальных средств для работы с моделью (отладчик, линейный анализ и т. п.)
29. *Help*(Справка) - Вывод окон справочной системы.



5. Установка параметров расчета и его выполнение

Перед выполнением расчетов, необходимо предварительно задать параметры расчета. Задание параметров расчета выполняется в панели управления меню Simulation/ConfigurationParameters(вкладка Solver). Вид панели управления приведен на рис. 2.6. Ниже коротко описаны только те функции, которые используются в дальнейшем при моделировании устройств мехатроники.

Установка параметров расчета модели выполняется с помощью элементов управления, размещенных на вкладке Solver. Эти элементы разделены на две группы:

5. Simulationtime(Интервал моделирования, или, иными словами, время расчета),
6. Solver options (Параметры расчета).

Время расчета задается указанием начального (Starttime) и конечного (Stoptime) значений времени расчета. Начальное время, как правило, задается равным нулю. Величина конечного времени задается пользователем исходя из условий решаемой задачи.

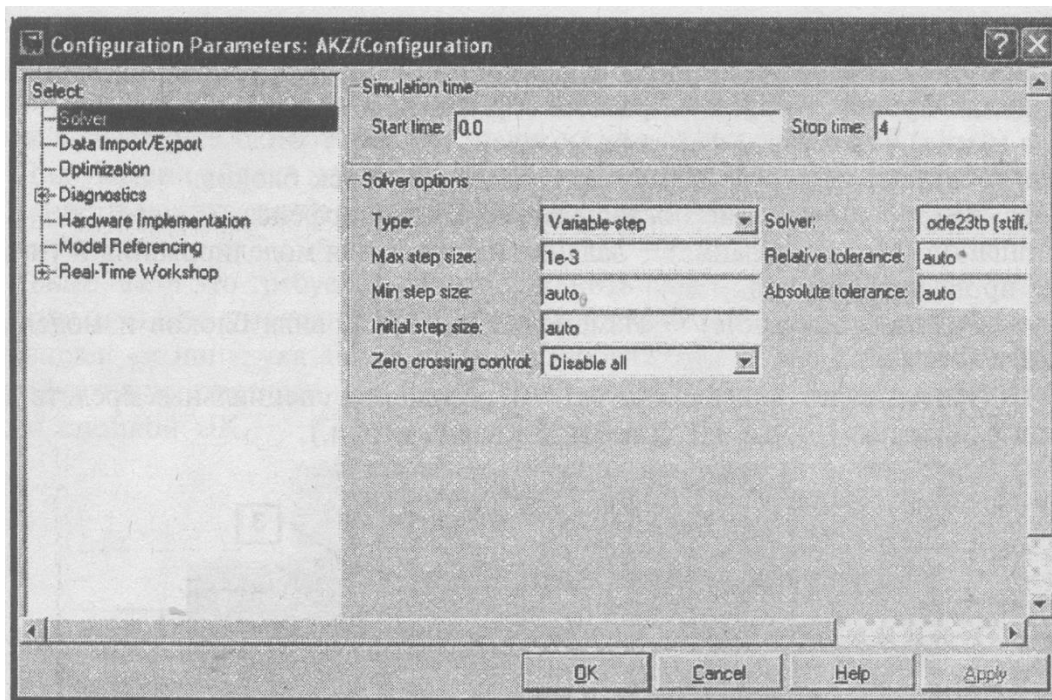


Рис. 2.6. Панель управления

При выборе параметров расчета необходимо указать способ моделирования (Type) и метод расчета нового состояния системы (Solver). Для параметра Type доступны два варианта — с фиксированным (Fixed-step) или с переменным (Variable-step) шагом. Как правило, Variable-step используется для моделирования непрерывных систем, а Fixed-step — для дискретных.

Список методов расчета нового состояния системы (Solver) содержит несколько вариантов. Эти методы различны для переменного (Variable-step) и для фиксированного (Fixed-step) шага времени, но, по сути, представляют собой процедуры решения систем дифференциальных уравнений. Величина шага моделирования по умолчанию устанавливается системой автоматически (auto). Требуемая величина шага может быть введена вместо значения auto. При выборе Variable-step в области появляются поля для установки трех параметров:

7. Maxstepsize- максимальный шаг расчета. По умолчанию он устанавливается автоматически (auto) и его значение в этом случае равно $(\text{StopTime} - \text{StartTime})/50$. Довольно часто это значение оказывается слишком большим, и наблюдаемые графики представляют собой ломаные (а не плавные) линии. В этом случае величину максимального шага расчета необходимо задавать явным образом.
8. Minstepsize—минимальный шаг расчета.
9. Initialstepsize— начальное значение шага моделирования.

При моделировании непрерывных систем с использованием переменного шага необходимо указать точность вычислений: относительную (Relativetolerance) и абсолютную (Absolutetolerance). По умолчанию они равны соответственно 10—3 и auto.

Установка параметров обмена с рабочей областью

Элементы, позволяющие управлять вводом и выводом в рабочую область MATLAB промежуточных данных и результатов моделирования, расположены на вкладке DataImport/Export(рис. 2.7).

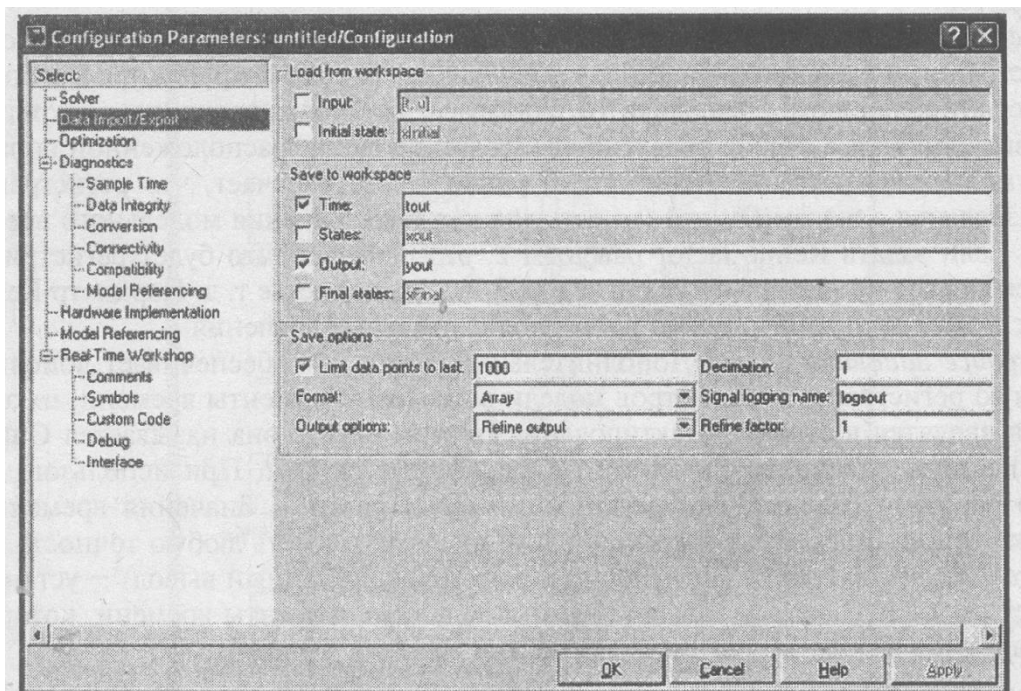


Рис. 2.7. Вкладка Workspace I/O диалогового окна установки параметров моделирования

Элементы вкладки разделены на 3 поля:

7. *Loadfromworkspace*(Загрузить из рабочей области). Если флажок Input(Входные данные) установлен, то в расположенном справа текстовом поле можно ввести формат данных, которые будут считываться из рабочей области Matlab. Установка флажка InitialState(Начальное состояние) позволяет ввести в связанном с ним текстовом поле имя переменной, содержащей параметры начального состояния модели. Данные, указанные в полях Inputи InitialState, передаются в исполняемую модель посредством одного или более блоков In(из раздела библиотеки Sources).
8. *Savetoworkspace*(Записать в рабочую область) — позволяет установить режим вывода значений сигналов в рабочую область MATLABи задать их имена.

9. *Saveoptions*(Параметры записи) — задает количество строк при передаче переменных в рабочую область. Если флажок *Limitrowstolast* установлен, то в поле ввода можно указать количество передаваемых строк (отсчет строк производится от момента завершения расчета). Если флажок не установлен, то передаются все данные. Параметр *Decimation*(Разряжение) задает шаг записи переменных в рабочую область. Параметр *Format*(формат данных) задает формат передаваемых в рабочую область данных. Доступные форматы *Array*(Массив), *Structure*(Структура), *StructureWithTime*(Структура с дополнительным полем — «время»).

Outputoptions(Параметры вывода) - задает настройки параметров вывода выходных сигналов моделируемой системы. Возможен выбор одного из трех вариантов:

- *Refineoutput*(Скорректированный вывод) — позволяет изменять дискретность регистрации модельного времени и тех сигналов, которые сохраняются в рабочей области Matlab с помощью блока To Workspace. Установка величины дискретности выполняется в строке редактирования *Refinefactor*, расположенной справа. По умолчанию значение *Refinefactor* равно 1, это означает, что регистрация производится с шагом $\Delta t = 1$ (то есть для каждого значения модельного времени:). Если задать *Refinefactor* равным 2, это означает, что будет регистрироваться каждое второе значение сигналов, 3 — каждое третье т. д. Параметр *Refinefactor* может принимать только целые положительные значения
- *Produceadditionaloutput*(Дополнительный вывод) — обеспечивает дополнительную регистрацию параметров модели в заданные моменты времени; их значения вводятся в строке редактирования (в этом случае она называется *Outputtimes*) в виде списка, заключенного в квадратные скобки. При использовании этого варианта базовый шаг регистрации (Δt) равен 1. Значения времени в списке *Outputtimes* могут быть дробными числами и иметь любую точность.
- *Producespecifiedoutputonly*(Формировать только заданный вывод) - устанавливает вывод параметров модели только в заданные моменты времени, которые указываются в поле *Outputtimes*(Моменты времени вывода).

Выполнение расчета

Запуск расчета выполняется с помощью выбора пункта меню Simulation/Start или инструмента ► на панели инструментов. Процесс расчета можно завершить досрочно, выбрав пункт меню Simulation/Stop или инструмент ■ . Расчет также можно остановить (Simulation/Pause) и затем продолжить (Simulation/Continue).

Далее рассмотрим средства пакета Simulink, позволяющие решить задачи анализа, синтеза, расчета и проектирования мехатронных систем. Отдельные библиотеки пакета можно открыть при помощи правой кнопки мышки. Ниже, при описании библиотек, рассматриваются те блоки, которые в дальнейшем используются при моделировании мехатронных устройств.

Лекция

Тема 2.5.1. Модельное проектирование синхронных мехатронных систем

ВОПРОСЫ

1. Введение.

1. Математическое описание, структурная схема и модель вентильного двигателя в неподвижной системе координат с безынерционным каналом ДПР-ПК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-БЕК, 2008. – 368 с.

1. Введение

В мехатронных системах с синхронными двигателями широкое применение нашли магнитоэлектрические синхронные машины.

На базе этих машин строятся подсистемы, которые сокращенно называются вентильными двигателями (ВД) и бесконтактными двигателями постоянного тока (БДПТ).

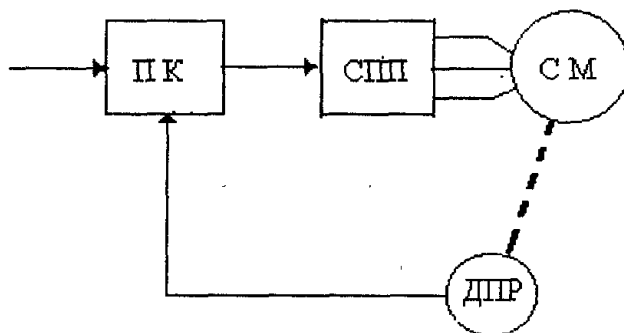


Рис. 9.1. Функциональная модель ВД

Вентильные двигатели (рис. 9.1) — это устройства, в которых магнитоэлектрическая синхронная машина с синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре включена в замкнутую систему с использованием датчика положения ротора (ДПР), преобразователя координат (ПК) и автономного инвертора (АИ). Форма магнитного поля в зазоре обуславливает способ формирования напря-

жения (тока) на выходе АИ. В ВД на выходе инвертора необходимо формировать синусоидальный ток, что достигается за счет синусоидальной широтно-импульсной модуляции в инверторе.

Отмеченная модуляция реализуется в ПК, при этом амплитуда модулирующего сигнала определяется сигналом на входе ПК, а мгновенная фаза — углом поворота ротора (сигналом с ДПР). Таким образом, регулирование скорости ВД осуществляется за счет изменения входного сигнала.

Датчики положения ротора можно поделить на две группы безинерционные и инерционные. К первой группе относятся импульсные и цифровые ДПР. Ко второй — ДПР, выполненные на вращающихся трансформаторах, индукционных, редуктосинах.

Важно подчеркнуть, что статические и динамические характеристики ВД зависят от свойств каждого блока, входящего в его состав.

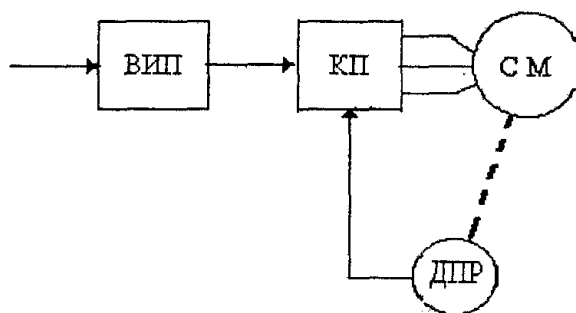


Рис. 9.2. Функциональная модель БДПТ

Бесконтактные двигатели постоянного тока (рис. 9.2) — это устройства, в которых магнитоэлектрическая синхронная машина с трапецеидальным распределением магнитного поля в зазоре включена в замкнутую систему с использованием датчика положения ротора (ДПР) и полупроводникового коммутатора (КП). В данном устройстве на выходе КП и соответственно на обмотках синхронной машины формируется прямоугольное напряжение.

В качестве датчиков положения ротора в БДПТ используются импульсные датчики (электромагнитные, датчики Холла). Число таких датчиков равно числу фаз статора двигателя.

Регулирование скорости в БДПТ осуществляется за счет изменения напряжения питания полупроводникового коммутатора.

В данной главе первостепенное внимание уделяется вентильным двигателям и системам, построенным на их основе. При математическом описании бесконтактного двигателя постоянного тока обычно используют модель двигателя постоянного тока. При этом вопросы проектирования систем с БДПТ ничем не отличаются от проектирования систем постоянного тока (эти вопросы рассмотрены в гл. 7).

В вентильных двигателях при определенных условиях проявляются свойства существенно отличные от свойств двигателей постоянного тока. Поэтому вопросы проектирования систем с ВД требуют подробного рассмотрения.

9.2. Математическое описание, структурная схема и модель вентильного двигателя в неподвижной системе координат с безынерционным каналом ДПР-ПК

Обобщенная магнитоэлектрическая синхронная машина показана на рис. 9.3. Она содержит две обмотки на статоре, обозначенные α , β и явнополюсный ротор в виде постоянного магнита, поле которого направлено по оси d .

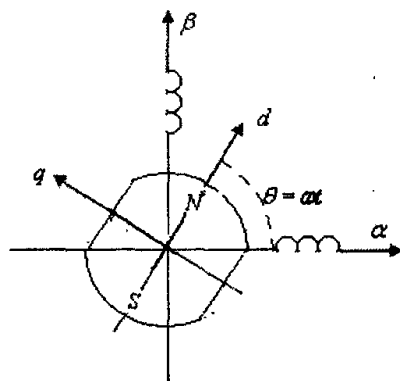


Рис. 9.3 Обобщенная магнитоэлектрическая синхронная машина

Уравнения равновесия ЭДС в обмотках статора и моментов на валу записываются в виде:

$$\begin{aligned} U_{\alpha} &= R i_{\alpha} + \frac{d\psi_{\alpha}}{dt}, \\ U_{\beta} &= R i_{\beta} + \frac{d\psi_{\beta}}{dt}, \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_H. \end{aligned} \quad (9.1)$$

В уравнениях (9.1) $U_\alpha, U_\beta, i_\alpha, i_\beta$ — проекции мгновенных значений напряжения и тока статора на оси, R — сопротивления статорной обмотки, $\omega_m, M, M_H, \theta_m$ — механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала, J — момент инерции ротора.

В уравнениях (9.1) потокосцепления по неподвижным осям α, β находятся из выражений:

$$\begin{aligned}\psi_\alpha &= L_\alpha i_\alpha + L_{\alpha\beta} i_\beta + \psi_{0\alpha} = L_\alpha i_\alpha + L_{\alpha\beta} i_\beta + \Phi_0 \cos \theta, \\ \psi_\beta &= L_{\alpha\beta} i_\alpha + L_\beta i_\beta + \psi_{0\beta} = L_{\alpha\beta} i_\alpha + L_\beta i_\beta + \Phi_0 \sin \theta,\end{aligned}\quad (9.2)$$

где Φ_0 — поток, созданный постоянным магнитом ротора на пару полюсов.

Если пренебречь насыщением стали, то выражения для собственных индуктивностей и взаимной индуктивности имеют вид:

$$\begin{aligned}L_\alpha &= \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta, \\ L_\beta &= \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta, \\ L_{\alpha\beta} &= \frac{L_d - L_q}{2} \sin 2\theta,\end{aligned}\quad (9.3)$$

где L_d, L_q — индуктивность обмотки статора по продольной и поперечной оси.

С учетом уравнений (9.1), (9.2), (9.3) полное описание синхронной магнито-электрической машины в неподвижной системе координат запишется в виде:

$$\begin{aligned}U_\alpha &= R i_\alpha - (L_d - L_q) \omega \cdot \sin 2\theta \cdot i_\alpha + \left(\frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \right) \frac{di_\alpha}{dt} + \\ &+ (L_d - L_q) \omega \cdot \cos 2\theta \cdot i_\beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \cdot \frac{di_\beta}{dt} - \Phi_0 \omega \sin \theta, \\ U_\beta &= R i_\beta + (L_d - L_q) \omega \cdot \cos 2\theta \cdot i_\alpha + \frac{1}{2} (L_d - L_q) \sin 2\theta \cdot \frac{di_\alpha}{dt} + \\ &+ (L_d - L_q) \omega \cdot \sin 2\theta \cdot i_\beta + \left(\frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos 2\theta \right) \frac{di_\beta}{dt} + \Phi_0 \omega \cos \theta, \\ M &= p \frac{m}{2} \left[\frac{L_d - L_q}{2} \sin 2\theta \cdot (i_\beta^2 - i_\alpha^2) + (L_d - L_q) \cos 2\theta \times \right. \\ &\quad \left. \times i_\alpha i_\beta + \Phi_0 \cos \theta i_\beta - \Phi_0 \sin \theta i_\alpha \right], \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_H, \\ \frac{d\theta_m}{dt} &= \omega_m, \quad \omega = p\omega_m, \quad \theta = p\theta_m,\end{aligned}\quad (9.4)$$

где p — число пар полюсов, m — число фаз в машине.

Уравнения (9.4) описывают синхронную магнитоэлектрическую машину с синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре. Для того чтобы из этих уравнений получить уравнения ВД, необходимо связать напряжения на статоре ВД с углом поворота ротора, который определяется сигналом с ДПР.

В этом случае напряжения U_α, U_β должны зависеть от начальной установки датчика положения ротора и от угла поворота ротора и определяться выражениями:

$$U_\alpha = U_1 \cos(\theta + \theta_0), \quad U_\beta = U_1 \sin(\theta + \theta_0), \quad (9.5)$$

где U_1 — амплитуда первой гармоники напряжения на выходе инвертора.

В реверсивных системах — а мехатронные системы, как правило, реверсивные — датчик положения ротора выставляется так, чтобы $\theta_0 = 90^\circ$.

Дальнейшие исследования ВД и замкнутых систем на его основе осуществляется с двигателем, параметры которого помещены в таблицу 9.1.

Параметры ВД	U_1	R	L_d	L_q	Φ_0	J	p	m
Единица измерения	В	Ом	Гн	Гн	Вб	кгм ²		
Значение	200	0.96	5.25e-3	2.25e-3	0.183	13e-3	4	3

Таблица 9.1

U_1 — амплитуда номинального напряжения на фазе двигателя.

Модель ВД в неподвижной системе координат показана на рис. 9.4 (файл *VD_Mod_ab*).

Блоки u_1 , $Teta_0$, ua , ub вычисляют напряжения U_α, U_β по уравнениям:

$$\begin{aligned} U_\alpha &= u_1 K_{cp} \cos(\theta + \theta_0) = U_1 \cos(\theta + \theta_0), \\ U_\beta &= u_1 K_{cp} \sin(\theta + \theta_0) = U_1 \sin(\theta + \theta_0), \end{aligned} \quad (9.6)$$

где K_{cp} — коэффициент усиления силового полупроводникового преобразователя (автономного инвертора).

На рис. 9.5 представлены переходные процессы (файл *VD_Mod.m*) при $U_1=20$ В, из которых следует, что данный ВД может считаться линейным звеном как по управлению, так и по возмущению.

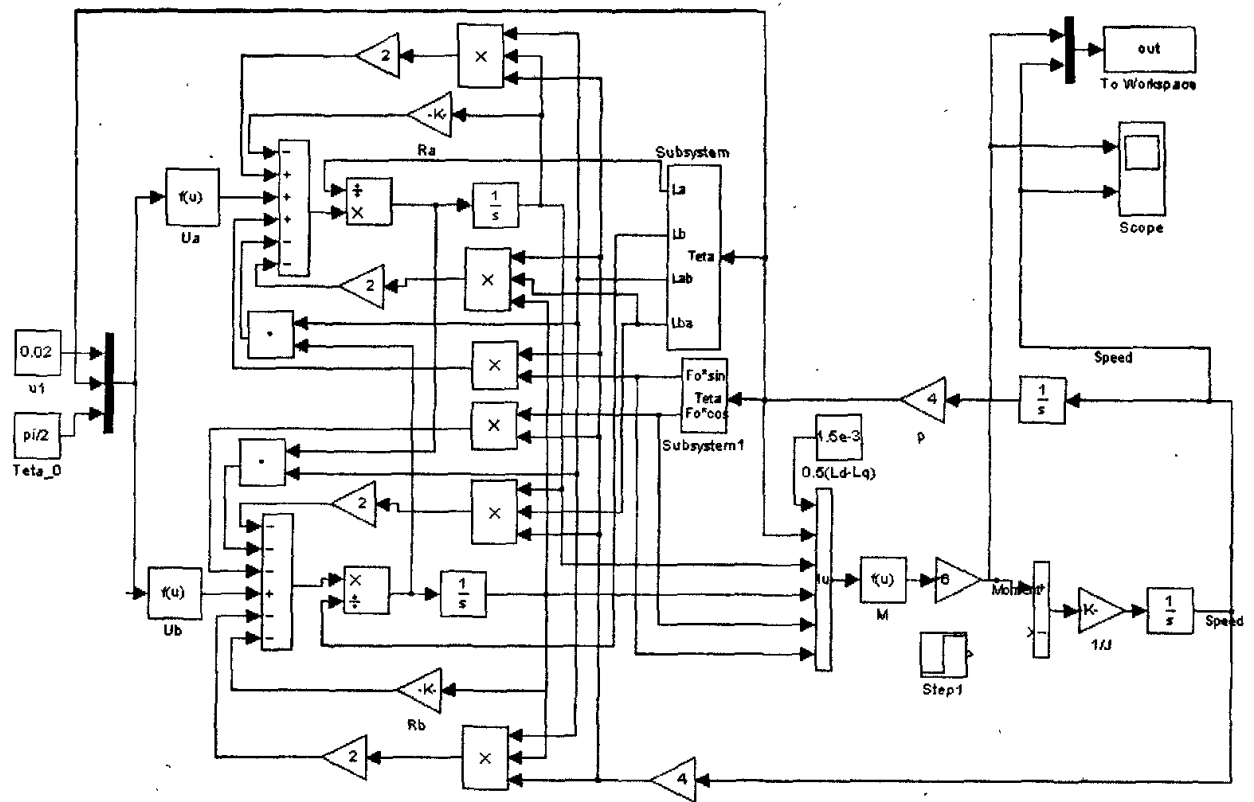


Рис. 9.4 Модель ВД в неподвижной системе координат

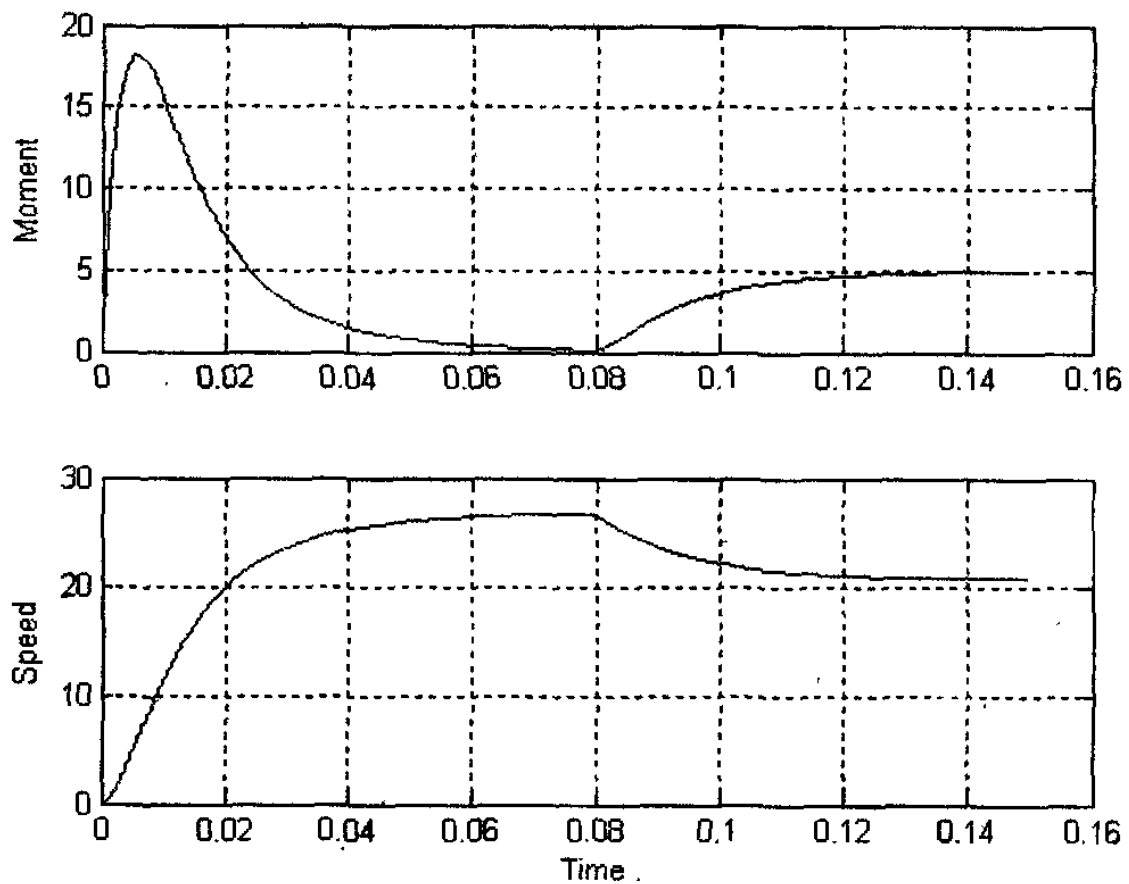


Рис. 9.5 Переходные процессы в ВД при $U_1=20V$

На рис. 9.6 представлены переходные процессы по управлению при $U_1=200\text{В}$, из которых следует, что при больших сигналах ВД является нелинейным звеном, где существенным образом проявляются перекрестные связи.

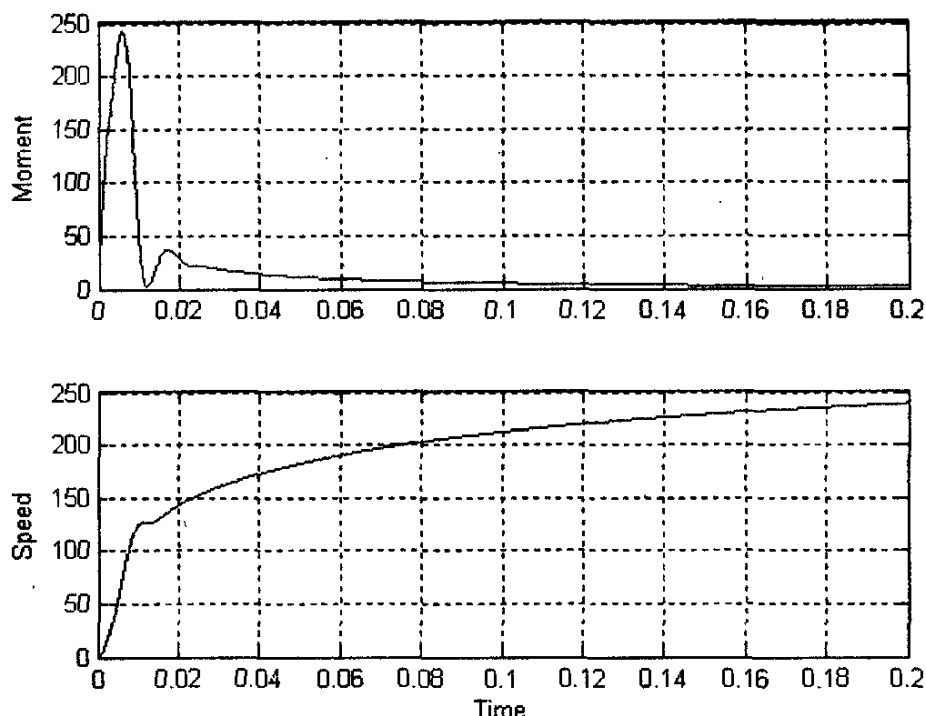


Рис. 9.6. Переходные процессы в ВД при $U_1=200\text{В}$

Графическое представление переходных процессов здесь и далее реализуется путем записи их в рабочее пространство блоком To Workspace с последующим запуском программы построения этих процессов. Окно настройки параметров блока To Workspace показано на рис. 9.7 — для различных моделей изменяется только один параметр в поле Sample time. Время в этом поле должно быть равно максимальному шагу интегрирования, установленному в параметрах симуляции модели.

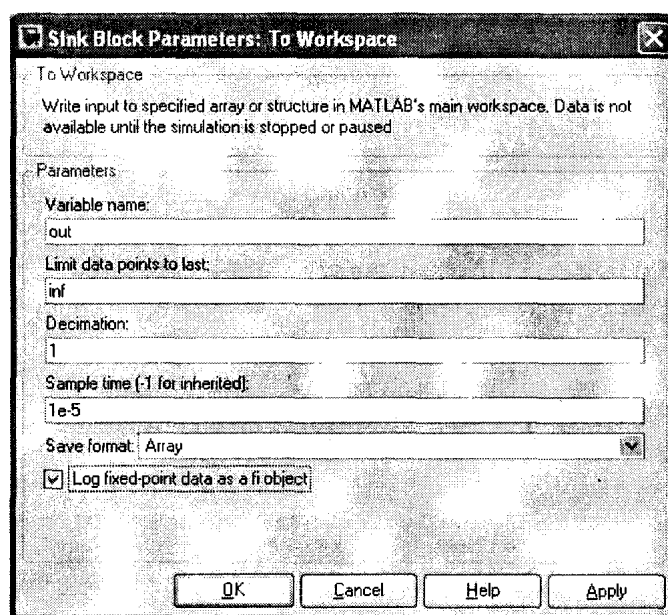


Рис. 9.7. Окно настройки параметров блока To Workspace

Математическое описание ВД в неподвижной системе координат достаточно сложное, его приходится применять при импульсном управлении ВД, когда нельзя использовать уравнения (9.5) для напряжений на фазах двигателя.

В случае питания обмоток статора синусоидальным или квазисинусоидальным (ШИМ по синусоидальному закону) напряжением следует использовать вращающиеся координаты для упрощения математического описания ВД и, как следствие, упрощения синтеза системы регулирования, т. к. последняя, как известно, строится во вращающейся системе координат.

Лекция

Тема 3.1.1. Структура и принципы интеграции мехатронных систем

ВОПРОСЫ

1. Предпосылки развития мехатроники.
2. Основные понятия и определения мехатроники.
3. Принципы построения, признаки и состав мехатронных систем.
4. Структура и принципы интеграции мехатронных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомченко В.Г., Соломин В.Ю. Мехатронные и робототехнические системы. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 160 с.

1. Предпосылки развития мехатроники

Стремительное развитие мехатроники в 90-х годах прошлого столетия как нового научно-технического направления обусловлено тремя основными факторами:

- новыми тенденциями мирового индустриального развития;
- развитием фундаментальных основ и методологии мехатроники (базовые научные идеи, принципиально новые технические и технологические решения);
- активностью специалистов в научно-исследовательской и образовательной сферах.

Можно выделить следующие тенденции, изменения и ключевые требования мирового рынка в рассматриваемой области:

- необходимость выпуска и сервиса оборудования в соответствии с международной системой стандартов качества;

Управление цифровых образовательных технологий

- интернационализация рынка научно-технической продукции и, как следствие, необходимость активного внедрения в практику форм и методов международного инжиниринга и трансфера технологий;
- повышение роли малых и средних производственных предприятий в экономике благодаря их способности к быстрому и гибкому реагированию на изменяющиеся требования рынка;
- бурное развитие компьютерных систем и технологий, средств телекоммуникации. Прямым следствием этой общей тенденции является интеллектуализация систем управления механическим движением и технологическими функциями современных машин.

Анализ указанных тенденций показывает, что достигнуть качественно нового уровня основного технологического оборудования на основе традиционных подходов уже практически нереально. В ближайшие годы ожидается резкий рост отношения «Качество/Цена» для нетрадиционных производственных машин, выполненных на основе новых механизмов параллельных соединений и гексаподов.

Историю мехатроники принято отсчитывать с 1969 года, когда японская фирма Yaskawa Electric ввела новый термин «Мехатроника». Первоначально мехатронными системами считались только регулируемые электроприводы. Затем сюда стали относить автоматические двери, торговые автоматы, мобильные средства и фотокамеры с автофокусировкой. В 80-х годах прошлого столетия класс мехатронных систем пополнился станками с числовым программным управлением, промышленными роботами и новыми видами бытовых машин (посудомоечных, стиральных и т. п.). В последние десятилетия очень большое внимание уделяется созданию мехатронных модулей для современных автомобилей, нового поколения технологического оборудования (станков с параллельной кинематикой, роботов с интеллектуальным управлением), микромашин, новейшей компьютерной и офисной техники.

В качестве основного классификационного признака в мехатронике представляется целесообразным принять уровень интеграции составляющих элементов. В соответствии с этим признаком можно разделять мехатронные системы по уровням или по поколениям, если рассматривать их появление на рынке наукоемкой продукции исторически.

Мехатронные модули первого уровня представляют собой объединение только двух исходных элементов. Типичным примером модуля первого поколения

может служить «мотор-редуктор», где механический редуктор и управляемый двигатель выпускаются как единый функциональный элемент. Мехатронные системы на основе этих модулей нашли широкое применение при создании различных средств комплексной автоматизации производства (конвейеров, транспортеров, поворотных столов, вспомогательных манипуляторов).

Мехатронные модули второго уровня появились в 80-х годах прошлого столетия в связи с развитием новых электронных технологий, которые позволили создать миниатюрные датчики и электронные блоки для обработки их сигналов. Объединение приводных модулей с указанными элементами привело к появлению мехатронных модулей движения, состав которых полностью соответствует введенному выше определению, когда достигнута интеграция трех устройств различной физической природы: механических, электротехнических и электронных. На базе мехатронных модулей данного класса созданы управляемые энергетические машины (турбины и генераторы), станки и промышленные роботы с числовым программным управлением.

Развитие третьего поколения мехатронных систем обусловлено появлением на рынке сравнительно недорогих микропроцессоров и контроллеров на их базе и направлено на интеллектуализацию всех процессов, протекающих в мехатронной системе, в первую очередь – процесса управления функциональными движениями машин и агрегатов. Одновременно идет разработка новых принципов и технологий изготовления высокоточных и компактных механических узлов, а также новых типов электродвигателей (в первую очередь высокомоментных, бесколлекторных и линейных), датчиков обратной связи и информации. Синтез новых прецизионных, информационных и измерительных наукоемких технологий дает основу для проектирования и производства интеллектуальных мехатронных модулей и систем.

В дальнейшем мехатронные машины и системы будут объединяться в мехатронные комплексы на базе единых интеграционных платформ. Цель создания таких комплексов – добиться сочетания высокой производительности и одновременно гибкости технико-технологической среды за счет возможности ее реконфигурации, что позволит обеспечить конкурентоспособность и высокое качество выпускаемой продукции на рынках XXI века.

Важно подчеркнуть, что толчком для становления мехатроники стали не общие теоретические идеи (как это было, например, в истории робототехники), а технические достижения инженеров-практиков в различных отраслях. Затем заинтересованные организации в конце 80-х годов прошлого столетия стали объединяться

в научно-технические сообщества. В России координацию научно-технических работ в настоящее время осуществляет Ассоциация инновационного машиностроения и мехатроники. Аналогичные организации были созданы и во многих странах Европы.

В эти же годы курсы по мехатронике стали включать в учебные планы технические университеты. В нашей стране специальность «Мехатроника» была введена в классификатор Государственного комитета по высшему образованию в марте 1994 года. Первыми эту специальность открыли МГТУ «СТАНКИН», МГТУ им. Н. Э. Баумана и Балтийский ГТУ (Санкт-Петербург).

Со второй половины 90-х годов прошлого века начинается активная разработка фундаментальных основ мехатроники как науки. В марте 1996 года выходит первый выпуск журнала IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, который издается Институтом инженеров по электротехнике и электронике совместно с Американским обществом инженеров-механиков. В 1996–1998 годах появляется целый ряд статей по мехатронике в отечественных журналах («Приводная техника», СТИН и других), а также в научно-технических сборниках. Направление «Мехатронные технологии» выделено Министерством науки и технологий РФ на 1999–2000 годы как критическое в рамках Федеральной программы «Технологии, машины и производства будущего». Ежегодно в мире проводится несколько специализированных научно-технических конференций в области мехатроники.

По мере расширения области применения мехатронных систем и расширения международных научно-технических связей, становится все более значимым активный обмен новыми производственными и информационными технологиями между их создателями и пользователями, между различными группами потребителей и разработчиков (научно-исследовательскими центрами, предприятиями различных форм собственности, университетами).

Развитие мехатроники как междисциплинарной научно-технической области помимо очевидных технико-технологических сложностей ставит и целый ряд новых организационно-экономических проблем. Современные предприятия, приступающие к разработке и выпуску мехатронных изделий, должны решить в этом плане следующие основные задачи:

- структурную интеграцию подразделений механического, электронного и информационного профилей (которые, как правило, функционировали автономно и разобщенно) в единые проектные и производственные коллективы;

- подготовку «мехатронно-ориентированных» инженеров и менеджеров, способных к системной интеграции и руководству работой узкопрофильных специалистов различной квалификации;
- интеграцию информационных технологий из различных научно-технических областей (механики, электроники, компьютерного управления) в единый инструментарий для компьютерной поддержки мехатронных задач;
- стандартизацию и унификацию всех используемых элементов и процессов при проектировании и производстве мехатронных систем.

Решение перечисленных проблем зачастую требует преодоления сложившихся на предприятии традиций в управлении и амбиций менеджеров среднего звена, привыкших решать только свои узкопрофильные задачи. Именно поэтому средние и малые предприятия, которые могут легко и гибко варьировать свою структуру, оказываются более подготовленными к переходу к производству мехатронной продукции.

Приведенный анализ современных тенденций объективно и убедительно свидетельствует о быстро возрастающем интересе к мехатронике и высокой активности специалистов в научно-исследовательской, образовательной и производственной сферах, что определяет перспективу развития мехатроники в XXI веке как одного из ключевых направлений современной науки и техники.

2. Основные понятия и определения мехатроники

Современный термин «Мехатроника» («Mechatronics»), согласно японским источникам, был введен фирмой Yaskawa Electric в 1969 году и зарегистрирован как торговая марка в 1972 году. Это название получено комбинацией слов «МЕХАника» и «элекТРОНИКА».

Начиная с 80-х годов прошлого века, термин «Мехатроника» все чаще применяется в мировой технической литературе как название целого класса машин с компьютерным управлением движением.

Мехатроника находится только в стадии становления, поэтому на сегодняшний день ее определения и базовая терминология еще полностью не сформированы.

Общее определение мехатроники в широком понимании дано в 1995 году в Государственном образовательном стандарте РФ специальности «Мехатроника»:

Мехатроника – это новая область науки и техники, посвященная созданию и эксплуатации машин и систем с компьютерным управлением движением, которая

базируется на знаниях в области механики, электроники и микропроцессорной техники, информатики и компьютерного управления движением машин и агрегатов.

В данном определении особо подчеркнута триединая сущность мехатронных систем (МС), в основу построения которых заложена идея глубокой взаимосвязи механических, электронных и компьютерных элементов. Именно поэтому наиболее распространенным графическим символом мехатроники стали три пересекающихся круга (рис. 1.1), помещенные во внешнюю оболочку «Производство» - «Менеджмент» - «Требования рынка».



Рис. 1.1 Определение мехатронных систем

Таким образом, системная интеграция трех указанных видов элементов является необходимым условием построения мехатронной системы.

Известно несколько определений, опубликованных в периодических изданиях, трудах международных конференций и симпозиумов, где понятие о мехатронике конкретизируется и специализируется. На основе этих определений предложена следующая формулировка предмета мехатроники:

Мехатроника изучает синергетическое объединение узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами с целью проектирования и производства качественно новых модулей, систем, машин и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

Это определение можно прокомментировать следующим образом:

1. Мехатроника изучает новый методологический подход (в некоторых работах даже используются более укрупненные понятия – «философия», «парадигма») в построении машин с качественно новыми характеристиками.

Важно подчеркнуть, что этот подход является весьма универсальным и может быть применен в машинах и системах различного назначения. Но при этом следует отметить, что обеспечить высокое качество управления мехатронной системой можно только с учетом специфики конкретного управляемого объекта. Поэтому учебные курсы по мехатронике целесообразно включать в программы подготовки по специальностям, предметом которых являются конкретные классы производственных машин и процессов (например, «Автоматизация технологических процессов и производств», «Металлорежущие станки», «Машины для обработки металлов давлением», «Роботы и робототехнические системы» и т. д.).

2. В определении подчеркивается синергетический характер интеграции составляющих элементов в мехатронных объектах. Синергия – это совместное действие, направленное на достижение общей цели. При этом составляющие части не просто дополняют друг друга, но объединяются таким образом, что образованная система обладает качественно новыми свойствами.

В мехатронике все энергетические и информационные потоки направлены на достижение единой цели – реализации заданного управляемого движения. В некоторых определениях вместо термина «синергетическое» используются понятия «органическое», «системное» соединение частей в мехатронную систему.

3. Интегрированные мехатронные элементы выбираются разработчиком уже на стадии проектирования машины, а затем обеспечивается необходимая инженерная и технологическая поддержка при производстве и эксплуатации машины. В этом радикальное отличие мехатронных машин от традиционных, когда зачастую пользователь был вынужден самостоятельно объединять в систему разнородные механические, электронные и информационно-управляющие устройства различных изготовителей. Именно поэтому многие сложные комплексы (например, некоторые гибкие производственные системы в отечественном машиностроении) показали на практике низкую надежность и невысокую технико-экономическую эффективность.

4. Методологической основой разработки мехатронных систем служат методы параллельного проектирования. При традиционном проектировании машин с компьютерным управлением последовательно проводится разработка механической, электронной, сенсорной и компьютерной частей системы, а затем выбор интерфейсных блоков. Парадигма параллельного проектирования заключается в одновременном и взаимосвязанном синтезе всех компонентов системы.

5. Базовыми объектами изучения мехатроники являются мехатронные модули, которые выполняют движения, как правило, по одной управляемой координате. Из таких модулей, как из функциональных кубиков, komponуются сложные системы модульной архитектуры.

6. Мехатронные системы предназначены, как следует из определения, для реализации заданного движения. Критерии качества выполнения движения мехатронными системами (МС) являются проблемно-ориентированными, т. е. определяются постановкой конкретной прикладной задачи. Специфика задач автоматизированного машиностроения состоит в реализации перемещения выходного звена – рабочего органа технологической машины (например, инструмента для механообработки). При этом необходимо координировать управление пространственным перемещением МС с управлением различными внешними процессами. Таким образом, в мехатронике рассматривают многосвязные системы. Многосвязность системы означает, что движение каждого звена влияет на движение остальных звеньев. Указанное взаимовлияние происходит через механическое устройство как общую нагрузку, через общий источник энергии, а также вследствие естественных и искусственных динамических связей между каналами управления в блоке приводов. Следовательно, необходимо формировать управление движением мехатронной системы (особенно на высоких скоростях, где влияние динамических факторов существенно) с учетом перекрестных связей. Примерами таких процессов могут служить регулирование силового взаимодействия рабочего органа с объектом работ при механообработке, контроль и диагностика текущего состояния критических элементов МС (инструмента, силового преобразователя), управление дополнительными технологическими воздействиями (тепловыми, электрическими, электрохимическими) на объект работ при комбинированных методах обработки, управление вспомогательным оборудованием комплекса (конвейерами, загрузочными устройствами и т. п.), выдача и прием сигналов от устройств электроавтоматики (клапанов, реле, переключателей). Такие сложные координированные движения мехатронных систем будем в дальнейшем называть функциональными движениями.

7. В современных МС для обеспечения высокого качества реализации сложных и точных движений применяются методы интеллектуального управления. Данная группа методов опирается на новые идеи в теории управления, современные аппаратные и программные средства вычислительной техники, перспективные подходы к синтезу управляемых движений мехатронными системами.

3. Принципы построения, признаки и состав мехатронных систем

Мехатронные устройства – это выделившийся в последние десятилетия класс машин, или узлов этих машин, базирующийся на использовании в них точной механики, электропривода, электроники, компьютерного управления. Мехатронное устройство обладает следующими характерными признаками:

1. Наличие: выходного механического звена (ВМЗ), выполняющего внешние функции мехатронного устройства; силового электромеханического привода выходного звена; устройства программного управления приводом; информационной системы, контролирующей состояние окружающей среды и состояние самого мехатронного устройства.

2. Минимум преобразований информации и энергии (например, использование высокомоментных или линейных двигателей без редукторов) – принцип минимума преобразований.

3. Использование одного и того же элемента мехатронного устройства для реализации нескольких функций – принцип совмещения функций.

4. Объединение корпусов мехатронного устройства – принцип совмещения корпусов.

5. Применение сверхплотного монтажа элементов.

Примерами современных мехатронных устройств являются модули станков и промышленных роботов, устройства внешней памяти компьютеров, принтеры, бытовая техника и т. п. Мехатронное устройство может быть либо машиной, либо узлом (функциональный элемент, модуль) машины.

Мехатронный узел включает в себя:

- механизм, состоящий из корпуса, привода и выходного механического звена. Последнее может включать силовой элемент, механическую передачу движения, рабочий орган или другой конечный элемент ВМЗ;

- усилитель мощности силового элемента;

- устройство управления усилителем мощности;

- внутреннюю информационную систему (датчики состояния самого мехатронного узла, средства обработки информации с датчиков);

- внешнюю информационную систему (сенсоры информации о внешней среде мехатронного узла, средства обработки этой информации);

- устройство управления мехатронным узлом.

4. Структура и принципы интеграции мехатронных систем

Внешней средой для машин рассматриваемого класса является технологическая среда, которая содержит различное основное и вспомогательное оборудование, технологическую оснастку и объекты работ. При выполнении мехатронной системой заданного функционального движения объекты работ оказывают возмущающие воздействия на рабочий орган. Примерами таких воздействий могут служить силы резания для операций механообработки, контактные силы и моменты сил при сборке, сила реакции струи жидкости при операции гидравлической резки.

Внешние среды укрупненно можно разделить на два основных класса: детерминированные и недетерминированные. К детерминированным относятся среды, для которых параметры возмущающих воздействий и характеристики объектов работ могут быть заранее определены с необходимой для проектирования МС степенью адекватности. Некоторые среды являются недетерминированными по своей природе (например, экстремальные среды: подводные, подземные и т. п.). Характеристики технологических сред, как правило, могут быть определены с помощью аналитико-экспериментальных исследований и методов компьютерного моделирования. Например, для оценки сил резания при механообработке проводят серии экспериментов на специальных исследовательских установках, параметры вибрационных воздействий измеряют на вибростендах с последующим формированием математических и компьютерных моделей возмущающих воздействий на основе экспериментальных данных.

Однако для организации и проведения подобных исследований зачастую требуются слишком сложные и дорогостоящие аппаратура и измерительные технологии. Так, для предварительной оценки силовых воздействий на рабочий орган при операции роботизированного удаления облоя с литых изделий необходимо измерять фактические форму и размеры каждой заготовки. В таких случаях целесообразно применять методы адаптивного управления, которые позволяют автоматически корректировать закон движения МС непосредственно в ходе выполнения операции.

В состав традиционной машины входят следующие основные компоненты:

- механическое устройство, конечным звеном которого является рабочий орган;
- блок приводов, включающий силовые преобразователи и исполнительные двигатели;

Управление цифровых образовательных технологий

- устройство компьютерного управления, верхним уровнем для которого является человек-оператор, либо другая ЭВМ, входящая в компьютерную сеть;
- сенсоры, предназначенные для передачи в устройство управления информации о фактическом состоянии блоков машины и движении МС.

Таким образом, наличие трех обязательных частей – механической (точнее электромеханической), электронной и компьютерной, связанных энергетическими и информационными потоками, является первичным признаком, отличающим мехатронные системы.

Электромеханическая часть включает механические звенья и передачи, рабочий орган, электродвигатели, сенсоры и дополнительные электротехнические элементы (например, тормоза, муфты). Механическое устройство предназначено для преобразования движений звеньев в требуемое движение рабочего органа.

Электронная часть состоит из микроэлектронных устройств, силовых преобразователей и электроники измерительных цепей. Сенсоры предназначены для сбора данных о фактическом состоянии внешней среды и объектов работ, механического устройства и блока приводов с последующей первичной обработкой и передачей этой информации в устройство компьютерного управления (УКУ). В состав УКУ мехатронной системы обычно входят компьютер верхнего уровня и контроллеры управления движением.

Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции.

I. Управление процессом механического движения мехатронного модуля или многомерной системы в реальном времени с обработкой сенсорной информации.

II. Организация управления функциональными движениями МС, которая предполагает координацию управления механическим движением МС и сопутствующими внешними процессами. Как правило, для реализации функции управления внешними процессами используются дискретные входы/выходы устройства.

III. Взаимодействие с человеком-оператором через человеко-машинный интерфейс в режимах программирования и непосредственно в процессе движения МС.

IV. Организация обмена данными с периферийными устройствами, сенсорами и другими устройствами системы.

Задачей мехатронной системы является преобразование информации о цели управления, поступающей с верхнего уровня, в целенаправленное функциональное движение системы с управлением на основе принципа обратной связи. Блок-

схема, иллюстрирующая ход энергетических и информационных потоков в МС, приведена на рисунке 3.1.

Характерно, что электрическая энергия используется в современных системах как промежуточная энергетическая форма. Таким образом, для физической реализации мехатронной системы теоретически необходимы четыре основных функциональных блока: последовательно соединенные информационно-электрический и электромеханический энергетические преобразователи в прямой цепи и электроинформационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Понятно, что если работа силовой части машины с энергетической точки зрения основана на гидравлических, пневматических или комбинированных (например, электрогидравлических) процессах, то, необходимы соответствующие преобразователи и датчики в цепи обратной связи.

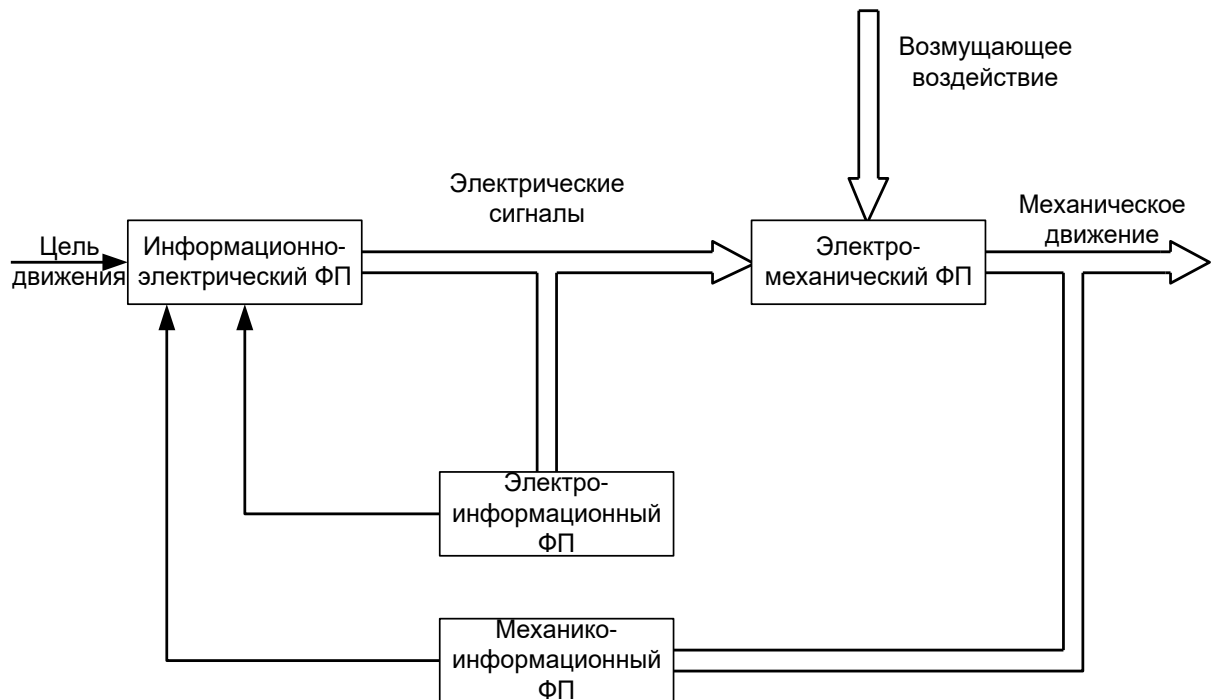


Рис. 3.1. Информационные и энергетические потоки в мехатронной системе (ФП – функциональный преобразователь)

➡ – энергетические потоки
→ – информационные потоки)

Проанализируем физический характер преобразований и структуру традиционной машины с компьютерным управлением (рис. 3.2).

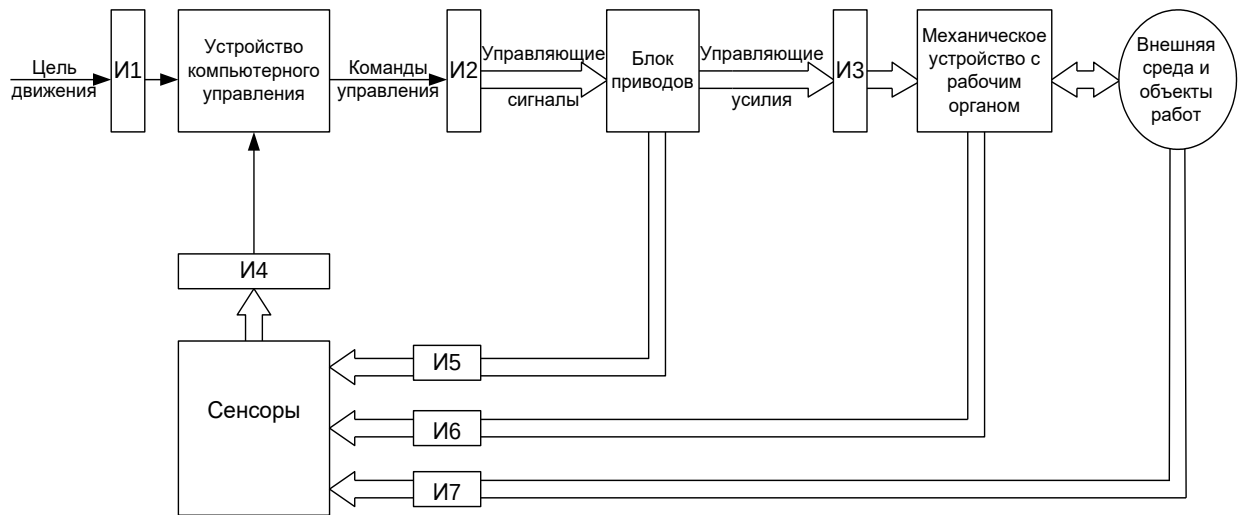


Рис. 3.2. Блок-схема традиционной машины с компьютерным управлением (И1 – И7: интерфейсные блоки)

Устройство компьютерного управления на основании входной информации, поступающей с верхнего уровня управления и по цепям обратной связи от сенсоров, выдает во времени на исполнительные приводы управляющие электрические сигналы. В силовых преобразователях происходит усиление по мощности данных сигналов, их модуляция (наиболее широко применяются широтно-импульсные модуляторы). Затем исполнительные приводы прикладывают соответствующие усилия (силы и моменты сил) к звеньям механического устройства, что в результате вызывает целенаправленное движение конечного звена машины – ее рабочего органа.

Для сопряжения элементов в систему традиционно вводят специальные интерфейсные устройства, которые на рисунке 3.2 обозначены И1-И7.

Рассмотрим примеры межблоковых интерфейсов, которые наиболее часто встречаются в машинах с компьютерным управлением (станках с ЧПУ, промышленных роботах и т. п.), широко применяемых в автоматизированном машиностроении.

Интерфейс И1 представляет собой комплекс сетевых аппаратно-программных средств для сопряжения устройства компьютерного управления с компьютерной сетью, либо это интерфейс человек – машина, если цель управления мехатронной системе задается непосредственно человеком-оператором. Современные человеко-машинные интерфейсы выполняются в виде пультов и рукояток дистанционного управления (например, для программирования промышленных роботов методом обучения), периферийных устройств компьютеров (клавиатура, монитор, джойстик), устройств отображения информации в системах виртуальной реальности (перчатки, шлемы со встроенными окулярами и др.).

Интерфейс И2 обычно состоит из цифро-аналогового преобразователя и усилительно-преобразующего устройства и служит для формирования управляющих электрических напряжений для исполнительных приводов.

Интерфейс И4 на входе устройства компьютерного управления в случае применения в МС сенсоров с аналоговым выходным сигналом строится на основе аналого-цифровых преобразователей.

Интерфейс И3 представляет собой, как правило, механические передачи, связывающие исполнительные двигатели со звеньями механического устройства. Конструктивно такие трансмиссии обычно включают редукторы, муфты, гибкие связи, тормоза и т. п.

Интерфейсы сенсоров И5, И6 и И7 в зависимости от физического характера входных переменных состояния системы можно разделить на электрические и механические. К механическим относятся присоединительные устройства для датчиков обратной связи приводов (фотоимпульсных, кодовых, тахогенераторов, потенциометров, резольверов), силомоментных и тактильных датчиков, а также других средств очувствления и информации о движении двигателей, звеньев механического устройства и внешних объектов. Преобразование и передача сигналов о переменных состояния системы, которые имеют электрическую природу (например, напряжения и токи в силовых преобразователях) осуществляется электрическими интерфейсами. В их состав помимо усилительно-преобразующих плат входят также соединительные кабели и коммутационная аппаратура.

Важно отметить, что связь всех элементов с устройством компьютерного управления предусматривает не только аппаратное сопряжение, но также и соответствующее программное обеспечение (операционную систему и драйверы) для организации обмена данными в режиме реального времени.

Принципиальное различие мехатронного и традиционного подходов к проектированию и изготовлению модулей и машин с компьютерным управлением состоит в концепции технической реализации функциональных преобразователей. При традиционном проектировании интерфейсы представляют собой отдельные самостоятельные устройства и узлы. Обычно это сепаратные блоки, которые выпускаются специализированными фирмами, но зачастую отдельные элементы приходится изготавливать самим пользователям, особенно при сопряжении специализированных и нестандартных блоков МС. Производственная практика показала, что для монтажа и запуска сложных комплексов (например, гибких производственных

систем) предприятия, которые, как правило, не имеют своих высококвалифицированных специалистов по системной интеграции, вынуждены обращаться к инженерным фирмам, тем самым увеличивая свои затраты.

Сравнивая блок-схемы, представленные на рисунке 3.1 и 3.2, можно прийти к выводу о том, что количество преобразующих (в том числе интерфейсных) блоков в традиционной структуре машины с компьютерным управлением избыточно по отношению к минимально необходимому числу информационно-энергетических функциональных преобразований. Наличие избыточных блоков приводит к снижению надежности и точности мехатронной системы, ухудшению ее массогабаритных и стоимостных показателей.

Идея минимизации промежуточных преобразований широко используется в инженерной практике при проектировании устройств и систем самого различного назначения. Характерным примером реализации этой инженерной идеи в бытовой технике является так называемая «видеодвойка» – моноблок, в состав которого входят телевизор и видеомаягнитофон. Чем же руководствуются покупатели, отдавая в магазине предпочтение видеодвойке по сравнению с покупкой отдельно ТВ и видеомаягнитофона? Во-первых, безусловно, ощутимый выигрыш в стоимости. Во-вторых, не надо разбираться с подключением кабелей и разъемов, а затем регулярно следить за надежностью этих соединений.

В-третьих, имеют значение преимущество в габаритах, общий корпус, удобство установки. Но при этом покупатель должен четко отдавать себе отчет в том, что видеодвойка – система негибкая, оба устройства могут эксплуатироваться и при необходимости ремонтироваться только совместно.

Суть мехатронного подхода к проектированию состоит в интеграции в единый функциональный модуль двух или более элементов различной физической природы. Другими словами, на стадии проектирования из традиционной структуры машины исключается как сепаратное устройство, по крайней мере, один интерфейс при сохранении физической сущности преобразования, выполняемого данным модулем. В идеальном для пользователя варианте мехатронный модуль, получив на вход информацию о цели управления, должен исполнить с заданными показателями качества программное функциональное движение.

Сущность мехатронного подхода состоит в том, что он направлен на интеграцию конкретного класса элементов (механических, электронных, компьютерных, электротехнических, интерфейсных и др.), которые имеют принципиально различ-

ную физическую природу и предназначены для реализации сложного функционального движения. Аппаратное объединение элементов в единые конструктивные модули должно обязательно сопровождаться разработкой интегрированного программного обеспечения. Программные средства МС должны обеспечивать непосредственный переход от замысла системы через ее математическое моделирование к управлению функциональным движением в реальном времени. Таким образом, проектирование МС предполагает разработку комплекса аппаратно-программных средств, ориентированных на конкретные прикладные задачи.

Для реализации сформулированного мехатронного подхода следует определить локальные точки интеграции элементов в единый функциональный модуль. Для этого вернемся к рассмотрению блок-схемы на рисунке 3.1. Потенциально возможные точки аппаратной интеграции и структуры соответствующих мехатронных модулей представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Мехатронный модуль	Исходные элементы		
	Базовый элемент	Дополняющий элемент	Исключаемый интерфейс
Интеллектуальный силовой преобразователь	Силовой преобразователь	Микропроцессор	И2
Приводной модуль	Исполнительный двигатель	Механическое устройство	И3
Интеллектуальный модуль	Сенсор	Микропроцессор	И4
Мехатронный модуль движения	Приводной модуль	Сенсор	И3, И5
Очувствленный рабочий орган	Рабочий орган	Сенсор	И6

В таблице 3.1 мехатронные модули классифицированы по набору вошедших в их состав базового и дополняющих элементов (столбцы 1 и 2). В третьем столбце указаны интерфейсы, которые при проектировании исключаются как сепаратные блоки из традиционной структуры (рис. 3.2). В таблице не рассматриваются интерфейсы И1 и И7, которые являются по сути входными для мехатронного модуля, так

как связывают его с источниками внешних сигналов и воздействий. Особенности построения интерфейсов И1, И2, И4 для устройства компьютерного управления подробно рассмотрены в следующей главе.

На практике целесообразно строить мехатронный модуль, опираясь сразу на несколько точек интеграции, и создание именно таких модулей представляет наибольший интерес с теоретической и прикладной точек зрения для мехатроники как новой области науки и техники. Таблица не исчерпывает всех возможных способов объединения элементов в МС и оставляет большое поле для научного поиска и инженерного творчества.

Лекция

Тема 3.1.2. Применение мехатронных машин

ВОПРОСЫ

1. Мобильные мехатронные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов.
2. Классификация роботов.
3. Техническая характеристика ПР (ГОСТ 25378-82).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомченко В.Г., Соломин В.Ю. Мехатронные и робототехнические системы. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 160 с.

1. Мобильные мехатронные роботы для инспекции и ремонта подземных трубопроводов

Проблема эксплуатации и ремонта трубопроводов актуальна для нефтяных и газопроводов, для водопроводных и канализационных сетей (особенно для крупных городов и мегаполисов), для каналов водосброса и водозабора из рек. Применение мобильных роботов для телеинспекции и обслуживания магистралей позволяет предупреждать техногенные и экологические аварии и катастрофы и внедрить бестраншейные методы ремонта. Роботизация позволяет также осуществлять реконструкцию и санацию ветхих магистралей, проводить приемку новых и контроль за

состоянием действующих трубопроводов, проводить экологический мониторинг сетей, составлять карты подземных коммуникаций.

В качестве примера решения этой технической проблемы рассмотрим робот Р-200, предназначенный для телеинспекции трубопроводов диаметром от 150 до 1200 мм. Этот мобильный робот имеет набор сменных колес и цветную поворотную телекамеру. Управляется робот дистанционно оператором с поста управления, размещенного в автомобиле (длина кабеля до 200 м). Пост управления имеет цветной монитор и цифровую систему документирования на базе компьютера в промышленном исполнении. Телекамера оснащена устройством наведения (механизмы качания, ротации и подъема) для осмотра стенок трубы, блоками основного и дополнительного освещения, электромеханический стеклоочиститель, а также имеет дистанционный привод фокусировки. Робот имеет герметичное исполнение, способен работать с погружением в воду, корпус накачивается азотом для предотвращения конденсации влаги внутри него и запотевания стекол телекамеры. Приводы перемещения представляют собой мехатронные модули типа «мотор-колесо» на базе двигателей постоянного тока. Схема телеинспекции показана на рисунке 2.1а. Помимо системы технического зрения робот оснащен датчиком пути, датчиком углов крена и дифферента корпуса, датчиками углов ориентации телекамеры. Эти сенсоры необходимы не только для управления движением робота, но и для трассировки залегания трубопровода, дают информацию о профиле трубы и координатах дефекта (свища, трещины) или обнаруженного постороннего предмета.

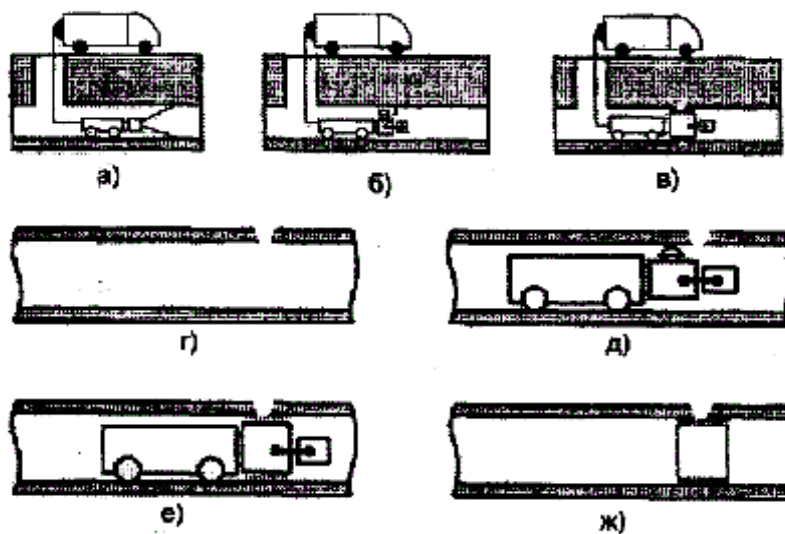


Рис. 2.1 Схемы роботизированных операций:

- а) телеинспекция трубопровода; б) подрезка выступающих элементов;
- в) локальная заделка дефекта; г) дефект в трубопроводе;

- д) зачистка с помощью фрезерной головки;
- е) установка внутреннего бандажа; ж) трубопровод после ремонта

Телероботы позволяют не только обнаружить, но и устранить целый ряд дефектов. Робот РОКОТ-1М комплектуется сменными рабочими органами – фрезерными и бандажными головками для выполнения ремонтных операций внутри трубы. Фрезерная головка предназначена для локальной зачистки поверхностей, сверления, подрезки выступающих элементов (наплывы, грат на сварных швах, штыри), прорезки боковых отводов после санации трубы пластиком. Заделка дефектов выполняется с помощью бандажной головки, которая накладывает кольцевой бандаж шириной 100 мм из ткани со специальной пропиткой. Схемы ремонта дефекта в трубопроводе для ликвидации утечек без раскопки показаны на рисунке 2.1б-ж.

Мобильный робот является характерной мехатронной системой, когда проектно-конструкторские решения по разработке электромеханической, сенсорной и электрической частей принимались только во взаимосвязи, учитывая уже с начальных этапов главный лимитирующий фактор – диаметр трубопровода.

Перспективы развития мобильной робототехники связаны с интеллектуализацией устройств управления и сенсоров, которая, в частности, заключается в автоматическом принятии решений о поведении роботов, это позволит повысить качество проводимых операций и автономность их выполнения.

Автоматическое принятие решений рассматриваемым роботом, без непосредственного участия человека-оператора, целесообразно на следующих операциях:

- обнаружение и распознавание постороннего объекта в трубопроводе с использованием информации системы технического зрения и локационных датчиков;
- планирование траектории и скорости движения при прохождении поворотов на базе сенсорных сигналов от двухкомпонентного датчика крена-дифференциала и датчиков приводных модулей «мотор-колесо»;
- управление режимами работы фрезерной головки на основании информации о действующих силах и моментах;
- диагностика и измерение толщины стенки трубы.

2. Классификация роботов

В целом роботы по использованию в различных сферах деятельности делят на три группы:

- 1) человекоподобные (бытовые);

2) информационные (исследовательские), предназначенные для сбора информации в средах, опасных или не доступных для человека;

3) промышленные, предназначенные для автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности.

Промышленные роботы (ПР) имеют большое число классификационных признаков. Рассмотрим основные из них:

1. По характеру выполняемых операций:
 - технологические (производственные);
 - вспомогательные (подъемо-транспортные);
 - универсальные.
2. По степени специализации:
 - универсальные (многоцелевые);
 - специализированные;
 - специальные (целевые).
3. По способу управления:
 - с «жесткой» программой (I поколение);
 - адаптивные (II поколение);
 - интегральные (III поколение).
4. По области применения (по виду производства):
 - механообработка;
 - кузнечно-прессовое производство;
 - литейное производство;
 - сборка;
 - сварка;
 - транспортно-складские и т. д.
5. По грузоподъемности (главный параметр ПР).

Под номинальной производительностью ПР понимается наибольшее значение массы предметов производства или технологической оснастки, при котором гарантируется их захватывание, удержание и обеспечиваются установленные значения эксплуатационных характеристик ПР.

Если ПР имеет несколько рук, то оценивается грузоподъемность каждой руки.

По грузоподъемности (ГОСТ 25204-82) промышленные роботы подразделяются на:

- 1) сверхлегкие – до 1 кг (0,08; 0,16; 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0);

- 2) легкие от 1 кг до 10 кг (1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0);
- 3) средние от 10 до 200 кг (12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200);
- 4) тяжелые от 200 до 1000 кг (250; 320; 400; 500; 630; 800; 1000);
- 5) сверхтяжелые – свыше 1000 кг (ряд R10 по ГОСТ 8032-56, начиная с 1250).
6. По числу степеней подвижности:
 - с одной степенью подвижности;
 - двумя степенями подвижности;
 - с n степенями подвижности.

Число степеней подвижности манипулятора робота определяется как совокупность числа степеней свободы кинематической цепи манипулятора ПР в системе координат, относительно которой задаются геометрические характеристики рабочей зоны ПР.

Степени подвижности манипулятора делят на:

- переносные, используемые для перемещения рабочего органа в пространстве;
- ориентирующие, используемые для изменения положения РО в пространстве.

Как правило, достаточно 3–4 переносных степени подвижности (что дает больше сотни структурно-кинематических схем манипулятора). Для полной ориентации объекта достаточно 3-х вращательных ориентирующих степеней подвижности.

7. По мобильности (по возможности перемещения):
 - стационарные;
 - подвижные (установленные на транспортное средство).
8. По конструктивному исполнению (по способу установки):
 - напольные;
 - подвесные (портальные, тельферные);
 - встроенные (пристаночные).
9. По виду основных координатных перемещений ПР разделяются на группы роботов, манипуляторы которых работают:
 - а) в прямоугольной системе координат;
 - б) в цилиндрической системе координат;
 - в) в сферической системе координат;
 - г) в угловой системе координат;

д) в комбинированной системе координат.

Каждой из систем координат соответствует вполне определенная кинематико-компоновочная схема манипулятора, вид которой определяется конструктивным исполнением поступательных и вращательных звеньев.

10. По типу силового привода:

- пневматические;
- гидравлические;
- электромеханические;
- комбинированные.

11. По характеру программирования скоростей и перемещений (по виду управления):

- жестко программируемые;
- гибко программируемые.

При жестком программировании исполнительное устройство управляется по неизменной заранее введенной программе.

При гибком программировании – программа может изменяться на основе поставленной цели и информации об объектах управления и производственной среде.

При жестком программировании выделяют:

1) цикловое управление, при котором движение рабочего органа происходит в упорядоченной последовательности с помощью путевых выключателей или времязадающих элементов (число точек обычно – две, три);

2) позиционное управление, при котором движение РО происходит по заданным точкам позиционирования без контроля траектории движения между ними (цикловое управление является частным случаем позиционного).

3) контурное управление, при котором движение РО происходит по заданной траектории с установленным распределением по времени значений скорости.

4) комбинированное управление.

12. По способу программирования:

- программируемые обучением (наиболее распространенный способ);
- программируемые аналитически;
- самообучение.

В первом случае управляющая программа формируется в режиме диалога СПУ с оператором. Оператор с помощью пульта управляет роботом, последовательно отработывая требуемые операции. При этом информация о движениях ПР заносится в запоминающее устройство СПУ робота.

При втором методе программа составляется на основе предварительных расчетов.

В третьем способе: программа формируется на основе информации о состоянии внешней среды.

Управляющая программа – это последовательность инструкций на некотором формальном языке. В общем виде для функционирования ПР необходима следующая информация:

- 1) о последовательности выполнения шагов программы;
- 2) о пространственном положении отдельных степеней подвижности;
- 3) о времени выполнения отдельных шагов программы и отдельных управляющих команд.

Материальным носителем программы могут быть:

- 1) механические устройства (упоры, кулачки, копиры и т.д.);
- 2) коммутаторы (штекерные панели, барабаны, коммутаторные поля и т. д.);
- 3) быстросменные программоносители (перфоленты, магнитные ленты, диски и т. д.).

13. По быстродействию и точности движений.

Эти два параметра взаимосвязаны и характеризуют динамические свойства роботов. Между быстродействием и точностью позиционирования имеется определенное противоречие.

Быстродействие определяется скоростью передвижения по отдельным степеням подвижности:

- малое быстродействие – до 0,5 м/с (до 90 град/с);
- среднее (60–65 % ПР) – от 0,5 до 1 м/с (от 90 до 270 град/с);
- высокое (20 % ПР) – более 1м/с (более 270 град/с).

Быстродействие современных ПР нельзя считать достаточным, оно должно быть повышено не менее чем в 2 раза.

Точность манипулятора характеризуется результирующей погрешностью позиционирования (при дискретном движении) или отработкой заданной траектории (при непрерывном движении).

Чаще всего точность характеризуется абсолютной погрешностью.

1. Малая – при линейной погрешности > 1 мм;
2. Средняя – от 0,1 до 1 мм. (60...65 %);
3. Высокая – менее 0,1 мм (около 15 %).

Погрешность манипулирования ПР, предназначенных для выполнения наиболее грубых, например, транспортных движений, превышает 1 мм.

По сравнению с рукой человека недостатком современных ПР является снижение точности с увеличением скорости хода манипулятора. У человека эти параметры в значительной мере развязаны благодаря разделению движений на грубое (быстрое) и точное (медленное).

Наряду с классификационными параметрами ПР характеризуются параметрами, обуславливающими их технический уровень.

3. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПР (ГОСТ 25378 - 82)

Техническая характеристика содержит следующие основные показатели:

- 1) номинальная грузоподъемность, кг;
- 2) тип привода;
- 3) число степеней подвижности;
- 4) геометрическая характеристика рабочей зоны;
- 5) тип системы управления;
- 6) максимальная абсолютная погрешность позиционирования, мм;
- 7) надежность и др.

1. Показатели привода:

- давление рабочего тела P , МПа;
- расход рабочего тела Q , м³/с;
- напряжение питания U , В;
- потребляемая мощность W , Вт.

2. Показатели степени подвижности:

- максимальное перемещение L , φ , мм, град;
- время перемещения t , с;
- максимальная скорость V , ω , м/с, град/с;
- максимальное ускорение a , ε , м/с², град/с²;
- максимальная абсолютная погрешность позиционирования Δ , мм.

3. Показатели устройства управления:

- объем памяти;

- число одновременно управляемых движений по степеням подвижности;
 - число каналов связи с внешним оборудованием:
 - на вход $n_{вх}$;
 - на выход $n_{вых}$.
 - число программируемых точек:
 - при прямом ходе – $n_{пр}$;
 - при обратном ходе – $n_{обр}$.
4. Показатели захватного устройства:
- усилия захватывания S, H ;
 - время захватывания $t_{захв}, c$;
 - время отпускания $t_{отп}, c$;
 - характерные размеры захватываемого предмета:
 - максимальный диаметр – $d_{max}, мм$;
 - минимальный диаметр – $d_{min}, мм$.
5. Показатели надежности:
- установленная безотказная наработка $t, ч$ (наработка на отказ);
 - установленный срок службы:
 - до капитального ремонта $T_{кап}, лет$;
 - до списания $T_{сп}, лет$.
6. Массогабаритные показатели:
- масса $m, кг$;
 - габаритные размеры $L_1 \times L_2 \times L_3, мм^3$.

Лекция

Тема 3.1.3. Проблемы и современные методы управления мехатронными модулями и системами

ВОПРОСЫ

1. Принципы построения систем интеллектуального управления в мехатронике.
2. Иерархия управления в мехатронных системах.
3. Системы управления исполнительного уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомченко В.Г., Соломин В.Ю. Мехатронные и робототехнические системы. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 160 с.

Введение

Постановку проблемы будем рассматривать применительно к мехатронным системам, которые используются в производственных машинах и комплексах автоматизированного машиностроения как основное технологическое оборудование. К таким системам управления предъявляются, как правило, весьма жесткие требования, так как режимы управления определяют ход технологического процесса и, следовательно, качество получаемого изделия. Именно задачи компьютерного управления технологическими машинами, которые не могли быть решены на базе традиционных подходов, стимулировали разработку и внедрение в практику принципиально новых методов управления.

В общем случае в мехатронике ставится задача управления координированными функциональными движениями машин. Однако в дальнейшем ограничимся рассмотрением вопросов управления только механическими движениями мехатронных систем. Задача управления машиной состоит в исполнении желаемого движения рабочего органа, который целенаправленно действует на объект работ, испытывая при этом со стороны внешней среды возмущающее воздействие. Следовательно, в общем случае объектом управления в мехатронике является сложная многосвязная система, в состав которой входят:

- комплекс исполнительных приводов;
- механическое устройство с рабочим органом;
- блок сенсоров;
- объект работ, с которым взаимодействует рабочий орган.

При этом отдельные блоки и устройства могут быть интегрированы в мехатронные модули. Включение в рассмотрение процесса взаимодействия рабочего органа и внешних объектов (например, для операций сборки, механообработки, водоструйной резки) позволяет организовать технологически ориентированный процесс управления, учитывающий характер и специфику данного взаимодействия в конкретно поставленной задаче. Указанная структура объекта управления опреде-

ляет требования и постановку задачи управления мехатронными системами рассматриваемого класса. Очевидно, что воспроизведение заданных движений мехатронными модулями основывается на выполнении классических требований теории управления: устойчивости, точности и качества процесса управления. Однако дополнительно необходимо учитывать следующие специфические особенности мехатронных систем:

1. Движение рабочего органа как конечного управляемого звена обеспечивается взаимосвязанными (кинематически и динамически) перемещениями нескольких исполнительных приводов и звеньев механического устройства.

2. Задача управления мехатронной системой должна быть решена в пространстве (т. е. найдены оптимизированные траектории движения всех звеньев, включая рабочий орган) и во времени (т. е. определены и реализованы желаемые скорости, ускорения и развиваемые усилия для всех приводов системы).

3. Для многих технологических задач параметры внешних и возмущающих воздействий, приложенных к рабочему органу и отдельным мехатронным модулям, заранее не определены.

4. Сложность построения адекватных математических моделей мехатронных систем традиционными аналитическими методами (особенно прецизионных многосвязных систем, включающих динамическую модель технологического процесса).

Структурно мехатронные системы являются многомерными и многосвязными системами. Размерность задачи управления в мехатронике определяется числом независимо управляемых приводов системы. В случае общего механизма исходно задается желаемое движение рабочего органа, а реализуется оно совокупными перемещениями всех звеньев.

Отсюда возникают специальные математические, алгоритмические и технические задачи управления.

Для планирования заданного движения мехатронной системы необходимо решить обратную задачу о положении механизма. Суть данной задачи состоит в определении требуемых перемещений звеньев системы по заданному закону движения рабочего органа.

Проблемным является вопрос организации обратных связей при управлении многозвенными мехатронными системами. Технически наиболее просто устанавливать датчики положения и скорости в приводных модулях. Однако затем необходимо вычислить в реальном времени фактическое перемещение рабочего органа.

Причем этот компьютерный расчет требует построения адекватной динамической модели системы с учетом весьма сложных для аналитической оценки факторов:

- всех действующих сил (управляющих моментов приводов, сил трения и диссипации, внешних сил и моментов, центробежных и кориолисовых сил);
- первичных погрешностей системы (упругих деформаций звеньев, люфтов в механических передачах, погрешностей изготовления и сборки, узлов), которые определяют ее интегральные точностные характеристики в текущей конфигурации;
- переменных параметров объекта управления (приведенных моментов инерции и масс механизма и нагрузки).

Поэтому наилучшим вариантом с точки зрения достоверности получаемой информации о фактическом движении является установка датчиков непосредственно на рабочий орган. Примерами такого подхода могут служить:

- применение систем технического зрения для определения положения рабочего органа и объектов в рабочей зоне (например, на сборочных операциях);
- установка силомоментных датчиков в запястье манипулятора для измерения действующих сил на операциях механообработки;
- использование блоков акселерометров для определения линейных ускорений непосредственно рабочего органа при быстрых транспортных перемещениях.

Перспективным представляется также сочетание рассмотренных подходов при выборе обратных связей в сложных мехатронных системах.

Характерной особенностью мехатронных систем для автоматизированного машиностроения является возможность разделения задач программного управления движением на пространственную и временную. Это означает, что траектория перемещения рабочего органа в пространстве и его контурная скорость могут планироваться отдельно с использованием различных критериев оптимизации. Например, для робототехнического комплекса механообработки программа перемещения и ориентации инструмента в пространстве определяется по графической модели обрабатываемой детали в системе AutoCAD, либо заданием опорных точек в режиме обучения. Скорость движения рабочего органа робота вдоль траектории должна быть выбрана с учетом специфики рабочего процесса: размеров и твердости материала заготовки, типа инструмента, а также технических возможностей приводов инструментальной головки и манипулятора. Оптимизацию закона движения технологической машины во времени обычно проводят по критериям производительности, точности обработки, а также по экономическим и комбинированным показателям.

1. Принципы построения систем интеллектуального управления в мехатронике

Главная отличительная черта современной теории управления – это развитие интеллектуальных методов управления техническими системами, которая очень отчетливо проявляется в мехатронике как одной из передовых научно-технических областей. Именно интеллектуальные методы позволяют эффективно решать задачи управления мехатронными системами.

К основным признакам систем интеллектуального управления рассматриваемого класса применительно к задачам мехатроники следует отнести:

- способность автономно (без участия человека-оператора) принимать решения о поведении системы в некоторых заранее не определенных ситуациях;
- возможность адаптировать (приспосабливать) структуру и законы движения мехатронной системы к изменяющимся условиям внешней среды и возмущающим воздействиям;
- способность системы управления к самообучению и накоплению знаний в процессе действий управляемой машины и их использование в последующих задачах управления;
- применение процедур оптимизации на этапах планирования, программирования и исполнения всех функциональных движений машины;
- оценка качества выполняемых движений и диагностика фактического состояния управляемой машины и протекающих процессов в реальном времени;
- эффективное взаимодействие с человеком-оператором, использование его интеллекта как эксперта и навыков при планировании действий машины;
- иерархичность структуры системы с четким выделением функций, информационного обеспечения и обратных связей для каждого уровня управления;
- гибкое взаимодействие распределенных подсистем через компьютерные сети для достижения общих для всей системы целей управления;
- повышенные показатели гибкости, робастности и точности управления.

2. Иерархия управления в мехатронных системах

Иерархическая структура – это многоуровневый набор взаимодействующих подсистем, каждая из которых ответственна за решение определенной задачи и

имеет доступ к сенсорной информации, необходимой для решения задач управления данного уровня.

В современных мехатронных системах, как правило, используется иерархия «сверху – вниз», когда нижний уровень полностью подчинен вышестоящим.

Рассмотрим иерархию управления, типичную для мехатронных (в частности, робототехнических) систем. Данная структура была предложена в работах академика Е. П. Попова. Выделяются четыре уровня управления: интеллектуальный, стратегический, тактический и исполнительный (рис. 4.1).

Интеллектуальный уровень – высший уровень управления в системе. Назначение этого уровня – принятие решений о движении механической системы в условиях неполной информации о внешней среде и объектах работ. Например, рассмотрим ситуацию, когда мобильный робот при движении в трубопроводе получает информацию от системы технического зрения о наличии препятствия. Возможные следующие постановки задачи движения:

- остановить движение и вернуться в исходную позицию;
- определить тип и характеристики препятствия и убрать обнаруженный объект;
- продолжить исполняемое движение, игнорируя наличие внешнего объекта.

Функции интеллектуального уровня в современных мехатронных системах обычно выполняет человек – оператор либо мощный компьютер верхнего уровня управления.

Стратегический уровень управления предназначен для планирования движений мехатронной системы. Планирование движений предполагает разбиение задачи движения, поставленной интеллектуальным уровнем, на последовательность согласованных во времени элементарных действий и формализацию целей управления для каждого из этих действий.

Примерами элементарных действий мобильного робота может служить:

- вывод рабочего органа в заданную позицию;
- захват предмета;
- тестовое движение для определения сил реакции со стороны объекта;
- транспортировка объекта и возвращение робота в исходную позицию.

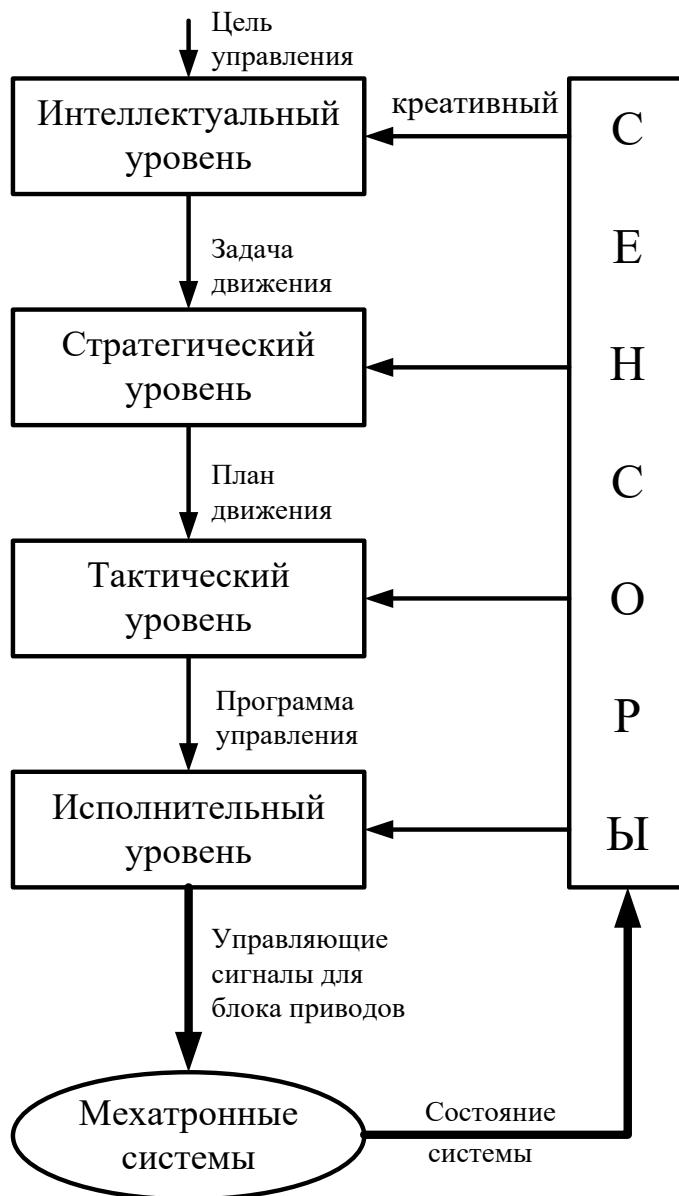


Рис. 4.1. Уровни управления в мехатронных системах

Формализация целей управления означает, что для каждого из элементарных действий должны быть записаны математические соотношения, выполнение которых обеспечивает успешное выполнение действия. Для технологических роботов на стратегическом уровне решается задача геометрического планирования движения рабочего органа.

Стратегический уровень выдает информацию о плане движения и целях управления в форме команд управления движением. Важно подчеркнуть, что структура и форматы языков управления движением существенно отличаются от универсальных языков программирования (типа C++, Паскаль и т. п.), хотя отдельные операторы могут совпадать (например, операторы задания цикла и логические функции).

Тактический уровень выполняет преобразование команд управления движением, поступающих со стратегического уровня управления, в программу управления, которая определяет законы согласованного движения во времени всех звеньев механического устройства с учетом технических характеристик блока приводов (в первую очередь ограничений на обобщенные скорости, ускорения и силы).

На тактическом уровне необходимо определить обобщенные координаты манипулятора, которые соответствуют желаемым декартовым координатам характеристической точки схвата. Для этого должна быть решена обратная задача о положении манипулятора.

Для управления скоростью движения программа управления строится как результат решения обратной задачи о скорости рабочего органа. Для реализации данных алгоритмов устройство компьютерного управления должно выполнять в реальном времени следующие основные функции:

- прием информации от стратегического уровня в форме команд управления движением;
- прием и обработку информации от датчиков положения манипулятора о текущей конфигурации для расчета элементов матрицы Якоби;
- обращение матрицы Якоби;
- умножение обратной матрицы Якоби на вектор-столбец программной скорости рабочего органа;
- выдачу программы управления на исполнительный уровень.

Исполнительный уровень управления предназначен для расчета и выдачи управляющих сигналов на блок приводов мехатронной системы в соответствии с программой управления с учетом технических характеристик силовых преобразователей.

Для иерархических систем управления в мехатронике действует принцип, согласно которому по мере продвижения от высших к низшим уровням управления понижается интеллектуальность системы, но повышается ее точность. При этом под «интеллектуальностью» понимается способность системы приобретать специальные знания, позволяющие уточнить поставленную задачу и определить пути ее решения, а под «неточностью» – неопределенность в операциях по решению данной задачи.

Рассмотрим несколько примеров мехатронных модулей и систем с интеллектуальным управлением, обладающих некоторыми из перечисленных признаков.

3. Системы управления исполнительного уровня

Контроллеры движения являются устройствами управления исполнительного уровня согласно принятой иерархии управления движением мехатронных систем. Назначение устройства управления состоит в обеспечении заданных требований по устойчивости, точности и качеству переходных процессов в системе при достижении цели управления движением, которая поступает с тактического уровня управления. При этом необходимо учитывать специфику мехатронных объектов управления.

Структурная схема системы управления движением, реализуемая типовым контроллером, представлена на рисунке 4.2. В состав системы входят пять основных регуляторов: регулятор положения (РП), регулятор скорости (РС), регулятор момента сил или силы (РМ), регулятор прямой связи по скорости изменения управляющего воздействия (РПСС) и регулятор корректирующей связи по возмущающему воздействию (РСВВ).

Входными воздействиями для системы могут быть в зависимости от поставленной цели управления управляющие сигналы по положению q_p , скорости q_c , либо по развиваемому усилию q_m . В системе реализуется принцип замкнутого управления, что предусматривает наличие соответствующих обратных связей по фазовым координатам системы.

Наиболее общим является алгоритм ПИД-регулирования, когда выходной сигнал описывается выражением:

$$u(t) = K_{\Pi} \cdot e(t) + K_{\text{д}} \cdot \frac{de}{dt} + K_{\text{и}} \int_0^t e(t) \cdot dt \quad (4.1)$$

где K_{Π} , $K_{\text{д}}$, $K_{\text{и}}$ – коэффициенты, соответственно, пропорциональной, дифференциальной и интегральной составляющих сигнала; $e(t)$ – сигнал ошибки в данном контуре управления (положения, скорости или момента). В конкретных случаях некоторые из этих коэффициентов можно положить равными нулю, фактически применяя упрощенные алгоритмы управления (П-алгоритм, PI-алгоритм и т. д.).

Традиционный подход предусматривает, что структура и коэффициенты всех корректирующих устройств определяются при проектировании системы и далее остаются фиксированными в процессе ее эксплуатации. В современных системах управления вид и параметры регуляторов автоматически модифицируются в зависимости от цели конкретного движения и условий, в которых оно фактически осуществляется. Это позволяет адаптировать (приспособить) движение мехатронной

системы к начальной неопределенности и изменяющимся условиям работы. Следуя подходу проф. Я. З. Цыпкина, адаптация, по существу, есть оптимизация в условиях недостаточной априорной информации.

Адаптивная настройка регуляторов необходима, если введенные отрицательные обратные связи в исполнительных приводах не способны парировать влияние возмущающих воздействий и изменения параметров (и, возможно, структуры) объекта управления, которые вызывают недопустимое снижение показателей качества управляемого движения. Разработчик должен отдавать себе отчет в том, что адаптивные регуляторы по сравнению с традиционными имеют существенно более сложную структуру и техническую реализацию, их проектирование требует решения целого ряда теоретических проблем управления. Поэтому решение о применении адаптивного регулятора в мехатронных системах автоматизированного машиностроения должно быть обязательно технологически и технически обосновано. Законы настройки регуляторов определяются либо набором алгоритмов и правил, сформулированным разработчиком на базе имеющегося опыта, либо на основании знаний, накопленных самой машиной в процессе анализа ее предшествующих действий. Рассмотрим некоторые современные методы построения адаптивных регуляторов исполнительного уровня, ограничившись только параметрической адаптацией.

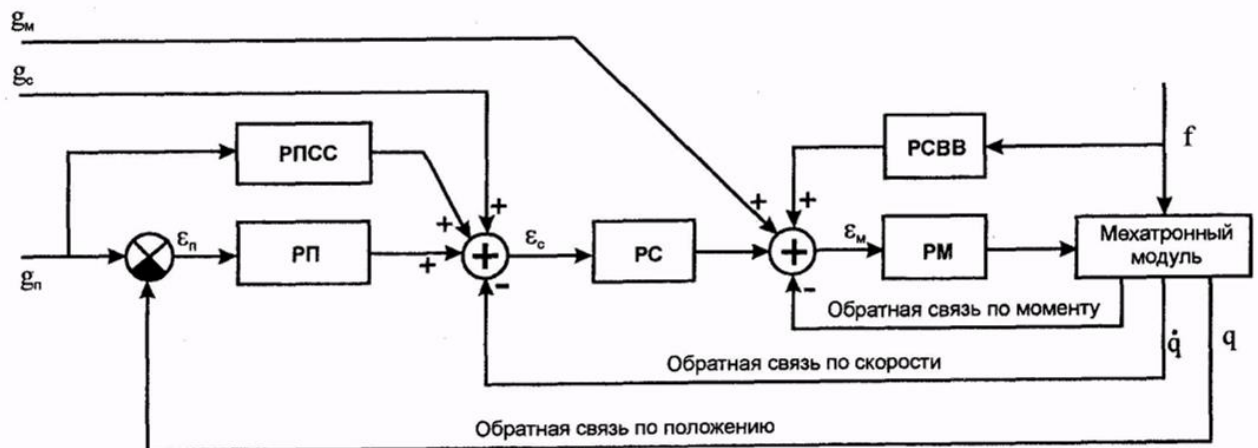


Рис. 4.2. Структурная схема системы управления движением на исполнительном уровне:

$q, \dot{q}$ – обобщенные координата и скорость управляемого движения

4.3.1. Адаптивное регулирование по эталонной модели

На рисунке 4.3 показан один из часто используемых в исполнительных приводах вариантов адаптивного управления, где параметры регулятора настраиваются управляющим компьютером по эталонной модели.

Эталонная модель показывает идеальную желаемую реакцию системы на задающий сигнал $g(t)$. В качестве эталонной модели применяют типовые звенья систем автоматического управления (например, апериодическое звено). Параметры ПИД-регулятора настраиваются так, чтобы минимизировать рассогласование между выходом модели и реальной системы.

Задача контура настройки состоит в том, чтобы свести это рассогласование к нулю за определенное время с гарантией устойчивости переходного процесса. Данная проблема далеко не тривиальна – можно показать, что она не решается при линейных соотношениях «ошибка – коэффициенты регулятора». Например, в литературе предложен следующий алгоритм настройки параметров:

$$\frac{dk}{dt} = -A \cdot c \cdot \text{grad}_k c, \quad (4.2)$$

где k – настраиваемые коэффициенты ПИД-регулятора; A – постоянный коэффициент, задающий скорость адаптации.

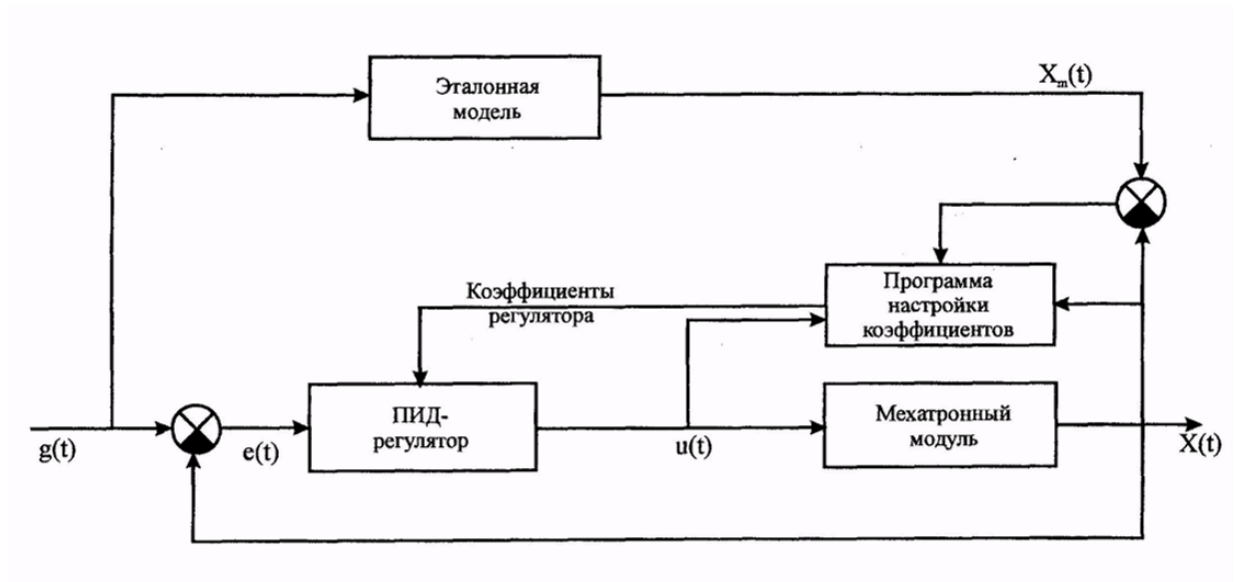


Рис. 4.3. Блок-схема адаптивной системы с эталонной моделью

Функция градиента определяет чувствительность ошибки $c(t)$ к вариации коэффициентов регулятора. Абсолютная устойчивость замкнутой системы, которая является существенно нелинейной, обеспечивается подбором параметра A в про-

грамме настройки. Таким образом, управляющий компьютер для реализации адаптивного управления по данной схеме должен в реальном времени решать следующие задачи:

- формировать задающий сигнал для управляемой системы;
- рассчитывать идеальную реакцию по эталонной модели;
- вычислять коэффициенты регулятора в соответствии с программой настройки, определять текущую ошибку и выдавать сигнал управления на вход мехатронного модуля.

Помимо рассмотренной блок-схемы с эталонной моделью известны и другие методы автоматической настройки параметров и структуры регуляторов.

3.2. Нечеткие регуляторы исполнительного уровня

Методологической основой для проектирования нечетких регуляторов является концепция нечеткой логики.

В основе стандартных современных компьютеров лежит логика «четкого мира». Они работают только с двумя базовыми логическими переменными «Да» и «Нет» и детерминированными числовыми данными, поэтому свойства этого мира описываются совокупностями нулей и единиц.

Однако на практике очень часто приходится иметь дело с неопределенными, нестрогими свойствами объектов и процессов, которые не могут быть формализованы в понятиях «четкого мира».

Общий смысл этих понятий нам очевиден, но сделать однозначный вывод о принадлежности конкретного объекта к данному множеству только с помощью слов «Да» и «Нет» зачастую затруднительно, необходимо узнать мнение нескольких экспертов. Английское слово «fuzzy», буквально означающее «ворсистый», «пушистый» – специальный термин, определяющий свойство тканей. Рисунок ворсистой ткани кажется нам размытым, нечетким, неясно очерченным, что соответствует образам «нечеткого мира».

Целесообразность применения методов нечеткой логики при управлении мехатронными системами обусловлена особенностями постановки задач управления, которые заключаются в априорной неопределенности возмущающих воздействий, переменности параметров мехатронных объектов управления и в сложности построения аналитических моделей систем. Характерно, что теория нечетких множеств была предложена проф. Л. Заде именно для решения проблем управления сложными техническими системами.

Структурная схема нечеткого регулятора с параметрической адаптацией приведена на рисунке 4.4. Нечеткий контроллер функционирует на основе экспертной базы знаний и выполняет следующие основные операции:

- преобразование данных о переменных состояния системы в нечеткую форму (операция фазификации), хранение и обработка нечеткой информации;
- выполнение нечетких выводов по лингвистическим правилам управления, заложенным в базу знаний;
- перевод нечетких переменных в четкое представление для управления системой (операция дефазификации).

Для математического представления нечеткой информации используются нечеткие множества, состав объектов которых зависит от мнения экспертов, цели и времени формирования множества. Состав множества задается с помощью функций принадлежности, имеющих вероятностный характер. Так, выражение $m_A(X) = C$ означает, что элемент A принадлежит множеству X с вероятностью C .

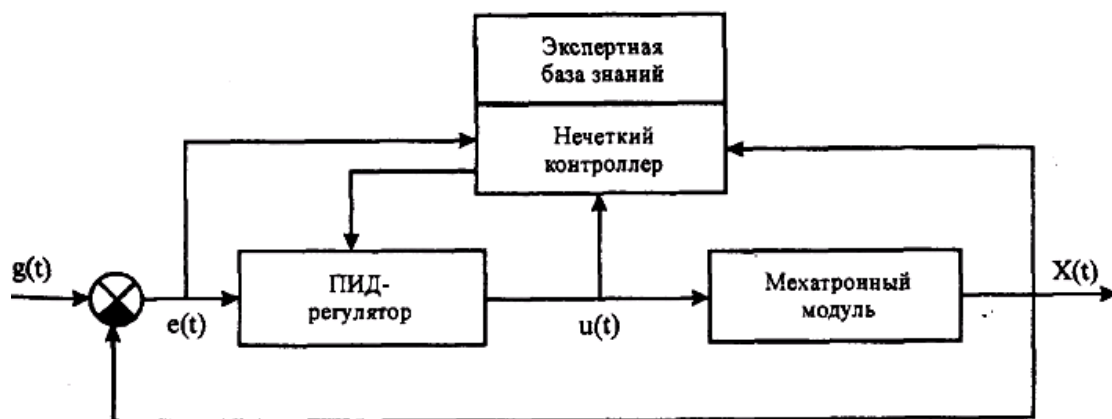


Рис. 4.4. Блок-схема нечеткого регулятора

Функции принадлежности допускают графическую интерпретацию, при этом по оси ординат может откладываться как числовая, так и лингвистическая переменная, причем возможно как непрерывное, так и дискретное представление функции.

В качестве иллюстрации на рисунке 4.5 приведены графики функций принадлежности, описывающие для сигнала рассогласования $e(t)$ в замкнутой системе (рис. 4.4) нечеткое множество X = «Большая ошибка» (по оси абсцисс отложена безразмерная величина относительной ошибки $e_0 = |e| / a$ (здесь: $|e|$ – модуль сигнала рассогласования; a – максимальная величина ошибки)).

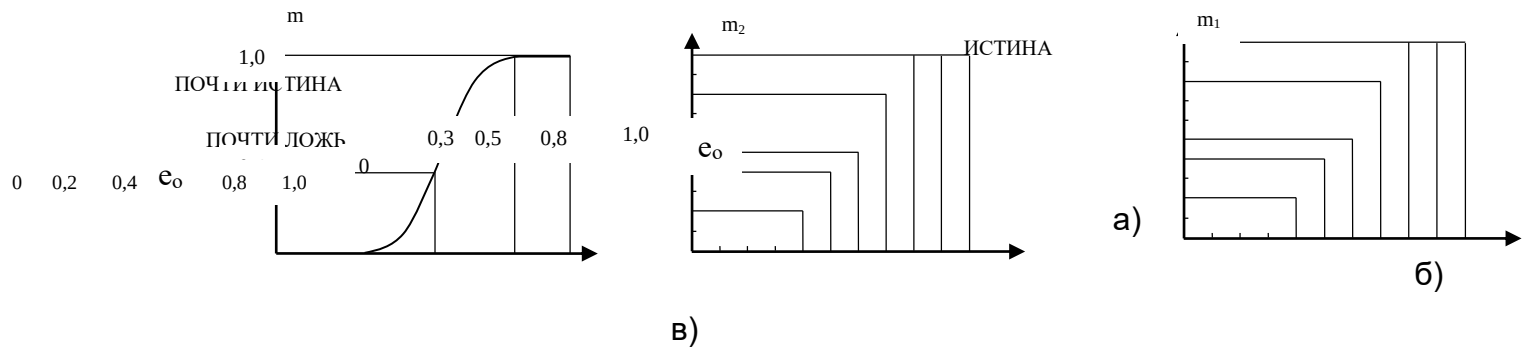


Рис.4.5. Графическое представление функций принадлежности: (а) – непрерывная числовая функция принадлежности; (б) – дискретная числовая функция принадлежности; (в) – дискретная лингвистическая функция принадлежности

Лингвистические значения – это уровни, присвоенные описательной информации в результате экспертного опроса. Важно подчеркнуть, что они соответствуют числовой вероятностной функции, поэтому для их хранения в базе знаний можно использовать стандартные формы (например, двумерные массивы). Разработан математический аппарат, позволяющий выполнять над нечеткими множествами и функциями принадлежности все необходимые операции при фазификации.

Лингвистические правила управления (ЛПУ) рассмотрим на примере построения нечеткого ПИД-регулятора для управления скоростью движения мехатронного модуля (рис. 4.4).

Уравнение ПИД-регулятора в непрерывной форме имеет вид (4.1). Для малых периодов квантования T это уравнение можно преобразовать в разностное, если заменить производную разностью первого порядка, а интеграл – суммой. При использовании численного интегрирования по методу прямоугольников получаем для k -го шага управления:

$$u(k) = K_{\Pi} \cdot e(k) + K_{\text{И}} \cdot T \cdot \sum_{i=0}^k e(k-i) + K_{\text{Д}} \cdot T^{-1} [e(k) - e(k-1)] \quad (4.3)$$

Для вычисления суммы на текущем i -м шаге, входящей в данное уравнение, необходимо помнить все предыдущие значения сигнала ошибки $e(k)$, $k=0, \dots, i$. Поэтому этот алгоритм мало эффективен для управления в реальном времени. Для получения рекуррентного алгоритма достаточно вычесть из уравнения (4.3) следующее уравнение:

$$u(k-1) = K_{\Pi} \cdot e(k-1) + K_{\text{И}} \cdot T \cdot \sum_{i=0}^{k-1} e(k-1-i) + K_{\text{Д}} \cdot T^{-1} [e(k-1) - e(k-2)]$$

В результате получим формулу для определения приращения управляющего сигнала:

$$\begin{aligned}\Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) = K_{\Pi} [e(k) - e(k-1)] + K_{\text{И}} \cdot T \cdot e(k) + \\ &+ K_{\text{Д}} \cdot T^{-1} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] = \\ &= K_{\Pi} \cdot \Delta e(k) + K_{\text{И}} \cdot T \cdot e(k) + K_{\text{Д}} \cdot T^{-1} \cdot \Delta^2 e(k),\end{aligned}\tag{4.4}$$

где $\Delta e(k), \Delta^2 e(k)$ – конечные разности соответственно 1-го и 2-го порядков дискретного сигнала ошибки.

В уравнении (4.4) первое слагаемое соответствует пропорциональной компоненте ПИД- регулятора, второе слагаемое – интегральной компоненте, а третье – дифференциальной составляющей регулятора.

На основании выражения (4.4) составлены следующие ЛПУ для нечеткого контроллера:

$$\begin{aligned}\text{ЛПУ1: ЕСЛИ } e_k \text{ ЕСТЬ } P_1, \text{ ТО } \Delta U_k \text{ ЕСТЬ } P_{U1}; \\ \text{ЛПУ2: ЕСЛИ } e_k \text{ ЕСТЬ } N_1, \text{ ТО } \Delta U_k \text{ ЕСТЬ } N_{U1}; \\ \text{ЛПУ3: ЕСЛИ } \Delta e_k \text{ ЕСТЬ } P_2, \text{ ТО } \Delta U_k \text{ ЕСТЬ } P_{U2}; \\ \text{ЛПУ4: ЕСЛИ } \Delta e_k \text{ ЕСТЬ } N_2, \text{ ТО } \Delta U_k \text{ ЕСТЬ } N_{U2}; \\ \text{ЛПУ5: ЕСЛИ } \Delta^2 e_k \text{ ЕСТЬ } P_3, \text{ ТО } \Delta U_k \text{ ЕСТЬ } P_{U3}; \\ \text{ЛПУ6: ЕСЛИ } \Delta^2 e_k \text{ ЕСТЬ } N_3, \text{ ТО } \Delta U_k \text{ ЕСТЬ } N_{U3}.\end{aligned}\tag{4.5}$$

Здесь величины P_i, P_{ui} и N_i, N_{ui} ($i = 1, 2, 3$) – соответственно положительные и отрицательные переменные для сигналов рассогласования и управления, функции принадлежности которых представлены на рисунке 5.6. Функции принадлежности для сигнала ошибки имеют вид кривой с насыщением (типа арктангенса), для управляющего сигнала – обычную линейную форму.

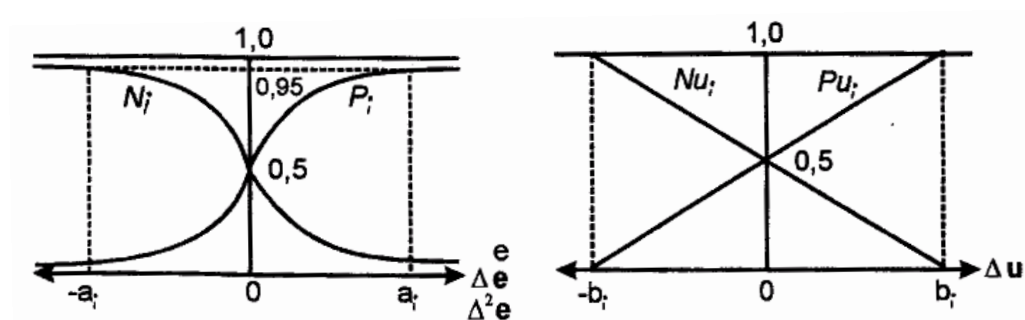


Рис. 4.6. Функция принадлежности сигналов системы

Правило ЛПУ1 означает, что «если текущая скорость $x(k)$ меньше заданной (другими словами, ошибка $e(k)$ положительна), то увеличить управляющий сигнал».

Правило ЛПУ4: «если скорость возрастает (т. е. приращение ошибки отрицательно), то понизить управляющий сигнал». Можно заметить, что в ряде ситуаций нечеткий вывод должен заключаться в компромиссе между противоположными по знаку действиями (например, по правилам ЛПУ1 и ЛПУ4).

Результатом нечеткого вывода является лингвистическое значение искомой переменной. Далее по функции принадлежности необходимо найти ее численное значение (для ПИД-регулятора – конкретные значения его параметров).

Разработаны многочисленные компьютерные методы автоматического выполнения нечетких выводов, фазификации и дефазификации переменных, с которыми можно ознакомиться в специальной литературе.

Операции с нечеткими множествами возможно реализовать и на универсальных компьютерах. Однако в современных системах управления все шире используются специальные аппаратные средства – нечеткие компьютеры и нечеткие контроллеры (ЭВМ шестого поколения). В состав таких компьютеров входят следующие обязательные блоки:

- блоки, реализующие функции нечеткой логической суммы и произведения, на основе которых можно построить более сложные операционные устройства;
- устройства нечеткой памяти, технологически выполненные на отдельном кристалле;
- машина нечетких выводов (производительность японского цифрового нечеткого процессора FC110 составляет 28000 логических правил в 1с);
- блок дефазификации;
- устройства ввода/вывода информации.

Анализ современных тенденций развития теории и техники управления показывает, что нечеткие контроллеры являются одним из наиболее перспективных устройств управления для сложных технических (в частности, мехатронных) систем. Мы рассмотрели применение нечеткого контроллера на низшем – исполнительном уровне управления. Но тем более данный подход эффективен для высших уровней управления, где требуется принимать решения и планировать движение системы в условиях неопределенной информации о внешней среде и объектах работ.

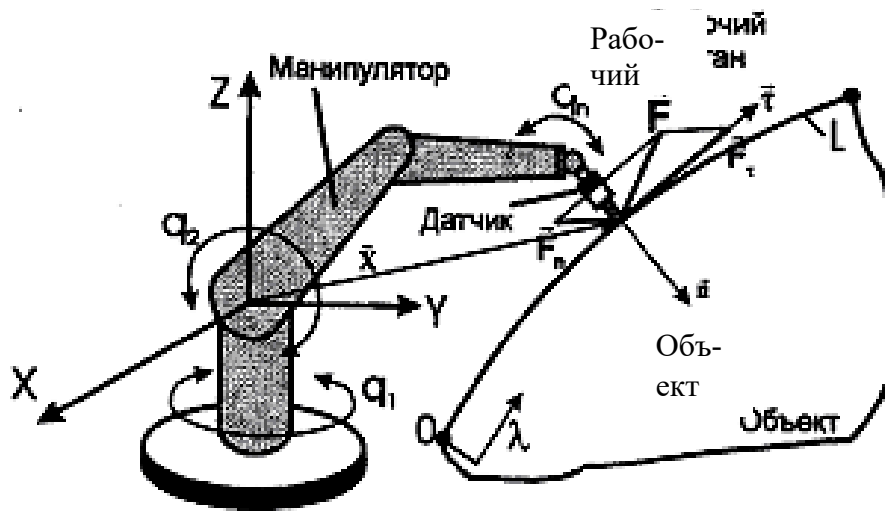
3.3. Системы управления тактического уровня

Система контурного силового управления

технологическим роботом

Рассмотрим построение системы управления тактического уровня для технологического робота, выполняющего операции механообработки на основе параметрического подхода.

Технологическая постановка задачи предполагает одновременное управление перемещением рабочего органа по заданной траектории (кривая L) и развиваемой в процессе движения силой (вектор F), которая воздействует на объект работ (рис. 4.7). Таким образом, в системе должны сочетаться методы контурного и силового управления движением робота.



Робот при этом действует аналогично человеческой руке.

Действительно, развивая определенные усилия в суставах руки, человек может перемещать в пространстве предметы, выполнять механи-

Рис. 4.7. Схема роботизированной механообработки

ческую работу. В то же время он с помощью нервно-мышечной системы воспринимает и обратные силовые воздействия со стороны объекта, что позволяет выполнять человеку многие сложные операции, (например, сборочные) даже вслепую.

Приложение принципа двустороннего действия для технологических роботов требует учета их специфики как объекта автоматического управления, а также особенностей роботизированных технологических операций.

На рисунке 4.8 приведена блок-схема системы контурного силового управления, которая обеспечивает адаптацию движения робота к возмущающему силовому воздействию. Силомоментный датчик, установленный в запястье манипулятора, дает информацию о силах, действующих непосредственно на рабочий орган. Силовая обратная связь замыкает систему управления на тактическом уровне, что в сочетании с обратными связями в исполнительных приводах обеспечивает необходимую точность движения. Вычислитель контурной скорости служит для задания

технологически рационального скоростного режима движения робота по заданной траектории.



Рис. 4.8. Блок-схема контурного силового управления

Задачи интерполяции траектории и решения обратной задачи о положении выполняются управляющей ЭВМ в реальном масштабе времени. Результатом работы этих программ является формирование вектора обобщенных координат $q_{pr}(t)$, который определяет желаемые перемещения степеней подвижности манипулятора.

Особенность параметрического подхода состоит в независимом задании траектории рабочего органа в пространстве и в адаптивном управлении его контурной скоростью во времени. Раздельное формирование законов управления движением мехатронной системы в пространстве и во времени позволяет использовать различные критерии при их оптимизации, что соответствует постановке задач управления мехатронными системами.

При этом движение рабочего органа как конечного управляемого звена обеспечивается согласованными перемещениями всех исполнительных приводов и звеньев манипулятора.

Предлагаемый параметрический подход позволяет также учесть влияние рабочего процесса на движение робота при выполнении операции. Можно выделить два вида технологических возмущений при механообработке:

а) погрешности базирования и формы объекта работ, которые имеют систематический характер для конкретного изделия;

б) случайные изменения технологических параметров, например колебания припуска и локальные изменения свойств материала.

Систематические погрешности в рассматриваемой системе учитываются на этапе программирования траектории L. Использование адаптивного регулятора позволяет компенсировать влияние отклонений технологических параметров, которые носят случайный характер. Таким образом, осуществляется комбинация коррекции траектории рабочего органа в пространстве (в режиме off-line) с адаптивным управлением контурной скоростью робота во времени (в режиме on-line).

Использование параметрического подхода позволяет свести задачу адаптивного управления многомерной нелинейной системой «технологический робот – рабочий процесс» к синтезу адаптивного управления скалярным параметром – контурной скоростью. Решение этой задачи в реальном масштабе времени, как показали эксперименты, возможно с использованием серийно выпускаемых микропроцессорных устройств управления.

3.4. Способы программирования траекторий технологических роботов

Рассмотрим способы и особенности программирования траектории технологических роботов на примере РТК механообработки.

Выбор декартовой системы координат для задания траектории предопределен тем, что во всех рассмотренных технологических операциях необходимо управлять движением непосредственно рабочего органа относительно объекта работ.

Применяются следующие основные способы программирования траектории:

- 1) обучение робота человеком-оператором с помощью дистанционного пульта;
- 2) автоматизированная подготовка программы на внешнем компьютере с использованием средств САПР и последующей ее загрузкой в систему управления робота;
- 3) метод «самообучения» робота.

Примером современного дистанционного пульта может служить пульт управления «KUKA Control Panel», которым оснащаются технологические роботы АО АВТОВАЗ.

Пульт изготовлен с учетом эргономических требований и выполняет функции интерфейса «человек – машина» в режимах обучения и управления движением.

Пульт имеет 8-дюймовый дисплей, пленочную клавиатуру, мышь 6D для управления по шести координатам, кнопки аварийного отключения, включения/выключения приводов, переключатель режимов работы и выключатели разрешения. С помощью стандартного штекера к пульту можно дополнительно подключить клавиатуру персонального компьютера. Микроконтроллер отправляет клавиатурные данные по стандартной шине в персональный компьютер, дисплейная информация передается через высокоскоростной последовательный интерфейс.

Метод «самообучения» предполагает предварительное прохождение инструментом детали-эталоны, когда координаты точек траектории автоматически вводятся в память компьютера. Запись точки производится при касании инструмента, который выполняет роль щупа базовой поверхности детали. По сути, робот работает в этом варианте как координатно-измерительная машина. Компьютер обрабатывает массив полученных точек и формирует необходимое и достаточное количество опорных точек траектории. Координаты опорных точек передаются по специальному интерфейсу из компьютера в систему управления робота.

При автоматизированном программировании пространственных траекторий одним из часто используемых графических форматов является формат, в котором содержится описание последовательности и декартовых координат опорных точек, но при этом нет описания графических примитивов (линия, окружность, сплайн). Основным недостатком данного подхода является использование линейной интерполяции для выполнения движения между точками, что неприемлемо для мехатронных систем при высоких требованиях к точности движения. Для систем этого класса следует использовать формат, содержащий графические примитивы и осуществлять интеллектуальную сегментацию траектории, заданной простым текстовым форматом. Для проведения интеллектуальной сегментации траектории движения с целью интерполяции ее графическими примитивами используется нечеткий интерполяционный фильтр. Основным геометрическим примитивом для проводимой интерполяции является кубический сплайн, а частными его случаями является прямая линия и окружность.

3.5. Интеллектуальные системы управления на основе искусственных нейронных сетей

Системы управления на основе искусственных нейронных сетей (НС) – один из ярких примеров бионического подхода, когда принципы функционирования и управления живыми организмами эффективно использованы для создания нового

поколения систем управления техническими (в частности, мехатронными) системами.

Нервная система биологических объектов состоит из нейронов. Так, нервная система человека включает в себя от 10^{10} до 10^{12} нейронов 57 модификаций, размером от микрометров до нескольких сантиметров. Типовая форма нейрона представлена на рисунке 4.9. Поток электрических сигналов входит в нейрон через его окончания (синапсы), которых может быть до 1000 на одном дендрите (ответвлении). Через дендриты информация поступает в тело клетки, где происходит ее обработка и оценка. Результат этой логической оценки (1 или 0) по аксону (стволу клетки) передается далее вниз, где информация расходится по корням нейронных структур следующего уровня. Каждый нейрон имеет связь приблизительно с 10^4 других нейронов. Нервные импульсы передаются как потоки химически активных заряженных веществ (ионов).

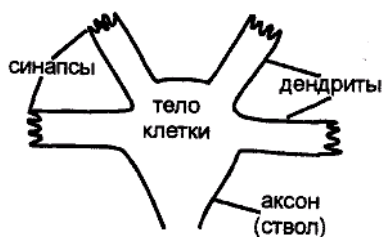


Рис. 4.9. Биологический нейрон

Математическая модель единичного нейрона строится на основе следующей схемы (рис. 4.10). Входные сигналы поступают на сумматор, где определяется их взвешенная сумма (с учетом весовых коэффициентов):

$$U = W_1 \cdot X_1 + W_2 \cdot X_2 + \dots + W_n \cdot X_n.$$

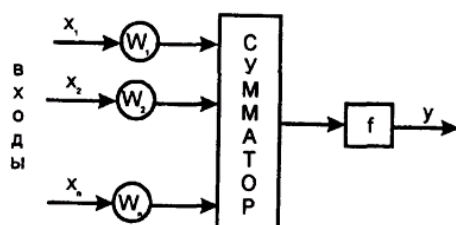


Рис. 4.10. Математическая модель нейрона

Выходной сигнал нейрона формируется на выходе нелинейного блока. При реализации нелинейного блока f обычно используются пороговые и экспоненциальные функции.

Данная математическая модель нейрона легко реализуется на компьютере. В компьютерных моделях, как и в биологических системах, нейроны объединяются в сети, которые могут состоять из многих слоев и иметь различные структуры, включающие участки с последовательным, параллельным, с обратной связью и другими соединениями нейронов. На рис. 4.11 показан пример трехслойной нейронной сети с последовательным соединением слоев. Нейронные сети обучаются разработчиком системы на конкретных примерах. При обучении разработчик вводит информацию о входных и соответствующих (желаемых) выходных сигналах. Специальная программа настройки сети автоматически подбирает весовые коэффициенты для всех нейронов таким образом, чтобы добиться желаемого соответствия. Обучение разработчик повторяет на всех известных ему примерах, аккумулируя весь имеющийся предварительный опыт. Таким образом, настроенная сеть готова к решению новых задач для других комбинаций входных сигналов. Главная особенность метода нейронных сетей состоит в том, что разработчик не должен программировать четкий алгоритм решения задач, а только задавать входные и выходные данные для обучения.

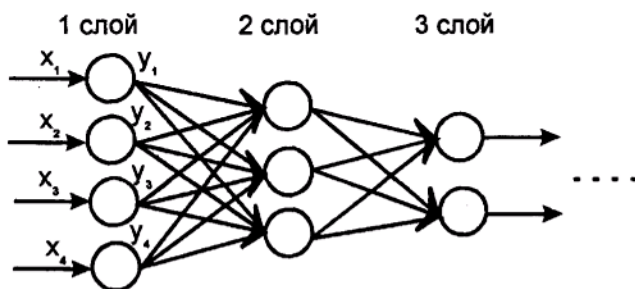


Рисунок 4.11 Трехслойная нейронная сеть

Проблемы применения нейронных сетей на практике связаны с выбором типа нейронов (т. е. нелинейной функции f), количества слоев и структуры сети для решения конкретной задачи с требуемой точностью.

Контроллеры на основе НС эффективны в случаях, когда создание адекватной аналитической модели исполнительной системы и синтез на ее основе регуляторов крайне затруднен. Такая ситуация может быть обусловлена целым рядом факторов, среди которых наиболее распространенными являются:

Управление цифровых образовательных технологий

- наличие заранее неопределенных внешних воздействий (например, при работе машины в экстремальных средах);
- переменность параметров и структуры самой мехатронной системы;
- существенные внутренние возмущающие воздействия (например, действие сил сухого и вязкого трения в механических устройствах);
- сложные физические (в частности, динамические) взаимосвязи между элементами системы (например, в системах гидравлических приводов);
- технические и методические проблемы с постановкой и проведением экспериментальных исследований на реальных объектах для идентификации параметров математической модели с необходимой точностью.

Нейронная сеть как универсальное средство решения задач планирования и управления движением может быть использована на всех иерархических уровнях мехатронной системы. Нейроконтроллеры позволяют управлять движением машины на базе накопленных знаний.

Известен целый ряд разработок регуляторов исполнительного уровня на базе НС для управления движением мехатронных модулей. В таких нейроконтроллерах (рис. 4.12) на вход поступает информация о переменных состояния системы (механического устройства, двигателей, силовых преобразователей), действующих обобщенных силах и моментах, а также векторы задающих и возмущающих воздействий.

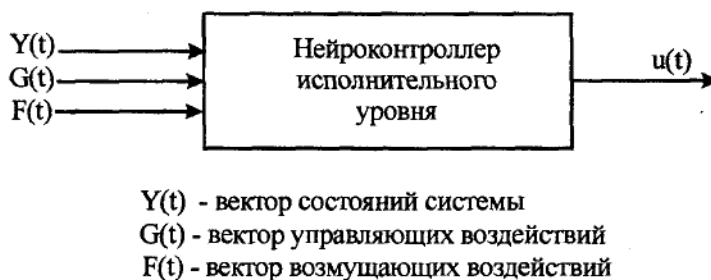


Рис. 4.12. Схема нейроконтроллера

Выходом НС является вектор управляющих сигналов, выдаваемых устройством управления на исполнительные приводы. Как вариант, в случае применения в системе стандартных ПИД-регуляторов, на выходе НС получаем значения соответствующих коэффициентов.

На тактическом уровне управления НС часто используются как средство решения обратных кинематических задач для многозвенных механизмов, когда найти

решение геометрическим и даже численным путями в ряде случаев не удается. Особенно этот подход эффективен для механизмов с избыточными степенями подвижности ($n > 6$). Для решения обратной задачи о положении n -звенного манипулятора на входе НС задается 6-мерный вектор, задающий положение и ориентацию схвата. Тогда на выходе получаем n -мерный вектор обобщенных координат.

Предварительное обучение такой сети сводится к многократному решению прямой задачи о положении механизма. Эта задача может решаться либо на компьютерной модели, либо экспериментально на натурном образце робота. Разработка компьютерной программы вычислений, даже для избыточных манипуляторов, не содержит методических проблем. Однако при этом не будут учтены многие погрешности, присущие реальным конструкциям. Экспериментальный способ решения прямой задачи предусматривает вывод робота в заранее определенные конфигурации в режиме дистанционного управления или по программе. При этом манипулятор должен быть оснащен датчиками положения во всех степенях подвижности, а также средствами измерения декартовых координат рабочего органа. С этой целью в робототехнике обычно используются оптические и лазерные измерительные системы.

Современным примером решения задач стратегического уровня на базе НС может служить интеллектуальная система управления мобильным роботом FRANK, созданная научно-исследовательской группой «Мехатроника» в Де Монтфортском университете (Великобритания). Мобильный робот FRANK базируется на подвижной трехколесной платформе (передние два колеса имеют приводы) и оснащен комплексной информационной системой. В состав информационной системы входят 4 ультразвуковых сенсора, 4 датчика ближней локации и 4 датчика контакта, установленных на бампере. Система управления выполнена на базе бортового компьютера. Задачей робота является выполнение транспортных перемещений в средах с препятствиями (прохождение коридоров, движение вдоль стен с обязательным исключением столкновений с внешними объектами).

Для решения научно-технической задачи обучения нейронной сети на основе мультисенсорной информации было разработано оригинальное программное обеспечение. В его состав входят следующие специальные программные модули:

- создание графической модели среды (Виртуальная Среда) для обучения робота;
- создание графической модели робота – Виртуального Робота, движущегося в виртуальной среде;

- человеко-машинный интерфейс и специальный язык программирования движений Виртуального Робота в Виртуальной Среде;
- программа моделирования работы всех сенсоров информационной системы в процессе движения Виртуального Робота;
- программа генерации «инстинктивных правил» поведения робота в различных ситуациях на основе получаемой сенсорной информации;
- модуль принятия решений о поведении робота.

На этапе обучения оператор, наблюдая на дисплее рабочей станции за перемещениями Виртуального Робота в Виртуальной Среде, управляет его движением в возникающих ситуациях. При этом компьютер моделирует работу всех сенсоров информационной системы, что позволяет автоматически формировать так называемые «правила инстинктивного поведения робота». Предпосылкой в этих правилах является набор сенсорных сигналов, а заключением – решения о движении, принятые оператором. Таким образом, в результате многократных опытов, происходит обучение управляющей нейронной сети правильным действиям в возникающих ситуациях.

Процесс обучения заканчивается, когда Виртуальный Робот в состоянии без помощи оператора выполнить заданные движения без столкновения с препятствиями. Далее нейроконтроллер, обученный в Виртуальной Среде, устанавливается в систему управления реального робота FRANK, к ее входам подключаются реальные сенсоры, а выходы НС соединяются с приводами колес. Лабораторные опыты показали, что НС эффективно выполняет управляющие функции в реальной среде.

Рассмотренный подход перспективен для трубопроводных мобильных роботов при выполнении ими функциональных движений в автономном режиме.

Лекция

Тема 3.1.4. Структура, классификация и основы кинематики манипуляционных систем промышленных роботов

ВОПРОСЫ

1. Структура манипуляторов промышленных роботов.
2. Переносные и ориентирующие степени подвижности манипуляторов.

3. Основы кинематики манипуляторов роботов.
4. Однородные координаты. Матрица перехода 4×4 кинематической пары.
5. Определение ориентации звеньев манипуляторов с использованием углов Эйлера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомченко В.Г., Соломин В.Ю. Мехатронные и робототехнические системы. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 160 с.

1. Структура манипуляторов промышленных роботов

Манипулятор – это кинематическая цепь, образованная последовательным или последовательно-параллельным соединением тел, называемых кинематическими звеньями, и предназначенная для преобразования движения этих звеньев в требуемое (заданное) движение схвата. При этом кинематические звенья соединяются друг с другом подвижно с помощью кинематических пар.

Кинематическая цепь, образующая манипулятор, имеет два конечных звена: одно из них будет являться основанием – стойкой (ему присваивается нулевой номер), а другое конечное звено оснащается схватом. Этому конечному звену присваивается последний n -й номер, равный при последовательном соединении звеньев числу подвижных звеньев манипулятора.

Дадим определение тем новым терминам, которые уже использованы.

Кинематическое звено – совокупность жестко соединенных друг с другом тел, входящих в состав механизма, в данном случае в состав манипулятора.

Кинематическая пара – подвижное соединение двух кинематических звеньев, допускающее их вполне определенное движение относительно друг друга.

Элементы кинематической пары – поверхности, линии или точки, по которым

соприкасаются звенья, образующие данную кинематическую пару.

Кинематическая цепь – это совокупность кинематических звеньев, подвижно соединенных друг с другом с помощью кинематических пар.

Если в кинематической цепи есть кинематические звенья, входящие в одну кинематическую пару, то такая цепь называется *разомкнутой*, а если

же каждое звено входит, как минимум, в две кинематических пары, то это *замкнутая кинематическая цепь*.

Манипулятор может быть образован как на основе разомкнутой кинематической цепи (рис. 6.1) с последовательным соединением звеньев (антропоморфные человекоподобные роботы) и на основе замкнутой кинематической цепи (рис. 6.2) с последовательно-параллельным соединением звеньев (роботы с параллельной кинематикой, в частности, *гексаподы* на основе платформы Стюарта).

Итак, *манипулятор* – это механизм, представляющий собой разомкнутую или замкнутую кинематическую цепь, предназначенную для получения требуемого движения схвата в пространстве.

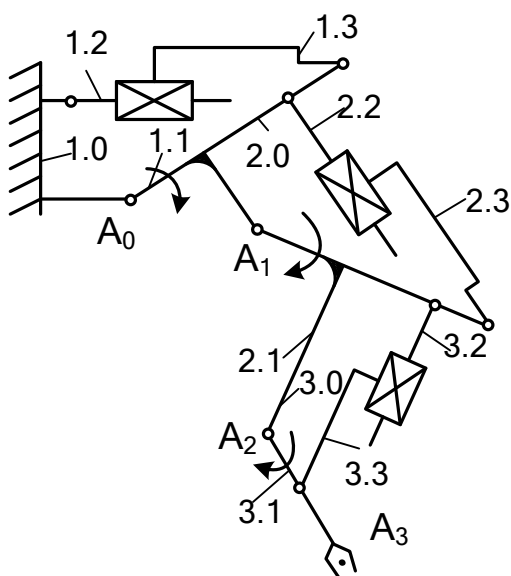


Рис. 6.2. Манипулятор с параллельной кинематикой

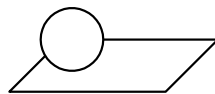
Управление цифровых образовательных технологий

Дадим характеристику кинематическим парам. Именно от характера кинематических пар и от их взаимного расположения в манипуляторе зависят законы преобразования движения.

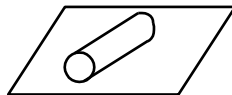
Кинематические пары, как отмечалось, допускают вполне определенные движения образующих их звеньев относительно друг друга. Эта определенность достигается теми ограничениями, которые создают пары геометрией своих элементов.

Пары классифицируют по классам, номер которого равен числу ограничений (числу условий связи), накладываемых данной парой:

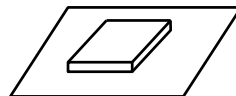
- одно ограничение (одно условие связи) – пара I класса;



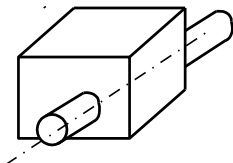
- два ограничения (два условия связи) – пара II класса;



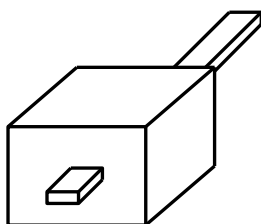
- три ограничения (три условия связи) – пара III класса;



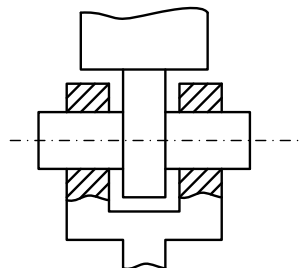
- четыре ограничения (четыре условия связи) – пара IV класса;



- пять ограничений (пять условий связи) – пара V класса (пары пятого класса могут быть поступательными и вращательными).



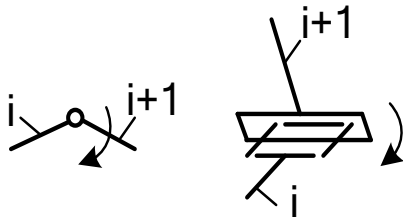
Поступательная
пара V класса



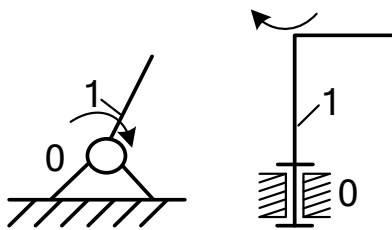
Вращательная
пара V класса

Приведем примеры *условных обозначений* кинематических пар пятого класса как наиболее часто используемых в манипуляторах ПР.

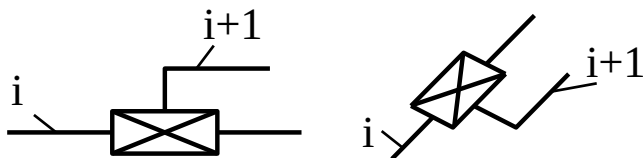
Вращательная пара, соединяющая подвижные звенья



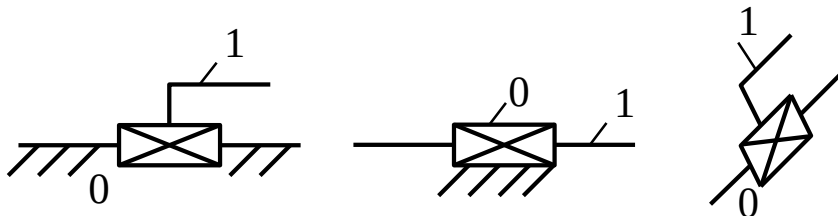
Вращательная пара, соединяющая неподвижное звено (стойку) с подвижным



Поступательная пара, соединяющая подвижные звенья



Поступательная пара, соединяющая неподвижное звено (стойку) с подвижным



Важной характеристикой манипулятора является число степеней его подвижности, число степеней свободы.

Для произвольной кинематической цепи следует использовать формулу Сомова – Малышева.

$$W = 6n - 5p_5 - 4p_4 - 3p_3 - 2p_2 - p_1 = 6n - \sum_{i=1}^{i=5} ip_i,$$

где p_i – число кинематических пар i -го класса.

Для манипуляторов с кинематическими парами 5-го класса

$$W = 6n - 5p_5.$$

Например, для манипулятора, представленного на рисунке 6.1:

$$W = 6 \cdot 4 - 5 \cdot 4 = 24 - 20 = 4.$$

Так как в манипуляторе с последовательной кинематикой каждому подвижному звену соответствует одна кинематическая пара пятого класса, то $n = p_5$. Следовательно, $W = 6n - 5n = n$ или $W = p_5$, то есть число степеней подвижности в таких манипуляторах равно числу подвижных звеньев и числу кинематических пар.

Использование в манипуляторах в основном одноподвижных вращательных или поступательных пар 5-го класса связано с тем, что для определенности движения одного звена относительно другого в случае, если они подвижно соединены парой 5-го класса требуется задание одного перемещения (рис. 6.3), что легко реализуется современными двигателями, которые приводят в движение либо вал (электродвигатели), либо шток (пневмо- и гидродвигатели).

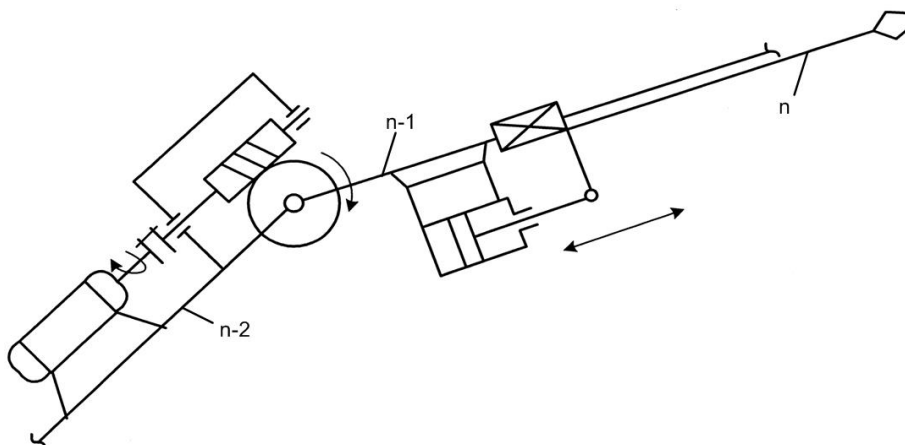


Рис. 6.3. Схема расположения приводов на звеньях манипулятора

Для обеспечения пространственного движения схвата в общем случае достаточно трех переносных степеней подвижности робота, расположенных относительно друг друга определенным образом. Основными минимальными (необходимыми) условиями обеспечения пространственного движения схвата в манипуляторе, образованного парами 5-го класса, являются:

1) наличие двух вращательных пар с непараллельными осями (обычно оси в этом случае перпендикулярны друг другу) и третьей вращательной или поступательной пары, обеспечивающей изменение радиуса сферы (рис. 6.4а);

2) наличие двух вращательных пар с параллельными осями и третьей поступательной пары, направляющая которой неперпендикулярна осям вращательных пар, или вращательной пары, ось которой непараллельна осям предыдущих пар (рис. 6.4б);

3) наличие двух поступательных пар с непараллельными направляющими и одной вращательной пары (рис. 6.4в), ось которой неперпендикулярна плоскости, образованной осями направляющих поступательных пар, или поступательной пары, направляющая которой непараллельна названной плоскости (обычно направляющие перпендикулярны друг другу, а ось вращательной пары параллельна плоскости).

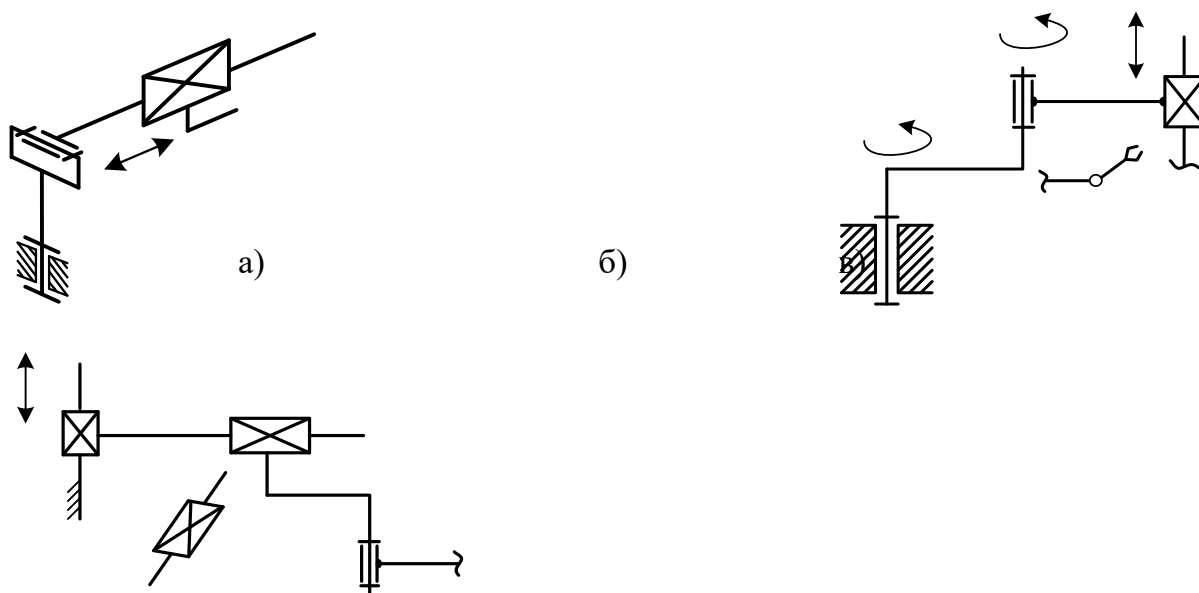
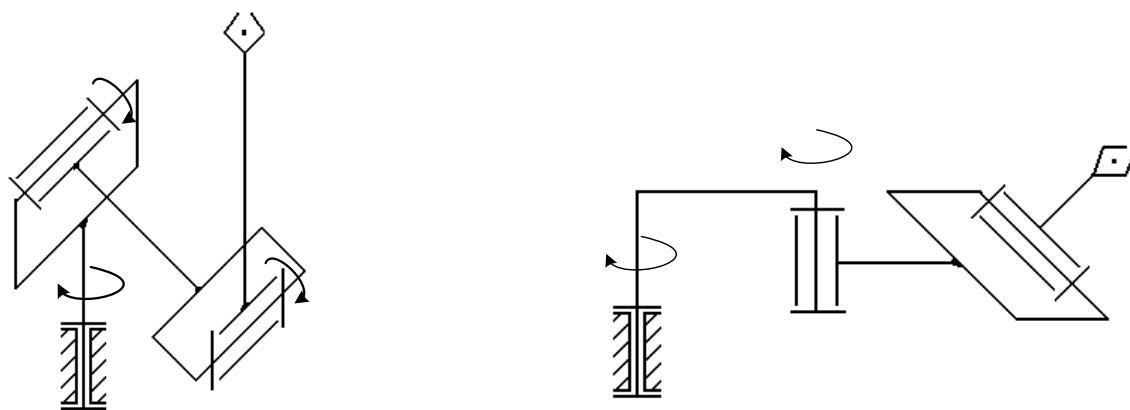


Рис. 6.4. Переносные движения манипулятора

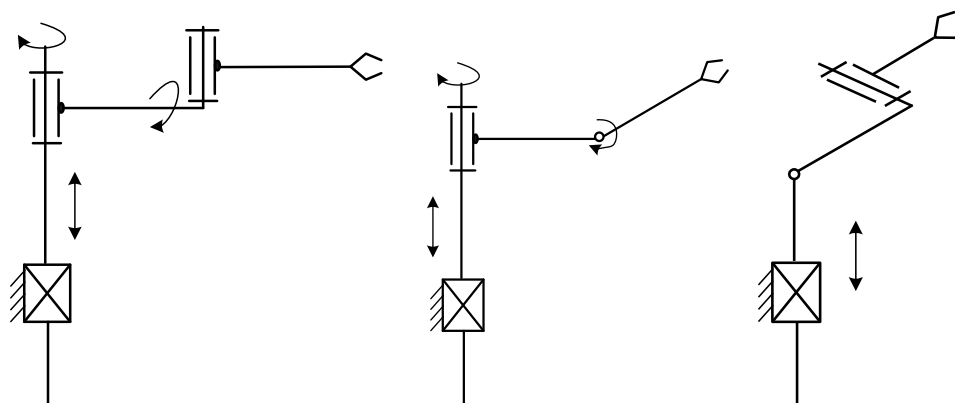
Приведем основные манипуляционные системы, обеспечивающие переносные движения схвата манипулятора при различной последовательности использования вращательных и поступательных кинематических пар.

1. Вращательная – вращательная – вращательная



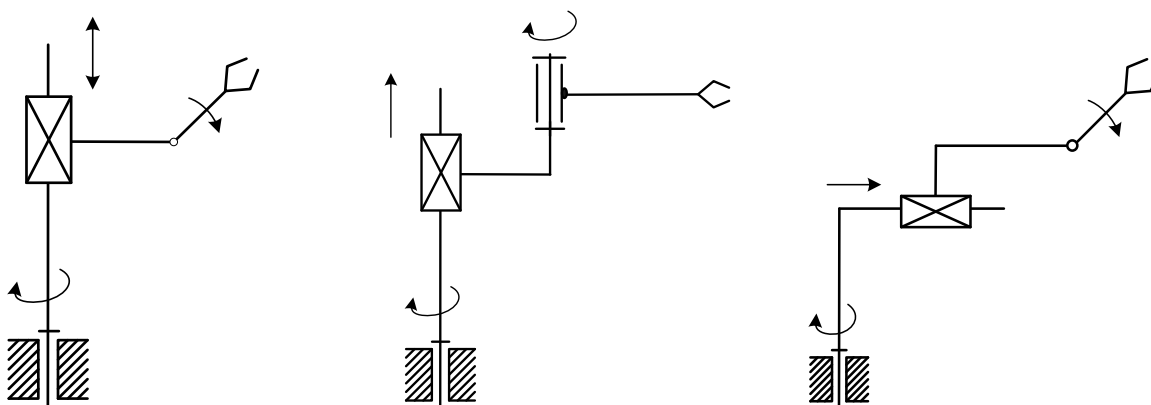
А) схема робота
немецкой фирмы «KUKA»

2. Поступательная – вращательная – вращательная



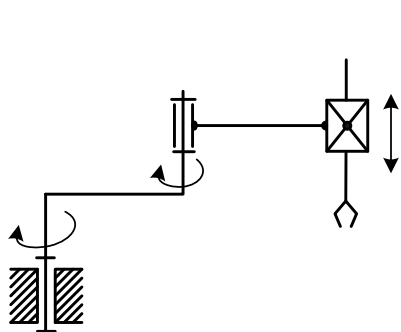
Б)

3. Вращательная – поступательная – вращательная

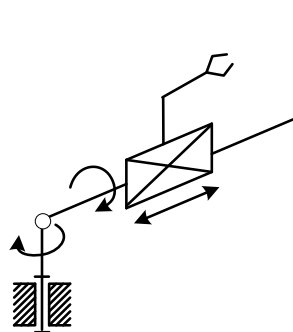


В)

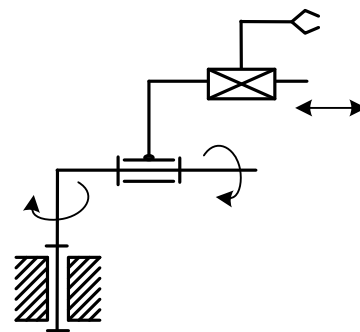
4. Вращательная – вращательная – поступательная



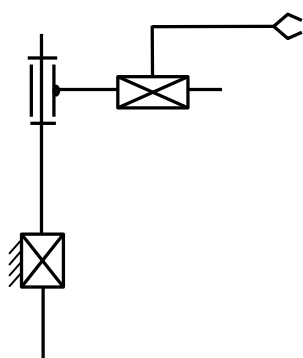
Г) схема робота японской фирмы «СКАРА»;



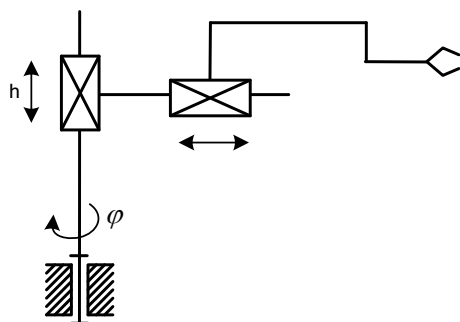
Д) схема робота американской фирмы «ЮНИМЕЙТ»



5. Поступательная – вращательная – поступательная

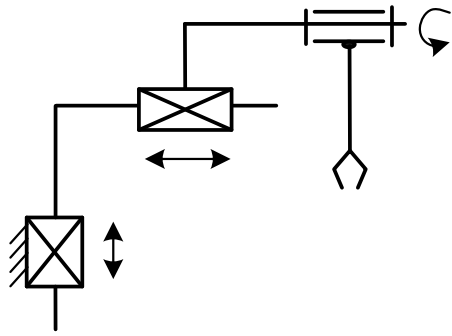


6. Вращательная – поступательная – поступательная

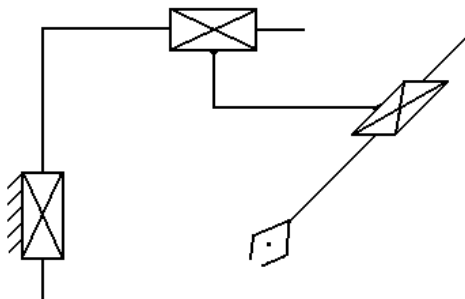


Е) схема робота американской фирмы «Версатран»

7. Поступательная – поступательная – вращательная



8. Поступательная – поступательная – поступательная



Ж)

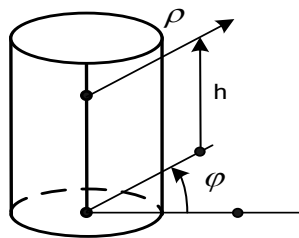
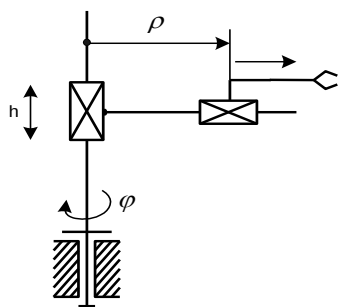
Не все приведенные схемы обеспечивают совершенно различные рабочие зоны. В некоторых случаях перестановка поступательной и вращательной пары не влияет на форму рабочей зоны, например схемы Б, В и Г имеют одинаковые рабочие зоны. Однако на динамику манипулятора это оказывает существенное влияние, а следовательно, и на характер управляющих воздействий. Более предпочтительной по энергетическим затратам из трех упомянутых является схема Г, так как для вертикального перемещения груза в этой схеме не требуется перемещение промежуточных звеньев, именно эта схема используется в роботах японской фирмы «СКАРА».

Схемы А, Г, Д, Е и Ж являются наиболее распространенными и по ним выполнено большинство промышленных роботов.

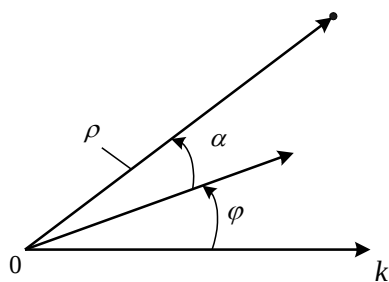
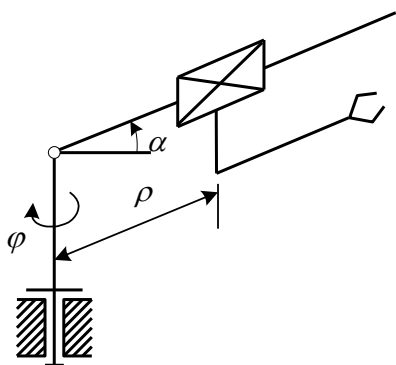
Переносные степени подвижности удобно классифицировать по системе координат, которую обеспечивает та или иная комбинация кинематических пар манипулятора.

Различают четыре основные системы координат манипуляторов:

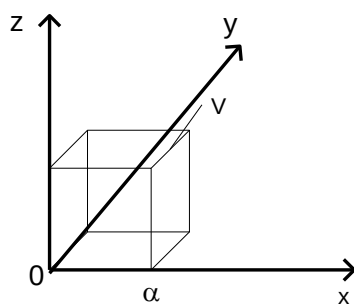
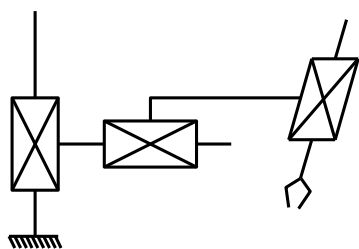
1. Цилиндрическая:



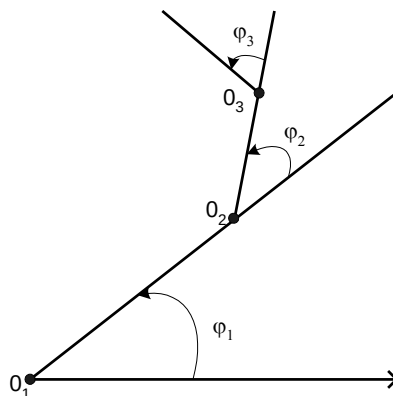
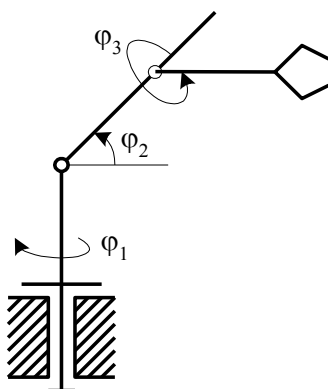
2. Сферическая:



3. Прямоугольная:



4. Ангулярная (угловая):

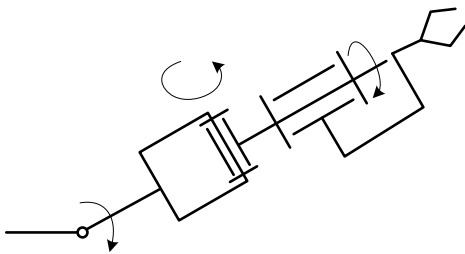


Если в заданной точке рабочего пространства манипулятора его схват должен иметь вполне определенную ориентацию, то манипулятор необходимо снабдить тремя ориентирующими степенями подвижности. Хотя в промышленных роботах обычно обходятся одной – двумя ориентирующими степенями подвижности.

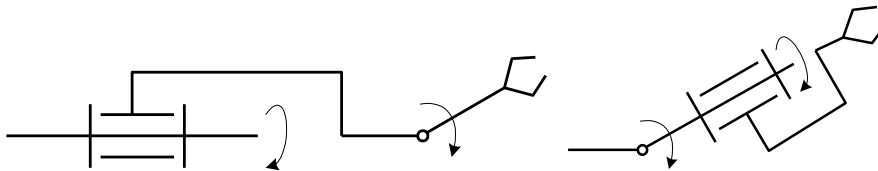
Чтобы не вносить помехи в положение схвата или свести их к минимуму, ориентирующие степени подвижности делают так, чтобы они как можно меньше перемещали схват.

Приведем основные манипуляционные системы, обеспечивающие ориентирующие движения схвата.

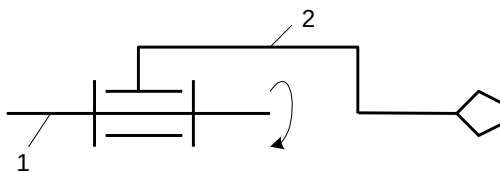
1. Обеспечение полной пространственной ориентации схвата:



2. Ротация с дополнительным пространственным движением схвата:



3. Ротация схвата:



4. Без ориентирующих степеней подвижности (в этом случае оборудование расставляется так, чтобы рука робота оказывалась в требуемом относительно него положении).

3.3. Основы кинематики манипуляторов роботов

Для разработки методов расчета управляющих воздействий на звенья робота необходимо в начале установить кинематические зависимости между перемещениями звеньев манипулятора относительно друг друга при работе приводов и положением и ориентацией всех звеньев манипулятора в пространстве.

Как известно, положение и ориентация схвата в пространстве определяется законами его движения относительно абсолютных (инерциальных) осей координат (рис. 6.5):

$$x_{0n} = x(t), \quad y_{0n} = y(t), \quad z_{0n} = z(t),$$

$$\hat{x}_0 z_n = f_1(t), \quad \hat{y}_0 z_n = f_2(t), \quad \hat{x}_0 y_n = f_3(t),$$

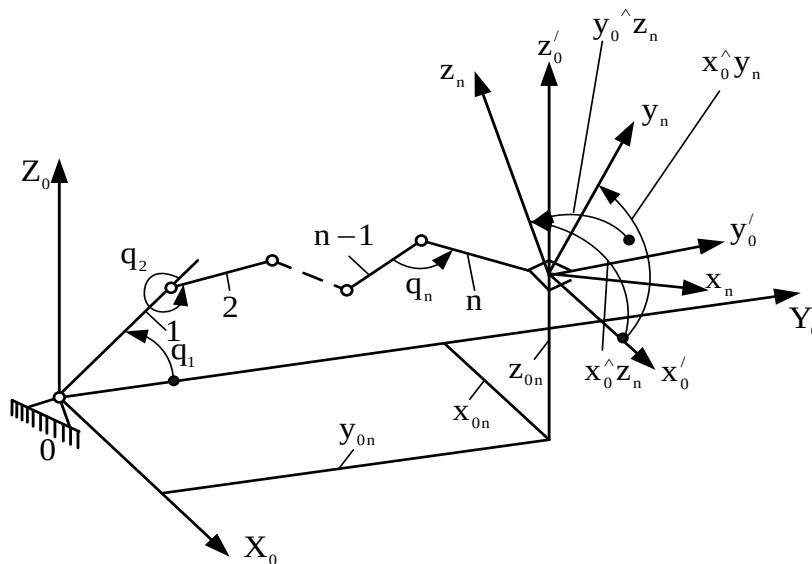


Рис. 6.5

положение i -го звена относительно предыдущего $(i-1)$ -го устанавливается с помощью обобщенной координаты q_i (рис. 6.6):

$$q_i = \begin{cases} \varphi_i & \text{— при вращательном движении } i\text{-го звена относительно } (i-1)\text{-го;} \\ S_i & \text{— при поступательном движении } i\text{-го звена относительно } (i-1)\text{-го.} \end{cases}$$

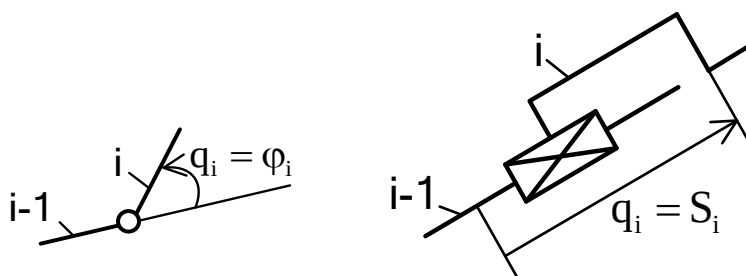


Рис. 6.6

Следовательно, необходимо иметь математический аппарат, позволяющий установить для манипулятора любой конфигурации математическую модель его кинематики, которую в общем виде можно представить следующим образом:

– для прямой задачи кинематики:

– для обратной задачи кинематики:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{0n} = x(q_1, q_2, \dots, q_n; t); \\ y_{0n} = y(q_1, q_2, \dots, q_n; t); \\ z_{0n} = z(q_1, q_2, \dots, q_n; t); \\ x_0 \wedge z_n = f_1(q_1, q_2, \dots, q_n; t); \\ y_0 \wedge z_n = f_2(q_1, q_2, \dots, q_n; t); \\ x_0 \wedge y_n = f_3(q_1, q_2, \dots, q_n; t). \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1 = q_1(x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}; \hat{x}_0 \hat{z}_n, \hat{y}_0 \hat{z}_n, \hat{x}_0 \hat{y}_n; t); \\ q_2 = q_2(x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}; \hat{x}_0 \hat{z}_n, \hat{y}_0 \hat{z}_n, \hat{x}_0 \hat{y}_n; t); \\ \dots\dots\dots; \\ q_n = q_n(x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}; \hat{x}_0 \hat{z}_n, \hat{y}_0 \hat{z}_n, \hat{x}_0 \hat{y}_n; t) \end{array} \right.$$

Задачи подобного ряда сводятся к преобразованию координат. В общем случае для того, чтобы зафиксировать одну систему координат относительно другой необходимо шесть координат: смещение по трем осям и поворот вокруг этих осей.

В связи с тем, что в манипуляторах роботов используются только одноподвижные вращательные и поступательные кинематические пары, для определения положения систем координат, связанных со звеньями манипулятора, достаточно четырех специальных координат. При этом сами системы координат должны быть связаны со звеньями манипулятора вполне определенным образом.

Специальные системы координат манипуляторов были предложены американскими учеными И. Денавитом и Р. Хартенбергом в 1955–1960 гг.

Изначально они предназначались для задания осей кинематических пар пространственных механизмов с низшими парами. В последние десятилетия эта координатная система была применена к описанию кинематики манипуляторов. Это связано с тем, что манипуляторы с одноподвижными вращательными и поступательными парами обладают рядом регулярных особенностей, хорошо согласующихся со свойствами координатной системы Денавита-Хартенберга.

Введем ряд правил расположения осей и начал координат специальной системы координат относительно кинематических пар и звеньев манипулятора.

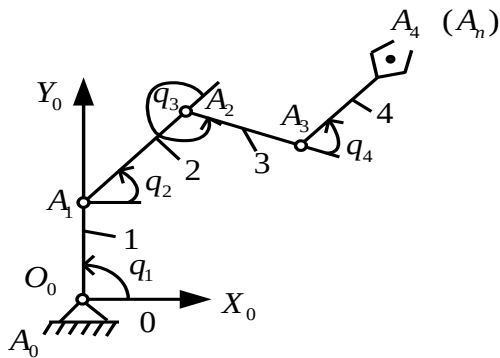


Рис. 6.7

Пронумеруем кинематические звенья от неподвижного звена до наиболее удаленного, на котором закреплен схват, присвоив им соответственно номера от 0 до n (рис. 6.7), где n – число подвижных звеньев манипулятора.

Обозначим кинематические пары символом A_i , нижний индекс которого равен меньшему из номеров звеньев, образующих кинематическую пару.

Например, кинематическая пара A_1 соединяет кинематические звенья 1 и 2, а кинематическая пара A_3 – кинематические звенья 3, 4 и т. д...

Например, кинематическая пара A_1 соединяет кинематические звенья 1 и 2, а кинематическая пара A_3 – кинематические звенья 3, 4 и т. д...

Введем понятие оси z_i i -й кинематической пары. Осью z_i i -й вращательной кинематической пары, соединяющей i -е звено с $(i+1)$ -м является ось шарнира кинематической пары. Эту ось будем считать принадлежащей i -му звену и жестко с ним соединенной. Именно вокруг этой оси вращается $(i+1)$ -е звено относительно i -го.

Осью z_i поступательной пары является какая-либо из прямых, параллельная направляющей данной поступательной пары. Если ось z_i не параллельна оси z_{i-1} , то ее рекомендуется направлять так, чтобы она пересекалась с этой осью.

За положительное направление оси z_i можно взять любое, в частности, направление снизу вверх, слева направо, в направление к наблюдателю или близкие к ним направления.

Важным моментом при расположении системы координат на i -м звене манипулятора является выбор ее начала координат O_i и направление оси x_i .

Введем соответствующие правила для различных случаев взаиморасположения осей z_i и z_{i-1} .

Оси z_i и z_{i-1} *перекрещиваются* (рис. 6.8): начало координат располагается в точке пересечения линии кратчайшего расстояния между осями z_i и z_{i-1} с осью z_i . В этом случае ось x_i направляется по линии кратчайшего расстояния в сторону от оси z_{i-1} к оси z_i .

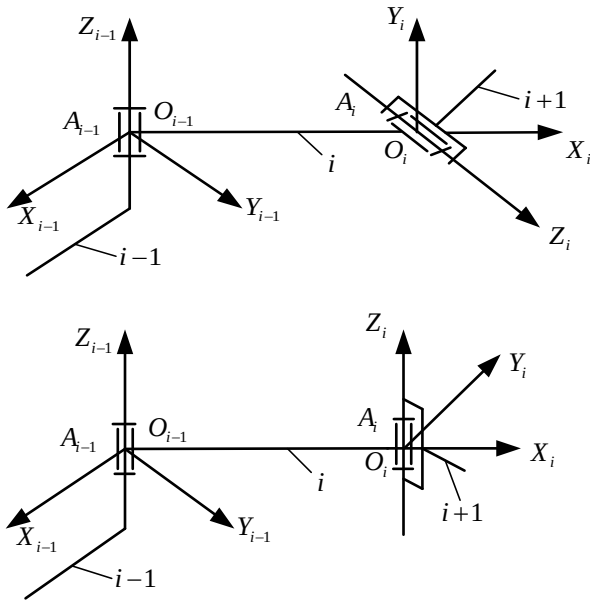


Рис. 6.8

Рис. 6.9

Оси z_i и z_{i-1} *параллельны* (рис. 6.9): за начало координат может быть принята любая удобная по каким-либо соображениям точка оси z_i . Ось x_i направляется так, чтобы она лежала в плоскости, образуемой осями z_i и z_{i-1} . (Случай рассматривается как частный по отношению к предыдущему.).

Оси z_i и z_{i-1} *совпадают* (рис. 6.10): начало O_i системы координат может быть назначено в любой удобной по каким-либо дополнительным условиям точке оси z_i , а ось x_i направлена перпендикулярно оси z_i в произвольном направлении (как правило, в направлении развития i -го звена, т. е. по i -му звену).

Оси z_i и z_{i-1} *пересекаются* (рис. 6.11): за начало O_i координат принимается точка их пересечения, а ось x_i направляется по общему перпендикуляру к осям z_i и z_{i-1} .

Ось y_i направляется так, чтобы система координат была правой.

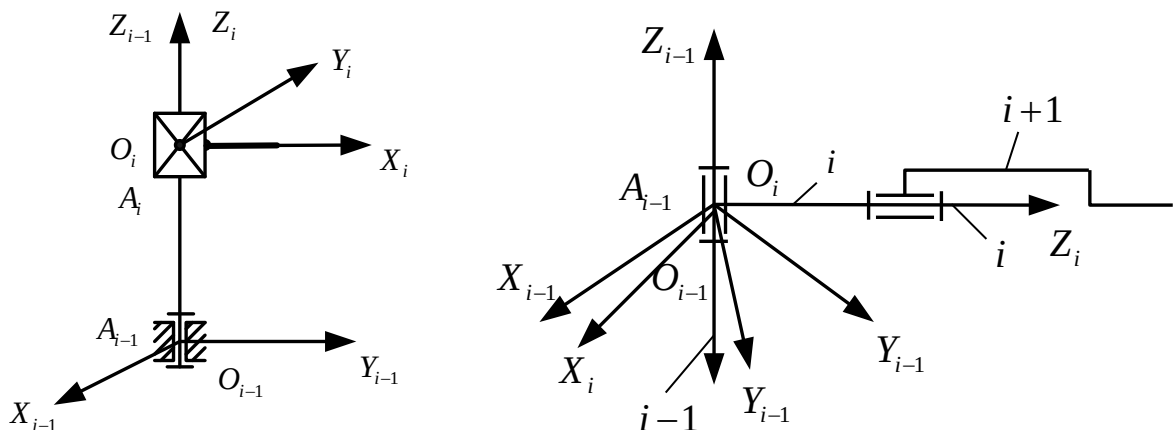


Рис. 6.10

Эти правила не действуют в полной мере при выборе системы координат, связанной со стойкой (звено 0), так как отсутствует $(i-1)$ -я кинематическая пара, и системы координат, связанной с последним звеном, на котором закрепляется схват, так как это последнее звено не содержит кинематической пары для соединения со следующим звеном.

Начало O_0 системы координат, связанной со стойкой, может быть расположено в любой точке оси z_0 , а направление оси x_0 принимается произвольно по дополнительным условиям (рис. 6.12).

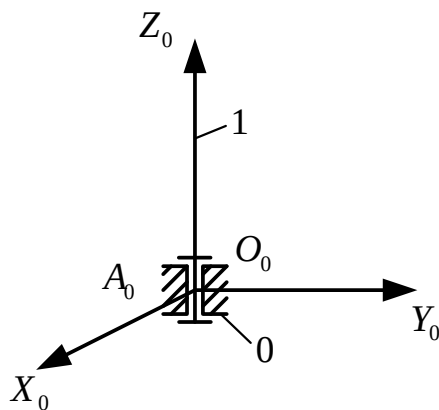


Рис. 6.12

Рис. 6.11

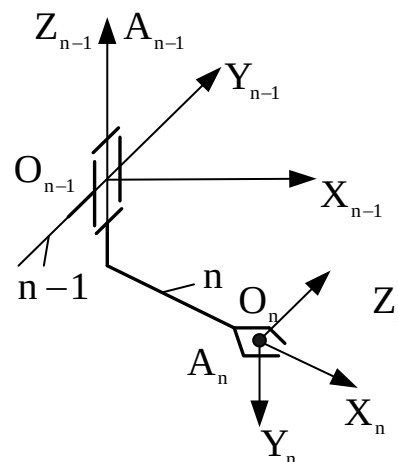


Рис. 6.13

Начало O_n системы координат, связанной с последним n -м звеном манипулятора (рис. 6.13), на котором закреплен схват, располагается в точке, принимаемой за центр схвата, а ось x_n направляется перпендикулярно оси z_{n-1} . Оси z_n может быть назначено произвольное направление, например по оси захватываемой детали или технологического инструмента или перпендикулярно ей.

4. Однородные координаты. Матрица перехода 4×4 кинематической пары

При составлении математических моделей манипуляторов наибольшее распространение получило матричное исчисление (матричное исчисление было предложено в 1857 г. английским ученым Кэли). Долгое время для этой цели использовалось сочетание матриц поворота размером 3×3 , элементами которых были направляющие косинусы углов между осями (трех осей одной системы координат

относительно трех осей другой), и матриц переноса размером 3×1 , элементами которых служили координаты по трем осям начала соответствующей системы координат.

Наличие двух матриц разной размерности и разного назначения привело к необходимости использовать операции умножения и сложения матриц, к усложнению алгоритма вычисления, а следовательно, к увеличению машинного времени, что сказывается на обработке управляющих сигналов в реальном времени и на управляемости робота.

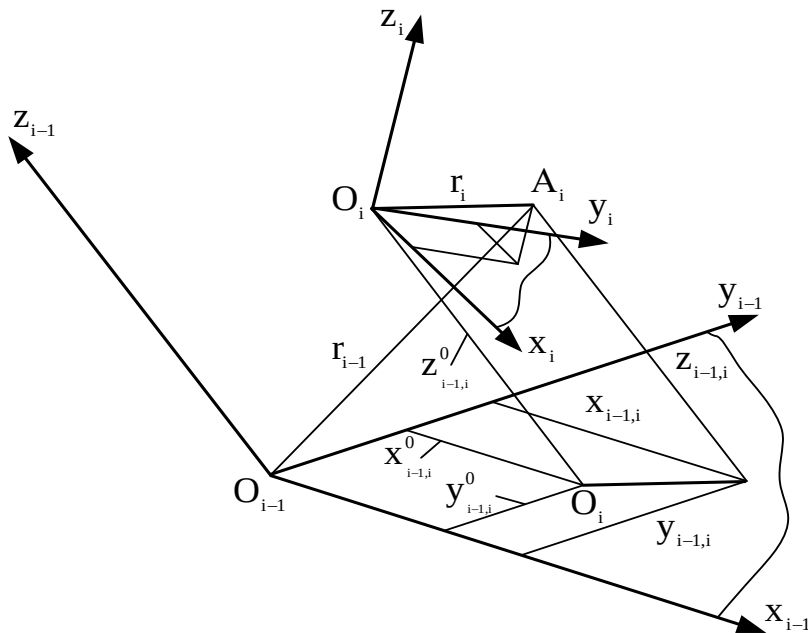
В последние десятилетия стали использовать комплексные матрицы перехода размером 4×4 , позволяющие осуществлять поворот и перенос (смещение) одних координат по отношению к другим. В этом случае для описания положения точки в пространстве используются *однородные координаты*, в которых к обычным координатам добавляется *четвертая, равная единице*, то есть координатами точки будут $(x_i, y_i, z_i, 1)$. Если известны однородные координаты $(x_i, y_i, z_i, 1)$ вектора r_i некоторой точки A_i в «старой» i -й системе координат, то однородные координаты $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, 1)$ вектора r_{i-1} этой точки A_i в «новой» $(i-1)$ -й системе координат рассчитываются в общем случае по формулам:

$$\begin{aligned} x_{i-1,i} &= C(x_{i-1} \wedge x_i)x_i + C(x_{i-1} \wedge y_i)y_i + C(x_{i-1} \wedge z_i)z_i + x_{i-1,i}^{O_i}; \\ y_{i-1,i} &= C(y_{i-1} \wedge x_i)x_i + C(y_{i-1} \wedge y_i)y_i + C(y_{i-1} \wedge z_i)z_i + y_{i-1,i}^{O_i}; \\ z_{i-1,i} &= C(z_{i-1} \wedge x_i)x_i + C(z_{i-1} \wedge y_i)y_i + C(z_{i-1} \wedge z_i)z_i + z_{i-1,i}^{O_i}; \\ 1 &= C90^\circ x_i + C90^\circ y_i + C90^\circ z_i + 1 \end{aligned} \quad (6.1)$$

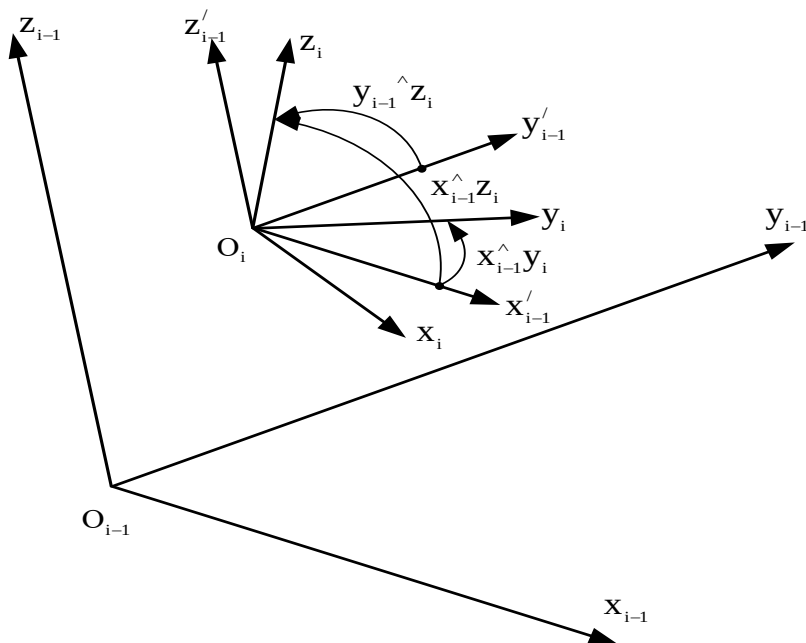
где C – символ, обозначающий тригонометрическую функцию «cosines»; $x_{i-1,i} \wedge x_i, \dots, z_{i-1,i} \wedge z_i$ – углы, образуемые осями «старой» i -й системы координат с осями «новой» $(i-1)$ -й системы так, что поворот определенной оси $(i-1)$ -й системы до совмещения с соответствующей осью i -й системы должен видаться против часовой стрелки; $x_{i-1,i}^{O_i}, y_{i-1,i}^{O_i}, z_{i-1,i}^{O_i}$ – координаты начала координат O_i i -й системы в системе координат $O_{i-1}X_{i-1}Y_{i-1}Z_{i-1}$. Тригонометрические функции $C(x_{i-1,i} \wedge x_i), \dots, C(z_{i-1,i} \wedge z_i)$ называют *направляющими косинусами* осей i -й системы в $(i-1)$ -й.

Взаиморасположение i -й системы координат относительно $(i-1)$ -й представлено на рисунке 6.14: на рисунке 6.14а показаны координаты $x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}$ и x_{i-1}, y_{i-1} ,

z_{i-1} , а на рисунке 6.14б, углы $x_0 \wedge z_n$, $y_0 \wedge z_n$, $x_0 \wedge y_n$, определяющие ориентацию i -го звена, относительно $(i-1)$ -го.



а)



б)

Рис. 6.14. Взаиморасположение i -й и $(i-1)$ -й систем координат

Выражение (6.1) можно переписать в матричном виде:

$$\begin{vmatrix} x_{i-1,i} \\ y_{i-1,i} \\ z_{i-1,i} \\ 1 \end{vmatrix} = T_{i-1,i} \begin{vmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{vmatrix}$$

или в векторном $R_{i-1,i} = T_{i-1,i} \cdot R_{i,i_1}$, (6.2)

где $T_{i-1,i} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ (6.3)

однородная матрица перехода от системы i к $(i-1)$ -й системе координат.

Матрицу $T_{i-1,i}$ можно представить как блочную матрицу:

$$T_{i-1,i} = \begin{vmatrix} M_{i-1,i} & L_{i-1} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6.4)$$

в которой матрица $M_{i-1,i} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} C(x_{i-1} \wedge x_i) & C(x_{i-1} \wedge y_i) & C(x_{i-1} \wedge z_i) \\ C(y_{i-1} \wedge x_i) & C(y_{i-1} \wedge y_i) & C(y_{i-1} \wedge z_i) \\ C(z_{i-1} \wedge x_i) & C(z_{i-1} \wedge y_i) & C(z_{i-1} \wedge z_i) \end{vmatrix}$ (6.5)

является матрицей поворота i -й системы координат относительно $(i-1)$ -й и содержит соответствующие направляющие косинусы.

Матрица $L_{i-1,i}$ является *матрицей переноса начала координат* i -й системы до совмещения с началом $(i-1)$ -й системы координат

$$L_{i-1,i} = \begin{vmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x_{i-1,i}^{O_i} \\ y_{i-1,i}^{O_i} \\ z_{i-1,i}^{O_i} \end{vmatrix}. \quad (6.6)$$

Переход от одной системы координат к другой с помощью матричного аппарата оказывается удобным средством описания кинематики манипулятора.

Чтобы использовать матричный аппарат преобразования координат для описания кинематики манипуляторов, свяжем по изложенным ранее правилам с каждым i -м звеном манипулятора специальные системы координат, расположенные определенным образом в i -й кинематической паре.

В этом случае переход от i -й системы координат к $(i-1)$ -й с помощью однородной матрицы перехода $T_{i-1,i}$ можно трактовать как пересчет известных координат x_i, y_i, z_i точки А некоторого i -го звена в новую $(i-1)$ -ю систему координат, связанную с $(i-1)$ -м звеном.

При переходе от i -й системы координат к $(i-1)$ -й полагают, что оси i -й системы, «уходя» от $(i-1)$ -й, из положения, когда они полностью совпадали с $(i-1)$ -й системой, в положение, которое они занимают, вращались против часовой стрелки относительно соответствующей оси поворота.

Иногда удобно считать, что до совмещения с i -й системой должна перемещаться $(i-1)$ -я система координат до полного совпадения с i -й системой, как бы повторяя перемещения, которые произвела i -я система, «уходя» от $(i-1)$ -й.

В общем случае, чтобы совместить «новое» $(i-1)$ -е положение со «старым» i -м положением системы, используя движение «новой» системы к «старой», необходимо шесть независимых перемещений относительно трех осей координат.

Однако при использовании специальных систем координат и так называемых преобразований Денавита-Хартенберга *достаточно четырех перемещений*, осуществленных в следующей последовательности (рис. 6.15):

1. Поворот системы $(i-1)$ вокруг оси Z_{i-1} против часовой стрелки (если смотреть со стороны оси Z_{i-1}) на угол Θ_i до тех пор, пока ось X_{i-1} не станет параллельной и однонаправленной с осью X_i .

2. Сдвиг повернутой $(i-1)$ -й системы вдоль оси Z_{i-1} на величину S_i до совмещения оси X_{i-1} с осью X_i .

3. Сдвиг системы $(i-1)$ вдоль оси X_i на величину a_i до совпадения начал координат систем $(i-1)$ и i .

4. Поворот $(i-1)$ -й системы вокруг оси X_i против часовой стрелки (если смотреть со стороны оси X_i) на угол α_i до совмещения оси Z_{i-1} с осью Z_i .

Покажем перечисленные эволюции $(i-1)$ -й системы координат применительно к звеньям манипулятора (рис. 6.15).

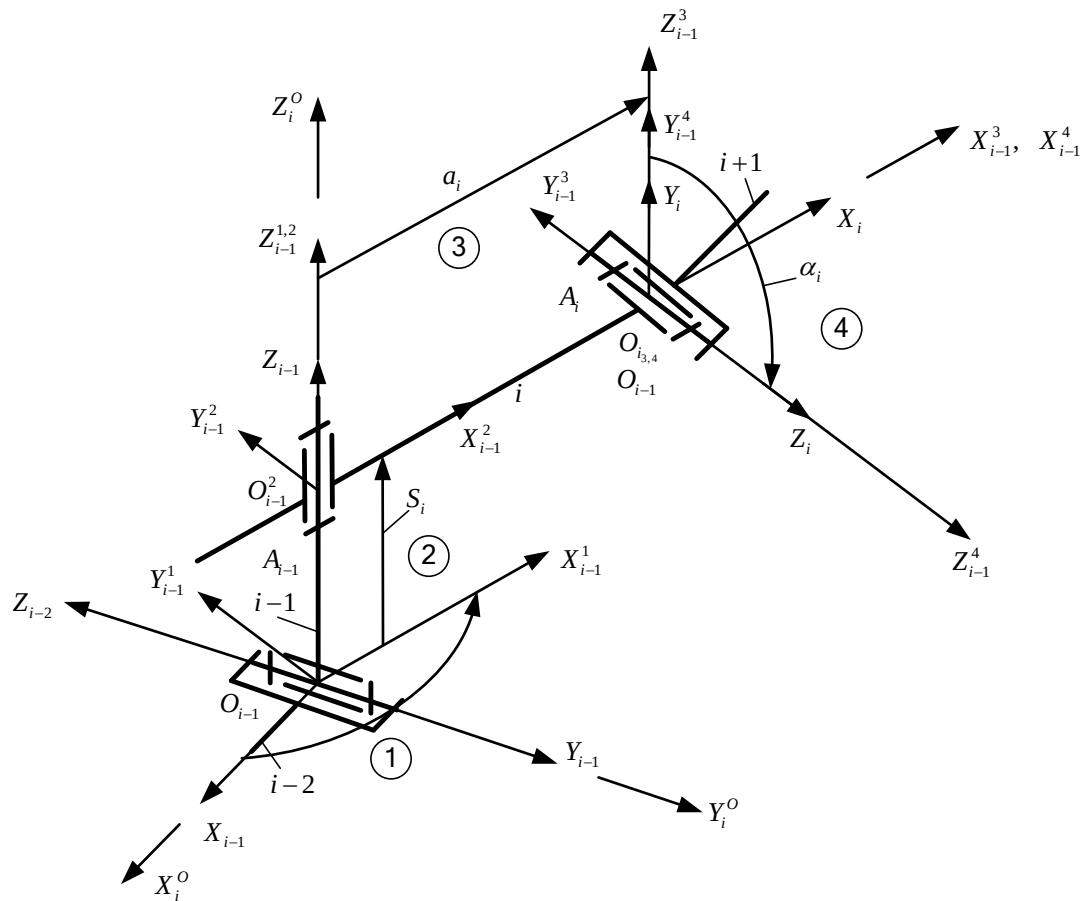


Рис. 6.15. Преобразования Денавита – Хартенберга

Каждое из упомянутых *элементарных движений* (i-1)-й системы координат описывается соответствующей частной матрицей перехода:

1. Поворот системы (i-1) вокруг оси Z_{i-1} на угол Θ_i :

$$T_{i-1,i}^{Z\Theta} = \begin{vmatrix} C\Theta_i & -S\Theta_i & 0 & 0 \\ S\Theta_i & C\Theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

2. Сдвиг по оси Z_{i-1} на величину S_i :

$$T_{i-1,i}^{ZS} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & S_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

3. Сдвиг по оси X_i на величину a_i :

$$T_{i-1,i}^{Xa} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix};$$

4. Поворот вокруг оси X_i на угол α_i :

$$T_{i-1,i}^{X\alpha} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

где S есть тригонометрическая функция «sinus».

Результирующая матрица перехода от i -й системы координат к $(i-1)$ -й, то есть матрица, осуществляющая преобразования системы координат i -го звена в систему координат $(i-1)$ -го звена, получается путем перемножения частных матриц перехода:

$$T_{i-1,i} = T_{i-1,i}^{Z\Theta} T_{i-1,i}^{ZS} T_{i-1,i}^{Xa} T_{i-1,i}^{X\alpha}.$$

После преобразования результирующая матрица принимает вид:

$$T_{i-1,i} = \begin{vmatrix} C\Theta_i & -S\Theta_i C\alpha_i & S\Theta_i S\alpha_i & a_i C\Theta_i \\ S\Theta_i & C\Theta_i C\alpha_i & -C\Theta_i S\alpha_i & a_i S\Theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & S_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6.7)$$

Заметим, что параметры Θ_i , S_i , α_i , a_i могут принимать и отрицательные значения.

Матрица $T_{i-1,i}$ является матрицей перехода 4×4 к $(i-1)$ -й кинематической паре от i -й пары. Она позволяет найти по формуле (6.7) координаты x_{i-1} , y_{i-1} , z_{i-1} некоторой точки A_i в системе $(i-1)$ по известным координатам x_i , y_i , z_i этой точки в i -й системе координат и по известным параметрам Θ_i , S_i , α_i , a_i , а также эта матрица дает возможность определить ориентацию i -го звена относительно $(i-1)$ -го. Для этого обычно используются наддиагональные элементы матрицы $T_{i-1,i}$:

$$x_{i-1,i}^O = a_i C\Theta_i; \quad x_{i-1}^{\wedge} z_i = \arccos(S\Theta_i \cdot S\alpha_i);$$

$$y_{i-1,i}^O = a_i S\Theta_i; \quad y_{i-1}^{\wedge} z_i = \arccos(-C\Theta_i \cdot S\alpha_i);$$

$$z_{i-1,i}^O = S_i; \quad x_{i-1}^{\wedge} y_i = \arccos(-S\Theta_i \cdot C\alpha_i).$$

По рисунку 6.15 можно убедиться в достоверности формул для расчета координат $x_{i-1,i}^O$, $y_{i-1,i}^O$ и $z_{i-1,i}^O$, а также в равенстве углов $z_{i-1}^{\wedge} z_i$ и α_i .

5. Определение ориентации звеньев манипуляторов с использованием углов Эйлера

Кроме направляющих косинусов, т. е. углов между осями координат X_{i-1} , Z_i , Y_{i-1} , Z_i и X_{i-1} , Y_i при определении ориентации звеньев манипулятора успешно используются углы Эйлера. Существует три системы углов Эйлера (Euler). В кинематике роботов используется система углов Эйлера, которая применяется в теории гироскопов и в астрономии при описании движения космических тел (рис. 6.16а):

- 1) поворот на угол прецессии Ψ_i вокруг оси Z_{i-1} ;
- 2) поворот на угол нутации Θ_i вокруг повернутой оси $O_i X_i$;
- 3) поворот на угол собственного вращения φ_i вокруг повернутой оси $O_i Z_i$.

Угол прецессии – угол ометания, движения вперед, преддвижения.

Угол нутации – угол колебания оси собственного вращения.

Угол собственного вращения – угол вращения вокруг собственной оси.

Например, при вращении юлы угол Θ_i с уменьшением угловой скорости $\omega = d\varphi_i / dt$ увеличивается и юла падает (рис. 6.16б).

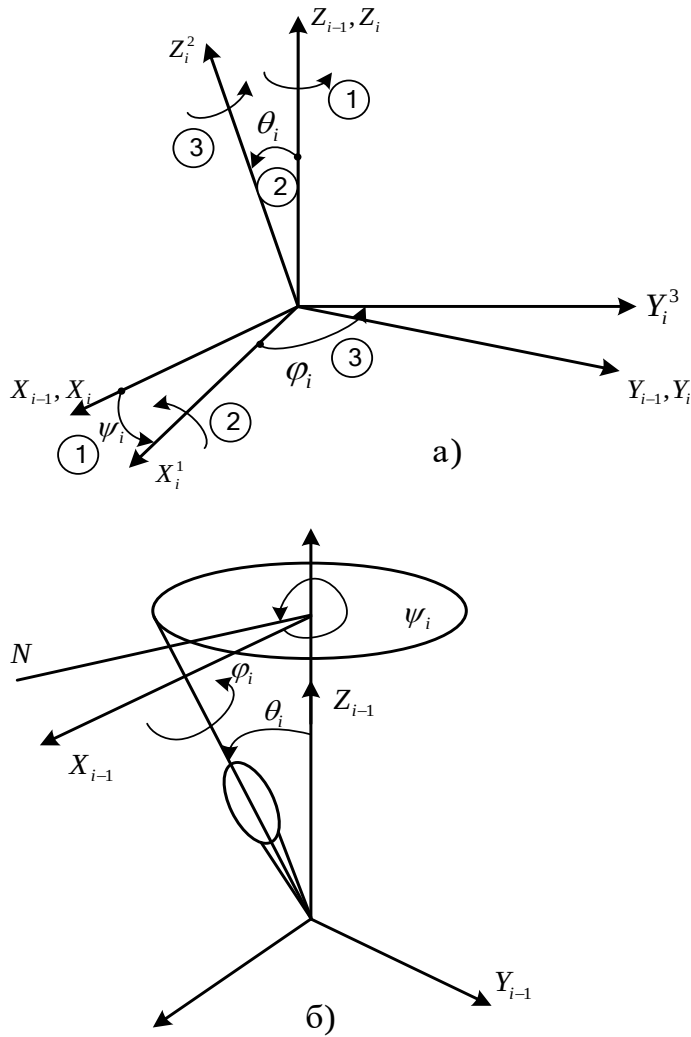


Рис. 6.16. Углы Эйлера

Перечисленные эволюции i -й системы координат отражаются следующим произведением матриц:

$$E_{i-1,i}^{\Psi,\Theta,\Phi} = E_{i-1,i}^{Z\Psi} \cdot E_{i-1,i}^{X\Theta} \cdot E_{i-1,i}^{Y\Phi} = \begin{vmatrix} C\psi_i & -S\psi_i & 0 & 0 \\ S\psi_i & C\psi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_i & -S\theta_i & 0 \\ 0 & S\theta_i & C\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} C\varphi_i & -S\varphi_i & 0 & 0 \\ S\varphi_i & C\varphi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

$$= \begin{vmatrix} C\psi_i C\varphi_i - S\psi_i C\theta_i S\varphi_i & -C\psi_i S\varphi_i - S\psi_i C\theta_i C\varphi_i & S\psi_i S\theta_i & 0 \\ S\psi_i C\varphi_i + C\psi_i C\theta_i S\varphi_i & -S\psi_i S\varphi_i + C\psi_i C\theta_i C\varphi_i & -C\psi_i S\theta_i & 0 \\ S\theta_i S\varphi_i & S\theta_i C\varphi_i & C\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Для определения углов Эйлера можно использовать ранее изложенный алгоритм решения прямой задачи кинематики с той разницей, что на заключительном этапе должны быть вычислены значения углов Эйлера из сопоставления соответствующих элементов матриц $T_{i-1,i}$ и $E_{i-1,i}$, а именно:

1. Рассчитываем матрицу $T_{i-1,i}$, в результате становятся известными численные значения ее элементов.

$$T_{i-1,i} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & C(y_{i-1} \wedge y_i) & a_{24} \\ a_{31} & C(z_{i-1} \wedge y_i) & C(z_{i-1} \wedge z_i) & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

2. Сопоставим те элементы матриц $T_{i-1,i}$ и $E_{i-1,i}$, которые наиболее просто позволяют определить углы Эйлера, а именно:

$$a_{33} = C\Theta_i; \quad \Theta_i = \arccos a_{33};$$

$$a_{23} = -\cos \psi_i \sin \theta_i; \quad \Psi_i = \arccos(-a_{23} / \sin \theta_i);$$

$$a_{32} = -\sin \theta_i \cdot \cos \varphi_i; \quad \varphi_i = \arccos(a_{32} / \sin \theta_{1n}).$$

Лекция

Тема 3.1.5. Прямая задача кинематики манипуляторов роботов. Абсолютные скорости и ускорения в манипуляционных системах промышленных роботов

ВОПРОСЫ

1. Теоретические вопросы решения прямой задачи.
2. Решение прямой задачи кинематики манипуляторов при позиционном (цикловом) управлении.
3. Определение абсолютных скоростей и ускорений точек и звеньев манипулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомченко В.Г., Соломин В.Ю. Мехатронные и робототехнические системы. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 160 с.

1. Теоретические вопросы решения прямой задачи

В принятых нами специальных системах координат ось Z_i всегда направлена:

- во вращательной кинематической паре по оси вращения;
- в поступательной паре параллельно направляющей кинематической паре.

Напомним также, что положение i -го звена относительно $(i-1)$ -го определяется обобщенной координатой q_i .

Если два звена соединены вращательной парой (рис 7.1а), то при вращении i -го звена относительно $(i-1)$ -го из четырех параметров Θ_i , S_i , a_i и α_i переменным будет параметр Θ_i , то есть во вращательной кинематической паре:

$$q_i = \Theta_i, \quad S_i = \text{const}, \quad a_i = \text{const}, \quad \alpha_i = \text{const}.$$

Если два звена соединены поступательной парой (рис. 7.1б), то при перемещении i -го звена относительно $(i-1)$ -го из четырех параметров Θ_i , S_i , a_i и α_i переменным будет параметр S_i , то есть в поступательной паре:

$$q_i = S_i, \quad \Theta_i = \text{const}, \quad a_i = \text{const}, \quad \alpha_i = \text{const}.$$

Таким образом, из четырех параметров, ориентирующих i -ю систему координат, а следовательно, и i -е звено относительно $(i-1)$ -го при движении i -го звена относительно $(i-1)$ -го переменным будет один параметр Θ_i или S_i , а три остальных – постоянны.

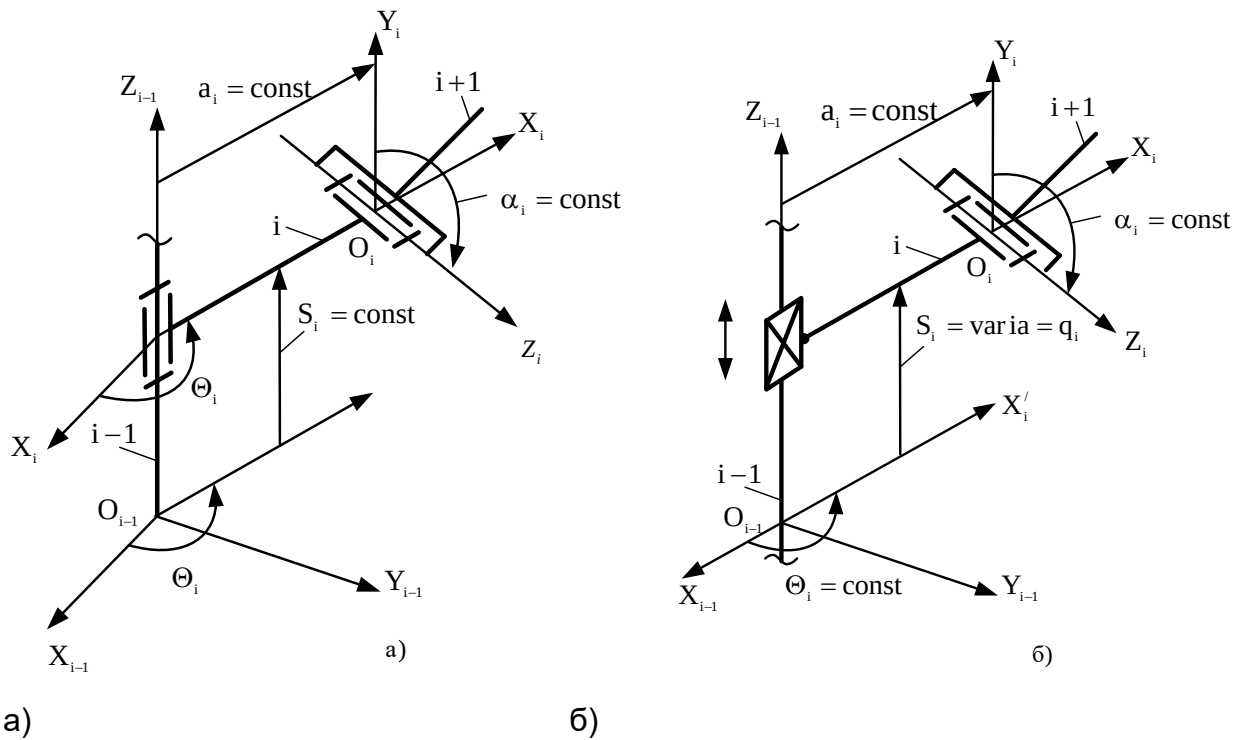


Рис. 7.1

Для описания кинематики манипулятора целесообразно использовать специальную таблицу кинематических пар, в которой для конкретного манипулятора про- ставляются определенные значения параметров Θ_i , S_i , a_i , α_i , а переменные пара- метры, являющиеся обобщенными координатами, отражаются буквой q_i .

Таблица кинематических пар манипулятора

Номер (i-1)-й кинематической пары	Тип (i-1)-й кинематической пары	Номер i-го подвижного звена	Параметры кинематической пары			
			Θ_i	S_i	a_i	α_i
0	вращательная или поступательная	1				
1		2				
.		.				
.		.				
.		.				
n-1		n				

Рассмотрим пример манипулятора, образованного последовательностью ки- нематических пар: вращательная – поступательная – вращательная (рис. 7.2).

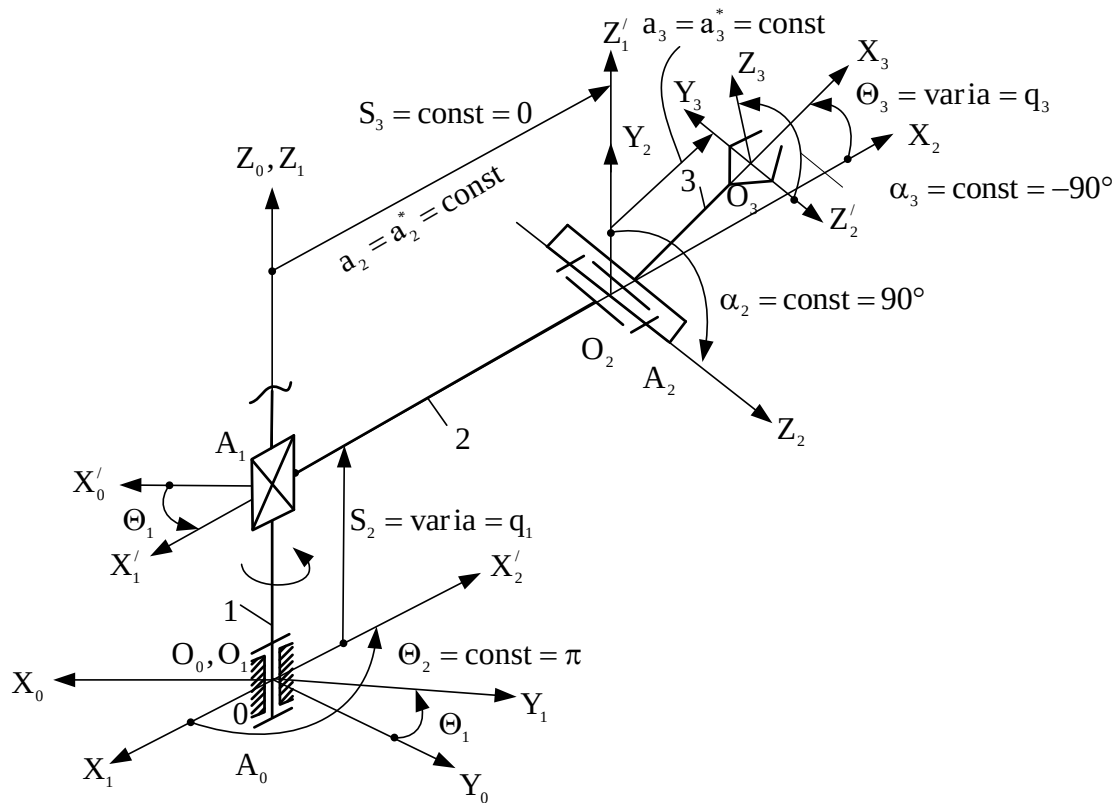


Рис. 7.2. Специальные системы координат звеньев манипулятора

Обоснуем выбор систем координат звеньев манипулятора.

Система $O_0X_0Y_0Z_0$ выбрана произвольно при обеспечении направления оси Z_0 по оси кинематической пары A_0 .

В системе $O_1X_1Y_1Z_1$: ось Z_1 направлена по направляющей кинематической пары A_1 и совмещена с осью Z_0 . Начало координат O_1 может быть выбрано в любой точке оси Z_1 – в нашем случае она совмещена с точкой O_0 . Поэтому $S_1 = a_1 = 0$, оси Z_0 и Z_1 совпадают, значит $\alpha_1 = 0$. Переменным является угол Θ_1 , так как звено 1 вращается относительно звена 0, следовательно, $q_1 = \Theta_1$.

Система координат $O_2X_2Y_2Z_2$ выбрана по ранее изложенному правилу: так как пара A_1 поступательная (звено 2 перемещается относительно звена 1), то расстояние S_2 будет переменным, следовательно, $q_2 = S_2$. Величины Θ_2 , a_2 и α_2 найдены по общему правилу: $\Theta_2 = \pi$, $\alpha_2 = 0,5\pi$, $a_3 = a_3^*$.

Система $O_3X_3Y_3Z_3$ выбрана по правилу для действующего n-го (последнего) звена: начало O_3 координат назначено в центре A_3 схвата, ось X_3 направлена перпендикулярно оси Z_2 . Так как пара A_2 вращательная, то переменным параметром

будет угол Θ_3 , следовательно, $q_3 = \Theta_3$. Параметры S_3 , a_3 и α_3 определяются по общему правилу: $S_3 = 0$ (так как после поворота оси X_2 на угол Θ_3 оси X_2 и X_3 совпали), $a_3 = a_3^*$, $\alpha_3 = -90^\circ$ и являются постоянными.

Примечание: a_2^* и a_3^* – некоторые фиксированные значения параметров a_2 и a_3 .

Заполним таблицу кинематических пар для данного манипулятора.

Номер (i-1)-й кинематической пары	Тип (i-1)-й кинематической пары	Номер i-го подвижного звена	Параметры кинематической пары			
			Θ_i	S_i	a_i	α_i
0	<i>Вращательная</i>	1	q_1	0	0	0
1	Поступательная	2	π	q_2	a_2^*	$0,5\pi$
2	Вращательная	3	q_3	0	a_3^*	$-0,5\pi$

Прямая задача кинематики манипуляторов заключается, как отмечалось, в определении положения его звеньев в неподвижной (инерциальной) системе координат по известным значениям обобщенных координат и при известных значениях кинематических размеров звеньев.

Важным частным видом прямой задачи кинематики манипулятора является определение положения его схвата, закрепленного на последнем n-м звене манипулятора.

Положение схвата в неподвижной системе координат будет определено полностью, если будут известны координаты его центра A_n и ориентация последнего n-го звена в неподвижной системе координат. В нашем случае, когда в центр A_n схвата помещено начало n-й системы координат, для определения положения и ориентации схвата достаточно определить координаты начала n-й системы координат в системе координат, связанной с 0-м звеном.

Запишем формулу (6.2) для n звеньев, как бы «пяться» от звена n к звену 0.

$$R_{n-1,n} = T_{n-1,n} R_{nn}$$

$$R_{n-2,n} = T_{n-2,n-1} R_{n-1,n}$$

.....

$$R_{1,n} = T_{1,2} \cdot R_{2n}$$

$$R_{0n} = T_{0,1} \cdot R_{1,n}$$

Подставив в последнее равенство последовательно все предыдущие, получим

$$R_{0n} = T_{01} \cdot T_{12} \cdots T_{n-1,n} \cdot R_{nn}$$

или в более общем виде

$$R_{0n} = T_{0n} \cdot R_{nn}, \quad (7.1)$$

$$\text{где} \quad T_{0n} = T_{01} \cdot T_{12} \cdots T_{n-1,n} \quad (7.2)$$

Каждый элемент матрицы T_{0n} содержит информацию о взаиморасположении систем координат $O_n X_n Y_n Z_n$ и $O_0 X_0 Y_0 Z_0$:

$$T_{0n} = \begin{vmatrix} a_{11}^{0n} & a_{12}^{0n} & a_{13}^{0n} & a_{14}^{0n} \\ a_{21}^{0n} & a_{22}^{0n} & a_{23}^{0n} & a_{24}^{0n} \\ a_{31}^{0n} & a_{32}^{0n} & a_{33}^{0n} & a_{34}^{0n} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Обратим внимание на важное обстоятельство: начало координат n -го звена совпадает с центром схвата. Отсюда вытекает следующее следствие:

$$R_{nn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ так как } x_{nn} = y_{nn} = z_{nn} = 0.$$

Таким образом, первые три элемента 4-го столбца матрицы T_{0n} , а именно элементы a_{14}^{0n} , a_{24}^{0n} , a_{34}^{0n} представляют собой координаты центра схвата. Это объясняется еще и тем, что эти элементы, согласно зависимостям (6.3) – (6.6), являются координатами, которые отражают смещение (перенос) начала координат n -й системы относительно 0-й неподвижной системы координат.

В нашем же случае начало координат n -й системы и центр схвата, как отмечалось, совпадают, что и подтверждают равенства:

$$x = a_{14}^{0n}, \quad y_{01n} = a_{24}^{0n}, \quad z = a_{34}^{0n}.$$

Матрица T_{0n} по структуре полностью аналогична любой матрице $T_{i-1,i}$ (6.7).

Значит, как и в матрице $T_{i-1,i}$, 1-й элемент 2-го столбца и первые два элемента 3-го столбца будут являться направляющими косинусами осей z_n и y_n относительно осей x_0 и y_0 , а именно:

$$\cos(x_0 \wedge z_n) = a_{13}^{on}; \quad \cos(y_0 \wedge z_n) = a_{23}^{on}; \quad \cos(x_0 \wedge y_n) = a_{12}^{on}.$$

Теперь можно определить углы между соответствующими осями:

$$x_0 \wedge z_n = \arccos a_{13}^{on}, \quad y_0 \wedge z_n = \arccos a_{23}^{on}, \quad x_0 \wedge y_n = \arccos a_{12}^{on}.$$

Именно эти углы применительно к звеньям $i-1$ и i показаны на рисунке 6.14б.

Перепишем матрицу T_{0n} , опустив верхние индексы

$$T_{0n} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (7.3)$$

Заметим, что положение схвата в пространстве (координаты его центра A_n и ориентацию n -го звена) мы определяем шестью наддиагональными элементами матрицы T_{0n} . Таким образом, шесть наддиагональных элементов матрицы T_{0n} дают полную информацию о положении схвата в пространстве.

Следовательно, отпадает необходимость в использовании формулы (7.1), а достаточно использовать выражение (7.3) в виде

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = T_{0,1} \cdot T_{1,2} T_{2,3} \cdots T_{n-1,n}. \quad (7.4)$$

и воспользоваться наддиагональными элементами a_{12} , a_{13} , a_{23} и a_{14} , a_{24} , a_{34} .

Для определения положения любого промежуточного i -го звена манипулятора относительно стойки надо перемножить соответствующее число первых слева матриц перехода, то есть воспользоваться выражением

$$T_{0,i} = \begin{vmatrix} - & a_{12}^{0i} & a_{13}^{0i} & a_{14}^{0i} \\ - & - & a_{23}^{0i} & a_{24}^{0i} \\ - & - & - & a_{34}^{0i} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = T_{01} \cdot T_{12} \cdots T_{i-1,i}.$$

Наддиагональные элементы дадут искомое решение.

Можно также определить положение любого k -го звена относительно m -го звена ($k < m$) по формуле

$$T_{k,m} = T_{k,k+1} \cdot T_{k+1,k+2} \cdots T_{m-1,m}.$$

Заметим, что в силу закона ассоциативности исходные матрицы – сомножители, записанные в порядке возрастания номеров звеньев и пар манипулятора, можно перемножать как справа налево, так и слева направо.

Перемножение справа налево, видимо, более наглядно, т. к. последовательно координаты схвата пересчитываются в предыдущие системы координат: «счет пятясь». Так удобно умножать, когда определяется положение только схвата.

Перемножение слева направо позволяет попутно определить положения всех промежуточных звеньев. Для этого достаточно лишь обеспечить в ходе вычислительного процесса запоминание наддиагональных элементов матриц, получаемых как промежуточные при расчете.

2. Решение прямой задачи кинематики манипуляторов при позиционном (цикловом) управлении

Позиционное управление обеспечивает движение схвата от одной фиксированной точки к другой с остановкой в каждой точке. Поэтому с теоретической точки зрения достаточно рассмотреть движение между двумя соседними точками, которые можно назвать: одну начальной, в которой схват находится в данное время, другую – конечной, куда схват должен переместиться.

При позиционном управлении таких точек обычно более двух: $3, 4, \dots, N$.

Цикловое управление является частным случаем позиционного. При цикловом управлении задаются две точки позиционирования, находящиеся, как правило, на значительном расстоянии друг от друга: место хранения заготовок – рабочая зона станка. На данном этапе будем считать, что для решения прямой задачи при позиционном управлении известны координаты начальной и конечной точек схвата в

неподвижной системе координат, связанной с неподвижным (0-м) звеном манипулятора. И главное, будем считать, что известны значения обобщенных координат, соответствующих начальному и конечному положениям схвата. Например, для двухподвижного манипулятора (рис. 7.3) должны быть известны значения:

$$q_1^H = \Theta_1^H; \quad q_1^K = \Theta_1^K; \quad q_2^H = \Theta_2^H; \quad q_2^K = \Theta_2^K.$$

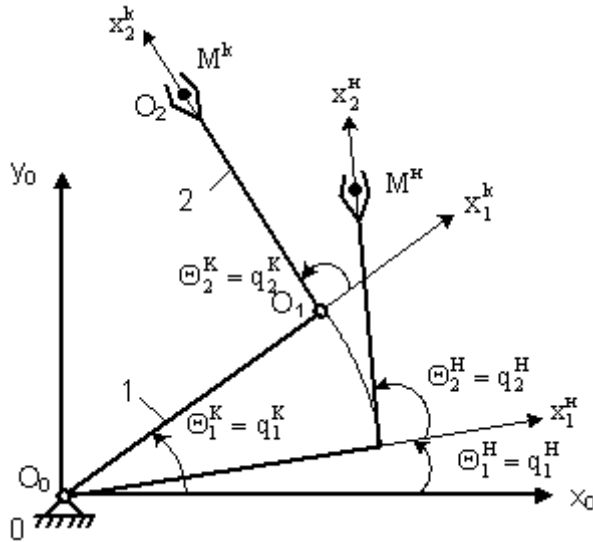


Рис. 7.3

Прямая задача кинематики в этом случае разделяется на две подзадачи:

1-я подзадача: планирование траекторий в пространстве обобщенных координат. Эта подзадача сводится к определению положения одного звена относительно предшествующего ему звена, то есть к определению обобщенных координат в функции времени:

$$q_i = q_i(t), \quad (i=1, \dots, n).$$

2-я подзадача заключается в определении траектории движения схвата и его ориентации в пространстве (при необходимости и всех других характерных точек звеньев) при его движении от начальной точки к конечной.

Решение 1-й подзадачи начинается с выбора общего вида закона движения звеньев по обобщенной координате.

Наибольшее распространение получили два закона движения: *прямоугольный и синусоидальный законы движения* (название дано по виду диаграмм ускорений).

Для прямоугольного закона характерно минимально возможные при данной длительности интервалов разгона и торможения значения ускорений, следовательно, и сил инерций при движении одного звена относительно другого. Однако в начале и конце интервалов разгона и торможения возникают так называемые «мягкие» удары, связанные с мгновенным изменением в указанные моменты инерционных воздействий (сил или моментов сил инерций).

При движении i -го звена относительно $(i-1)$ -го по прямоугольному закону (рис. 7.4) i -е звено на интервале t_p разгоняется под действием прилагаемого усилия, развивающего постоянное ускорение $\ddot{q}_i^p$. При достижении скорости $\dot{q}_i^p$ ускорение принимает значение, равное 0, а усилие привода тратится на преодоление сил трения.

На интервале торможения работают устройства торможения, которые развивают силовое воздействие для обеспечения отрицательного ускорения $\ddot{q}_i^T$.

Длительности интервалов разгона t_{pi} , движения с постоянной скоростью $t_{\Pi i}$ и торможения t_{Ti} связаны зависимостью

$$t_{pi} + t_{\Pi i} + t_{Ti} = T,$$

где T – заданное время движения от начальной точки к конечной.

Поэтому произвольно можно назначать лишь длительности двух интервалов, например: t_{pi} и t_{Ti} . Для обеспечения наибольшего быстродействия робота следует принять $t_{pi} = t_{Ti} = 0,5T$. В этом случае в первую половину интервала движение i -го звена будет равноускоренным, а во вторую – равнозамедленным.

Так как в конце интервала разгона и в начале интервала торможения скорость i -го звена одинакова, то

$$\ddot{q}_i^p \cdot t_{pi} = \ddot{q}_i^T t_{Ti}, \text{ значит } \ddot{q}_i^T = \ddot{q}_i^p \cdot t_{pi} / t_{Ti}. \quad (7.5)$$

При выбранных длительностях интервалов разгона и торможения необходимо найти такую величину ускорения $\ddot{q}_i^p$, при которой бы звено за заданное время T переместилось из начальной точки в конечную.

По графику перемещения i -го звена (рис. 7.4) можно записать уравнение связи:

$$0,5 \ddot{q}_i^p t_{pi}^2 + \ddot{q}_i^p \cdot t_{pi} \cdot t_{\Pi i} + 0,5 \ddot{q}_i^T t_{Ti}^2 = q_i^k - q_i^H,$$

$$\text{где } \ddot{q}_i^T = \ddot{q}_i^p \cdot t_{pi} / t_{Ti}, \quad (i = 1, \dots, n).$$

Откуда с учетом зависимости (7.5) получим

$$\ddot{q}_i^p = (q_i^k - q_i^H) / \left[\left(0,5 t_{pi} + t_{\Pi i} + 0,5 t_{Ti} \right) \cdot t_{pi} \right].$$

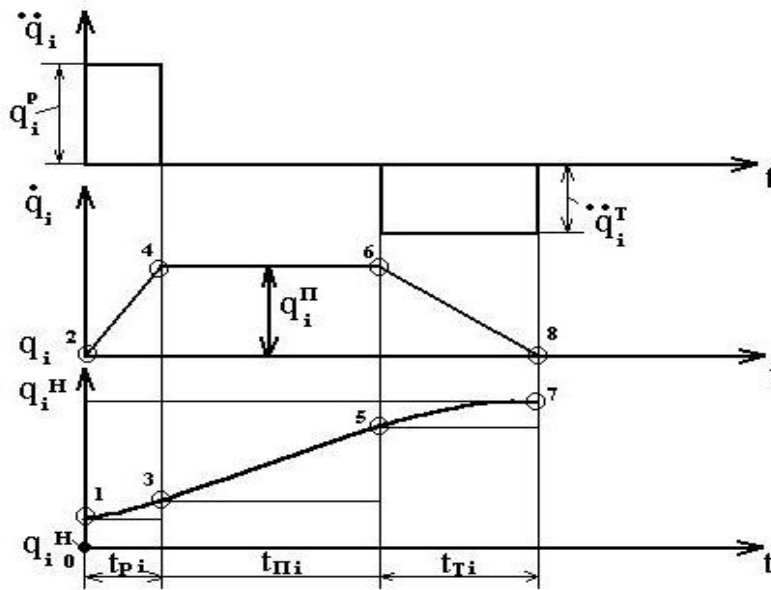


Рис. 7.4. Закон движения – прямоугольное ускорение

После определения обобщенных ускорений $\ddot{q}_i^p$ и $\ddot{q}_i^T$ по известным из физики зависимостям можно определить обобщенные скорости $\dot{q}_i$ и обобщенные координаты i -го звена в любой момент времени:

– участок разгона ($0 \leq t \leq t_{pi}$)

$$\dot{q}_i = \ddot{q}_i^p \cdot t; \quad q_i = q_i^H + 0,5 \ddot{q}_i^p t^2;$$

– участок движения с постоянной обобщенной скоростью ($t_{pi} < t \leq t_{pi} + t_{\Pi i}$)

$$\dot{q}_i = \ddot{q}_i^p \cdot t_{pi} = \text{const}; \quad q_i = q_i^H + 0,5 \ddot{q}_i^p \cdot t_{pi}^2 + \ddot{q}_i^p \cdot t_{pi} \cdot (t - t_{pi});$$

– участок торможения ($t_{pi} + t_{\Pi i} < t \leq T$);

$$\dot{q}_i = \ddot{q}_i^p \cdot t_{pi} - \ddot{q}_i^T \cdot (t - t_{pi} - t_{\Pi i});$$

$$q_i = q_i^H + 0,5 \ddot{q}_i^p \cdot t_{pi}^2 + \ddot{q}_i^p \cdot t_{pi} \cdot t_{\Pi i} + \ddot{q}_i^p \cdot t_{pi} \cdot (t - t_{pi} - t_{\Pi i}) - 0,5 \ddot{q}_i^T \cdot (t - t_{pi} - t_{\Pi i})^2.$$

Итак, получены зависимости $q_i = q_i(t)$, при $0 \leq t \leq T$, ($i=1, \dots, n$), подставляя которые в формулу (7.4) можно определить траекторию схвата.

Выше получен закон движения исходя из физических представлений. Подойдем к синтезу этого закона чисто формально.

Полученный закон движения представляет собой простейший пример использования сплайн-функций для описания относительного движения звеньев по обобщенной координате. Рассмотрим полученную функцию именно как сплайн-функцию, то есть кусочно-непрерывную функцию, составленную из нескольких отрезков некоторых непрерывных функций: график требуемой функции должен пройти через восемь фиксированных точек (рис. 7.4), которые можно использовать в качестве условий проектирования закона движения. Для их удовлетворения надо в аналитическом выражении иметь восемь свободных коэффициентов. Тогда:

- для 1-го участка $0 \leq t \leq t_p$ $q_i^p(t) = a_2 t^2 + a_1 t + a_0$;
- для 2-го участка $t_p < t \leq t_p + t_{\Pi}$ $q_i^{\Pi}(t) = b_1 t + b_0$;
- для 3-го участка $t_p + t_{\Pi} < t \leq T$ $q_i^T(t) = c_2 t^2 + c_1 t + c_0$.

Сформулируем граничные условия:

$$t = 0; \quad 1) q^p(0) = q^H; \quad 2) \dot{q}^p(0) = 0;$$

$$t = t_p; \quad 3) q^p(t_p) = q^{\Pi}(t_{\Pi}); \quad 4) \dot{q}^p(t_p) = \dot{q}^{\Pi}(t_p);$$

$$t = t_p + t_{\Pi}; \quad 5) q^{\Pi}(t_p + t_{\Pi}) = q^T(t_p + t_{\Pi}); \quad 6) \dot{q}^{\Pi}(t_p + t_{\Pi}) = \dot{q}^T(t_p + t_{\Pi});$$

$$t = T; \quad 7) q^T(T) = q^K; \quad 8) \dot{q}^T(T) = 0.$$

Подставляя значения обобщенных координат, скоростей и ускорений на границах участков в полиномы, выражающие законы движения, и в их производные, получим после преобразований и решения соответствующей системы уравнений:

$$\dot{q}^{\Pi} = b_1 = \frac{q^K - q^H}{0,5t_p + t_{\Pi} + 0,5t_T}; \quad \ddot{q}^p = 2a_2 = \frac{b_1}{t_p} = \frac{q^K - q^H}{(0,5t_{pi} + t_{\Pi} + 0,5t_{Ti})t_{pi}}.$$

Из чисто формальных соображений получены те же самые основные зависимости.

Заметим, что по различным степеням подвижности значения интервалов разгона, движения с постоянной скоростью и торможения в общем случае могут быть различны.

Для обеспечения более плавной безударной работы привода i -го звена используют законы движения, в которых ускорение плавно изменяется от нуля в начале интервала разгона до некоторой максимальной величины, а затем плавно убывает до нуля.

Одним из наиболее распространенных законов такого типа является синусоидальный закон (рис. 7.5).

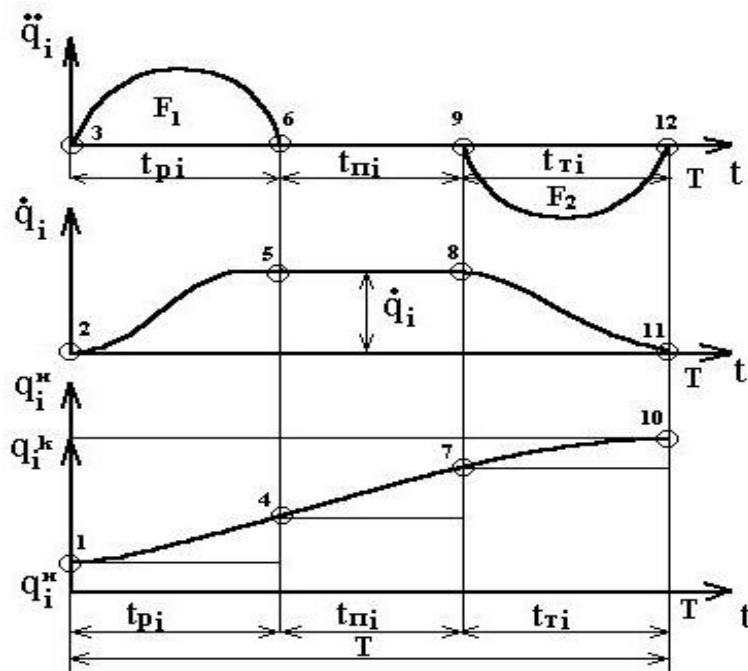


Рис. 7.5. Синусоидальный закон движения

Для установления зависимостей между длительностями интервалов, величинами обобщенных ускорений, скоростей и перемещений здесь удобно использовать диаграмму обобщенных скоростей $\dot{q}_i(t)$:

$$\dot{q}_i(t) = \begin{cases} 0,5\dot{q}_i^{\Pi} \left[1 - \cos \frac{\pi \cdot t}{t_{pi}} \right] & \text{при } 0 \leq t \leq t_{pi}; \\ \dot{q}_i^{\Pi} & \text{при } t_{pi} < t \leq t_{pi} + t_{ni}; \\ 0,5\dot{q}_i^{\Pi} \left[1 + \cos \frac{\pi(t - t_{pi} - t_{ni})}{T - t_{pi} - t_{ni}} \right] & \text{при } t_{pi} + t_{ni} < t \leq T. \end{cases}$$

Интегрируя эту зависимость от 0 до T и приравнявая результат к перемещению по обобщенной координате q_i , равному $q_i^k - q_i^n$, находится постоянная интегрирования $\dot{q}_i^{\Pi} = \text{const}$, а после этого и зависимость $q_i(t)$.

Дифференцируя выражение для обобщенной скорости $\dot{q}_i(t)$, определим обобщенные ускорения $\ddot{q}_i(t)$.

Полученные законы движения являются, по сути, сплайн-функциями, то есть функциями, составленными из отрезков нескольких простейших функций, имеющих касание друг с другом того или иного порядка. При необходимости можно самим сконструировать подходящий закон движения.

Вторая подзадача решается с использованием зависимости (7.2)–(7.4) с учетом того, что в каждой матрице $T_{i-1,i}$ элементы являются функциями одной обобщенной координаты q_i :

$$q_i(t) = \begin{cases} \Theta_i(t), & \text{если пара вращательная;} \\ S_i(t), & \text{если пара поступательная.} \end{cases}$$

Перепишем выражение (7.2) в виде

$$T_{\text{он}}(q_1, \dots, q_n; t) = T_{01}[q_1(t)] \cdot T_{12}[q_2(t)] \cdots T_{n-1,n}[q_n(t)]$$

из которого в соответствии с (7.4) определим значения шести наддиагональных элементов.

$$\begin{vmatrix} - & a_{12}(t) & a_{13}(t) & a_{14}(t) \\ - & - & a_{23}(t) & a_{24}(t) \\ - & - & - & a_{34}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = T_{01}[q_1(t)] \cdot T_{12}[q_2(t)] \cdots T_{n-1,n}[q_n(t)].$$

Понятно, что каждый из наддиагональных элементов есть также функция обобщенных координат и времени, то есть $a_{k,l} = a_{k,l}(q_1, \dots, q_n; t)$, ($k=1,2,3$; $l=2,3,4$).

Таким образом, решение 2-й подзадачи есть решение основной прямой задачи кинематики манипулятора и она решается по изложенному ранее алгоритму при известных, как результат выполнения 1-й подзадачи, зависимостях $q_i = q_i(t)$; $0 \leq t \leq T$.

3. Определение абсолютных скоростей и ускорений точек и звеньев манипулятора

После того как принят закон изменения обобщенных координат $q_i(t)$, можно в соответствии с изложенным ранее матричным методом определить положение

схвата и любого другого звена манипулятора в пространстве, т. е. определить координаты их характерных точек и ориентацию как функцию времени.

Запишем вновь выражение (7.1): $R_{0n} = T_{0n} \cdot R_{nn}$.

$$\text{Тогда } \dot{R}_{0n} = \frac{dR_{0n}}{dt} = \frac{dT_{0n}}{dt} \cdot R_{nn} + T_{0n} \cdot \frac{dR_{nn}}{dt}.$$

$$\text{Так как } \frac{dR_{nn}}{dt} = 0, \text{ то } \dot{R}_{0n} = \frac{dT_{0n}}{dt} \cdot R_{nn} \text{ или } \dot{R}_{0n} = \dot{T}_{0n} \cdot R_{nn}$$

С формальной стороны назначение вектора столбца $R_{nn} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$ заключается в выделении из матрицы 4x4 подобного ему вектора-столбца, в основе которого будет четвертый столбец матрицы $\dot{T}_{0n}$.

Поэтому можно записать, с учетом того, что по четвертой координате скорость равна 0, т. к. $dl/dt = 0$:

$$\dot{R}_{0n} = \begin{bmatrix} \dot{a}_{11} & \dot{a}_{12} & \dot{a}_{13} & \dot{x}_{0n} \\ \dot{a}_{21} & \dot{a}_{22} & \dot{a}_{23} & \dot{y}_{0n} \\ \dot{a}_{31} & \dot{a}_{32} & \dot{a}_{33} & \dot{z}_{0n} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_{0n} \\ \dot{y}_{0n} \\ \dot{z}_{0n} \\ 0 \end{bmatrix}$$

(Производная от матрицы равна матрице, все элементы которой есть производные от элементов исходной матрицы).

Таким образом, для определения линейных скоростей точек манипулятора и, в частности схвата, достаточно взять производную по времени от соответствующей матрицы перехода и выделить в ней четвертый столбец.

Найдем производную матрицы перехода как производную произведения:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{0n}}{dt} &= \dot{T}_{01} \cdot \frac{dq_1}{dt} \cdot T_{12} \cdot T_{23} \cdots T_{i-1,i} \cdots T_{n-1,n} + \\ &+ T_{01} \cdot \dot{T}_{12} \cdot \frac{dq_2}{dt} \cdot T_{23} \cdots T_{i-1,i} \cdots T_{n-1,n} + \\ &+ \cdots + T_{01} \cdot T_{12} \cdot T_{23} \cdots \dot{T}_{i-1,i} \cdot \frac{dq_i}{dt} \cdots T_{n-1,n} + \\ &T_{12} \cdot T_{23} \cdot T_{34} \cdots T_{i-1,i} \cdots \dot{T}_{n-1,n} \cdot \frac{dq_n}{dt}. \end{aligned} \quad (7.6)$$

Если бы имелись аналитические выражения для каждого элемента результирующей матрицы перехода, то достаточно было бы продифференцировать по времени эти элементы и получить абсолютные скорости по каждой координате X,Y,Z.

Однако обычно располагают только матрицами перехода, перемножая которые определяют координаты необходимых точек манипулятора и ориентацию его звеньев.

Если разрабатывается система управления для конкретного манипулятора, то возможно в некоторых случаях провести преобразования и перейти к конкретным аналитическим выражениям. Но это должно оцениваться в каждом конкретном случае: либо целесообразно сокращать затраты времени проектировщиков, либо машинное время при управлении роботом.

После того как определены скорости по трем координатам, можно определить полную абсолютную скорость требуемых точек звеньев манипулятора, и в частности центра схвата.

$$V_{0n} = \sqrt{\dot{x}_{0n}^2 + \dot{y}_{0n}^2 + \dot{z}_{0n}^2}.$$

$$\Omega_{i-1,i} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\Omega_{i-1,i} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

Так как при исследовании кинематики манипуляторов используются специальные системы координат и перемещение i -го звена относительно $(i-1)$ -го всегда происходит по оси Z_{i-1} либо вокруг нее, то расчет производных от исходных матриц перехода кинематических пар несколько упрощается: чтобы продифференцировать матрицу перехода кинематической пары, достаточно ее

умножить слева на матрицу дифференцирования $\Omega_{i-1,i}$.

если i -я кинематическая пара вращательная;

если i -я кинематическая пара поступательная,

$$\text{то есть } \frac{dT_{i-1,i}}{dt} = \Omega_{i-1,i} \cdot T_{i-1,i} \cdot \frac{dq_i}{dt}.$$

Тогда выражение (7.6) примет вид:

$$\frac{dT_{0n}}{dt} = \Omega_{01} \cdot T_{01} \cdot \frac{dq_1}{dt} \cdot T_{12} \cdots T_{n-1,n} + \cdots + T_{01} \cdot T_{12} \cdots \Omega_{i-1,i} \cdot T_{i-1,i} \cdot \frac{dq_i}{dt} \cdots T_{n-1,n} + \cdots + T_{12} \cdot T_{23} \cdots T_{i-1,i} \cdots \Omega_{n-1,n} \cdot T_{n-1,n} \cdot \frac{dq_n}{dt}.$$

Пример: Пусть матрица перехода будет иметь вид (поворот вокруг оси Z_{i-1}):

$$T_{i-1,i}^{Z\Theta} = \begin{vmatrix} C\Theta_i & -S\Theta_i & 0 & 0 \\ S\Theta_i & C\Theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Тогда по правилу дифференцирования матриц

$$\frac{dT_{i-1,i}^{Z\Theta}}{dt} = \begin{vmatrix} -S\Theta_i & -C\Theta_i & 0 & 0 \\ C\Theta_i & -S\Theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \frac{d\Theta_i}{dt}.$$

С использованием матрицы дифференцирования $\Omega_{i-1,i}$:

$$\frac{dT_{i-1,i}^{Z\Theta}}{dt} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} C\Theta_i & -S\Theta_i & 0 & 0 \\ S\Theta_i & C\Theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \frac{d\Theta_i}{dt} = \begin{vmatrix} -S\Theta_i & -C\Theta_i & 0 & 0 \\ C\Theta_i & -S\Theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \frac{d\Theta_i}{dt}.$$

Определим матрицу $\dot{T}_{i-1,i}$, равную произведению $\Omega_{i-1,i} \cdot T_{i-1,i}$, для вращательной и поступательной кинематических пар:

– вращательная кинематическая пара $q_i = \Theta_i = \text{var ia}$:

$$\begin{aligned} \dot{T}_{i-1,i} &= \Omega_{i-1,i} \cdot T_{i-1,i} = \begin{vmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} C\Theta_i & -S\Theta_i C\alpha_i & S\Theta_i S\alpha_i & a_i C\Theta_i \\ S\Theta_i & C\Theta_i C\alpha_i & -C\Theta_i S\alpha_i & a_i S\Theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & S_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \frac{d\Theta_i}{dt} = \\ &= \begin{vmatrix} -S\Theta_i & -C\Theta_i C\alpha_i & C\Theta_i S\alpha_i & -a_i S\Theta_i \\ C\Theta_i & -S\Theta_i C\alpha_i & S\Theta_i S\alpha_i & a_i C\Theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \frac{d\Theta_i}{dt}; \end{aligned}$$

– поступательная кинематическая пара $q_i = S_i = \text{varia}$:

$$\dot{T}_{i-1,i} = \Omega_{i-1,i} \cdot T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C\Theta_i & -S\Theta_i C\alpha_i & -S\Theta_i S\alpha_i & a_i C\Theta_i \\ S\Theta_i & C\Theta_i C\alpha_i & -C\Theta_i S\alpha_i & a_i S\Theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & S_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{dS_i}{dt}.$$

Зная аналитические выражения матриц скоростей, их можно непосредственно подставлять в выражение (7.6).

Смысл использования оператора дифференцирования $\Omega_{i-1,i}$, состоит в сохранении матриц $T_{i-1,i}$, чтобы не переходить к другим аналитическим выражениям при составлении программ вычисления скоростей.

Лекция

Тема 3.1.6. Обратная задача кинематики манипуляционных роботов

ВОПРОСЫ

1. Обратная задача кинематики манипуляционных роботов при контурном управлении.
2. Решение обратной задачи кинематики манипуляторов на основе линейной зависимости между абсолютными и обобщенными скоростями (управление по скорости).

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомченко В.Г., Соломин В.Ю. Мехатронные и робототехнические системы. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 160 с.

1. Обратная задача кинематики манипуляционных роботов при контурном управлении

Обратная задача кинематики манипуляторов является одной из основных задач кинематического и динамического анализа и синтеза манипуляторов.

Она решается при контурном управлении роботом, когда схват должен перемещаться по заданной в пространстве и времени траектории, и заключается в определении значений обобщенных координат манипулятора по заданному положению схвата. В результате решения обратной задачи должны быть определены в аналитической или табличной форме зависимости

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q_1(\Theta_1, S_1, a_1, \alpha_1, x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}, x_0 \wedge z_n, y_0 \wedge z_n, x_0 \wedge y_n; t) ; \\ \\ q_i &= q_i(\Theta_i, S_i, a_i, \alpha_i, x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}, x_0 \wedge z_n, y_0 \wedge z_n, x_0 \wedge y_n; t) ; \\ \\ q_n &= q_n(\Theta_n, S_n, a_n, \alpha_n, x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}, x_0 \wedge z_n, y_0 \wedge z_n, x_0 \wedge y_n; t) \end{aligned} \right\}$$

При работе манипулятора положение схвата непрерывно меняется по заданному закону движения. При этом центр схвата будет описывать требуемую траекторию, а схват будет ориентирован в пространстве вполне определенным образом, то есть обратная задача решается по заданным зависимостям

$$\begin{aligned} x_{0n} &= x_{0n}(t); \quad y_{0n} = y_{0n}(t); \quad z_{0n} = z_{0n}(t); \\ x_0 \wedge z_n &= f_1(t); \quad y_0 \wedge z_n = f_2(t); \quad x_0 \wedge y_n = f_3(t). \end{aligned}$$

Примеры заданных траекторий:

- раскрой листового материала (рис. 8.1а);
- сварка непрерывных швов на сложной пространственной поверхности (рис. 8.1б).

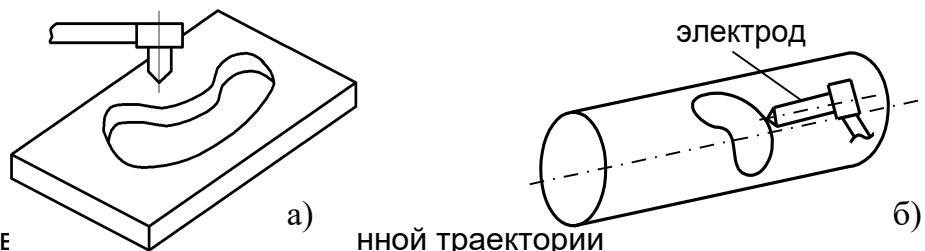


Рис. 8.1. ДЕ

Для обеспечения произвольного требуемого положения схвата в общем случае необходимо шесть степеней подвижности, три из которых – переносные –

должны обеспечивать заданное положение схвата в пространстве, то есть заданные значения координат $x_{0n} = x_{0n}(t)$; $y_{0n} = y_{0n}(t)$; $z_{0n} = z_{0n}(t)$, а другие три – ориентирующие – заданную ориентацию схвата: $x_0^{\wedge} z_n = f_1(t)$; $y_0^{\wedge} z_n = f_2(t)$; $x_0^{\wedge} y_n = f_3(t)$.

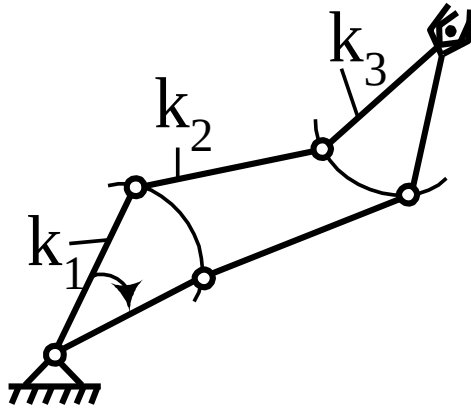


Рис. 8.2. Возможные положения манипулятора

Если число степеней подвижности манипулятора меньше шести, то схват не сможет занять произвольное положение и на его положение и ориентацию будут наложены ограничения.

Если число степеней подвижности больше шести или больше заданных условий, то манипулятор приобретает свойство маневренности, в результате которой схват может занять требуемое

положение при различных положениях промежуточных звеньев (рис. 8.2).

Избыточные степени подвижности можно использовать для удовлетворения каких-либо дополнительных условий, например для обхода препятствий.

В дальнейшем, если специально не оговорено, будут рассматриваться случаи, когда число степеней подвижности равно числу условий на движение схвата.

Рассмотрим несколько простых случаев решения обратной задачи кинематики манипулятора.

Пример 1. Манипулятор с прямоугольной системой координат (рис. 8.3).

Задано: $n = 3$; $x_{03}(t)$; $y_{03}(t)$; $z_{03}(t)$.

Определить: $q_1(t)$; $q_2(t)$; $q_3(t)$.

Непосредственно по рисунку 8.3 можно установить, что:

$$q_1(t) = z_{0n}(t); \quad q_2(t) = y_{0n}(t); \quad q_3(t) = x_{0n}(t)$$

Равенство обобщенных координат требуемым координатам схвата является важным и основным преимуществом манипуляторов с прямоугольной системой координат, так как не требует сложных вычислений при определении управляющих воздействий.

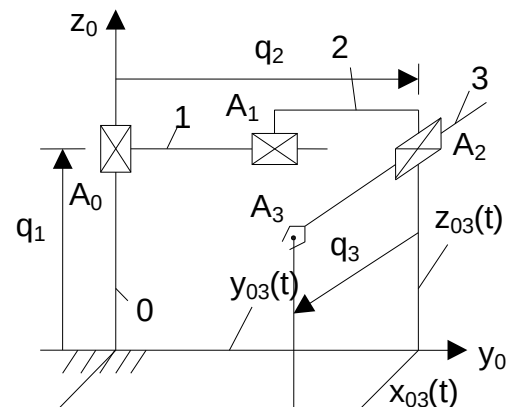


Рис. 8.3. Манипулятор с прямоугольной системой координат

Пример 2. Манипулятор с цилиндрической системой координат (рис. 8.4).

Задано: $n = 3$, $x_{03}(t)$, $y_{03}(t)$, $z_{03}(t)$.

Определить: $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$.

По рис. 8.4 можно определить:

$$q_2(t) = z_{03}(t);$$

$$q_3(t) = \sqrt{x_{03}^2(t) + y_{03}^2(t)};$$

$$q_1(t) = \arcsin \frac{y_{03}(t)}{q_3(t)}.$$

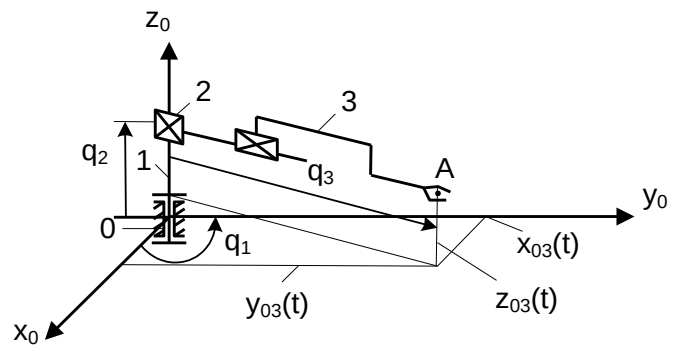


Рис. 8.4. Манипулятор с цилиндрической системой координат

Пример 3. Манипулятор с угловой (ангулярной) системой координат (рис. 8.5).

Задано: $x_{02}(t)$, $y_{02}(t)$.

Определить: $q_1(t)$, $q_2(t)$.

Данную задачу можно решить, как и раньше, из чисто геометрических соображений:

$$q_2(t) = \arccos \frac{\rho_{02}^2 - b_1^2 - b_2^2}{2 \cdot b_1 \cdot b_2};$$

$$q_1(t) = \alpha - \beta,$$

где: $\rho = \sqrt{x_{02}^2(t) + y_{02}^2(t)};$

$$\alpha = \arccos \frac{x_{02}(t)}{\rho};$$

$$\beta = \arccos \frac{b_2^2 - \rho^2 - b_1^2}{2 \cdot \rho \cdot b_1}.$$

Однако в этом случае может оказаться полезным и более общий подход, заключающийся в составлении уравнений, связывающих обобщенные и абсолютные координаты манипулятора, в частности такими уравнениями могут быть аналитические зависимости проекций характерных точек манипулятора.

Запишем уравнения проекций характерной точки A_2 схвата манипулятора на оси координат:

$$x_{02}(t) = b_1 \cdot \cos q_1 + b_2 \cdot \cos(q_1 + q_2);$$

$$y_{02}(t) = b_1 \cdot \sin q_1 + b_2 \cdot \sin(q_1 + q_2).$$

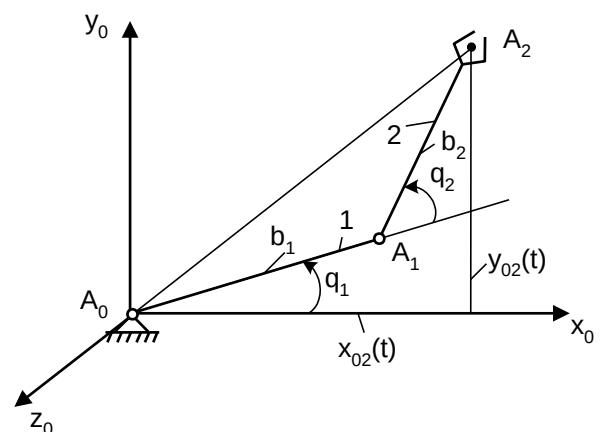


Рис. 8.5. Манипулятор с угловой (ангулярной) системой координат

Решая эту систему уравнений относительно q_1 и q_2 , можно определить требуемые законы движения по обобщенным координатам $q_1(t)$ и $q_2(t)$, уже в определенной степени абстрагируясь от конкретной схемы манипулятора.

Два последних примера показывают, что даже для простейших манипуляторов определение требуемых по заданной траектории движения схвата законов изменения обобщенных координат может представлять определенные трудности.

К настоящему времени прямого решения обратной задачи для манипуляторов общего вида не существует. В общем случае обратная задача кинематики манипуляторов решается алгоритмически, то есть численно.

Рассмотрим порядок решения обратной задачи с использованием методов нелинейного математического программирования, в частности одного из наиболее распространенных – градиентного метода.

Нелинейное математическое программирование имеет следующий алгоритм:

1. Составляется или определяется критериальная функция как функция некоторых свободных параметров (в данном случае – как функция обобщенных координат).

2. Составляется штрафная функция, выражающая дополнительные условия проектирования, и также зависящая от свободных параметров (от обобщенных координат).

3. Составляется целевая функция, в состав которой входят определенным образом критериальная и штрафная функции.

4. Выбирается метод нелинейного математического программирования и в соответствии с ним составляется алгоритм оптимизации критериальной функции как части целевой функции.

5. Разрабатывается расчетная программа, и производятся расчеты до выполнения определенных условий.

Изложим последовательность решения обратной задачи кинематики с использованием методов нелинейного математического программирования.

Вернемся к выражению $T_{0n} = T_{01} \cdot T_{12} \cdot \dots \cdot T_{i-1,i} \cdot \dots \cdot T_{n-1,n}$.

Каждая матрица $T_{i-1,i}$ является функцией одной обобщенной координаты q_i , которая в свою очередь, есть функция времени, то есть $T_{i-1,i} = T_{i-1,i}[q_i(t)]$.

Тогда матрица T_{0n} есть функция всех обобщенных координат и времени:

$$T_{0n}^Q = T_{0n}^Q(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n; t).$$

Следовательно, и каждый из шести наддиагональных элементов этой матрицы также является функцией всех обобщенных координат манипулятора

$$a_{jr}^Q = a_{jr}^Q(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n; t), \quad j=1, \dots, 3; \quad r=2, \dots, 4.$$

Пусть задан закон движения схвата, то есть заданы законы изменения его координат и углы ориентации:

$$\left. \begin{aligned} x_{0n} &= x_{0n}(t); & y_{0n} &= y_{0n}(t); & z_{0n} &= z_{0n}(t) \\ x_0 \wedge z_n &= f_1(t); & y_0 \wedge z_n &= f_2(t); & x_0 \wedge y_n &= f_3(t) \end{aligned} \right\}. \quad (8.1)$$

Тогда можно записать матрицу-задатчик положений и ориентации схвата.

$$T_{0n}^{\Pi} = \begin{vmatrix} a_{11}^{\Pi}(t) & a_{12}^{\Pi}(t) & a_{13}^{\Pi}(t) & a_{14}^{\Pi}(t) \\ a_{21}^{\Pi}(t) & a_{22}^{\Pi}(t) & a_{23}^{\Pi}(t) & a_{24}^{\Pi}(t) \\ a_{31}^{\Pi}(t) & a_{32}^{\Pi}(t) & a_{33}^{\Pi}(t) & a_{34}^{\Pi}(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (8.2)$$

где $a_{12}^{\Pi}(t) = \cos[x_0 \wedge y_n]$; $a_{13}^{\Pi}(t) = \cos[x_0 \wedge z_n]$; $a_{23}^{\Pi}(t) = \cos[y_0 \wedge z_n]$;

$$a_{14}^{\Pi}(t) = x_{0n}(t); \quad a_{24}^{\Pi}(t) = y_{0n}(t); \quad a_{34}^{\Pi}(t) = z_{0n}(t).$$

Положим, что в некоторый k -й момент времени t_k ($k = 0, \dots, K$) заданное положение схвата: $a_{12}^{\Pi,k}(t_k)$, $a_{13}^{\Pi,k}$, ..., $a_{34}^{\Pi,k}(t_k)$ совпадает с фактическим его положением, обеспечиваемым текущими значениями q_i^k обобщенных координат.

$$\text{Тогда } T_{0n}^{\Pi,k}(t_k) - T_{0n}^{Q,k}(q_1^k, \dots, q_n^k; t_k) = 0, \quad (8.3)$$

то есть $a_{12}^{\Pi,k}(t) - a_{12}^{Q,k} = 0$, $a_{13}^{\Pi,k}(t) - a_{13}^{Q,k} = 0$, ..., $a_{34}^{\Pi,k}(t) - a_{34}^{Q,k} = 0$.

В следующий $(k+1)$ -й момент времени t_{k+1} элементы $T_{0n}^{\Pi,k+1}(t_{k+1})$ матрицы – задатчика (8.2) примут новые значения $a_{12}^{\Pi,k+1}(t)$, $a_{13}^{\Pi,k+1}(t)$, ..., $a_{34}^{\Pi,k+1}(t)$, рассчитанные по зависимостям (8.1).

Подставив эти новые значения в матрицу $T_{0n}^{\Pi,k+1}$ выражения (8.3), получим

$$T_{0n}^{\Pi,k+1}(t_{k+1}) - T_{0n}^{Q,k}(q_1^k, \dots, q_n^k; t_k) \neq 0. \quad (8.4)$$

Неравенство матриц $T_{0n}^{\Pi,k+1}$ и $T_{0n}^{Q,k}$ объясняется тем, что обобщенные координаты в матрице $T_{0n}^{Q,k}$ остались теми же, что были в момент t_k .

Решение обратной задачи кинематики манипуляторов для общего случая заключается в том, чтобы определить численными методами, в частности методами нелинейного математического программирования, такие новые значения обобщен-

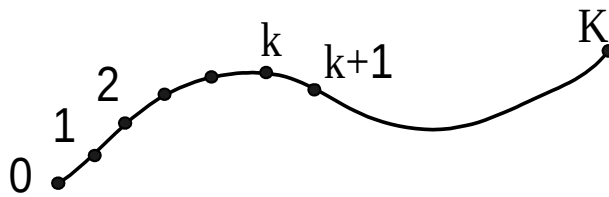


Рис. 8.6

ных координат, при которых бы неравенство (8.4) превратилось в равенство (8.3).

Значения обобщенных координат, при которых обеспечивается равенство матриц T_{0n}^{Π} и T_{0n}^Q , принимается за значения

q_i^{k+1} , соответствующие моменту времени t_{k+1} .

После этого $(k+1)$ -е положение принимается за k -е и задается очередное новое положение манипулятора, то есть в полученное равенство вновь вносится рас-
согласование, которое должно быть устранено после определения очередных значений обобщенных координат. Процесс продолжается, пока не будут определены значения обобщенных координат для всех требуемых K положений манипулятора на заданной траектории.

Сформируем критериальную функцию. Так как целью решения является поиск таких значений обобщенных координат, при которых разность между заданным положением схвата и его фактическим положением равнялась нулю, то в качестве критерия следует принять параметр, отражающий эту разность. Например:

$$\Delta = [a_{12}^{k+1}(t) - a_{12}(q_1^m, \dots, q_n^m)]^2 + [a_{13}^{k+1}(t) - a_{13}(q_1^m, \dots, q_n^m)]^2 + [a_{14}^{k+1}(t) - a_{14}(q_1^m, \dots, q_n^m)]^2 + [a_{23}^{k+1}(t) - a_{23}(q_1^m, \dots, q_n^m)]^2 + [a_{24}^{k+1}(t) - a_{24}(q_1^m, \dots, q_n^m)]^2 + [a_{34}^{k+1}(t) - a_{34}(q_1^m, \dots, q_n^m)]^2.$$

Здесь, q_i^m значение i -й обобщенной координаты на шаге m вычислительного

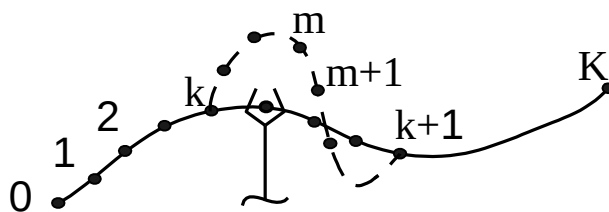


Рис. 8.7. Гипотетическая траектория вычислительного процесса (штриховая линия)

процесса (рис. 8.7) в ходе поиска новых значений обобщенных координат; индекс Π , здесь и в дальнейшем, опускается. Возможная траектория вычислительного процесса (штриховая линия) представлена на рисунке 8.7.

Обобщенные координаты не могут принимать совершенно произволь-

ные значения, так как перемещение по каждой степени подвижности может быть только в определенных границах (рис. 8.8): $q_i^{\min} \leq q_i \leq q_i^{\max}$ ($i=1, \dots, n$).

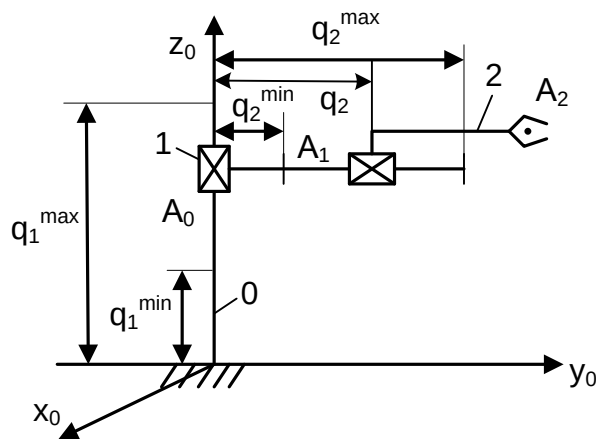


Рис. 8.8. Ограничения на движения манипулятора по обобщенным координатам

В связи с этим для автоматического выполнения возможного диапазона изменений обобщенных координат вводятся штрафные функции в виде следующих ограничений на значения q_i :

$$F_i^1 = \begin{cases} 0, & \text{если } q_i - q_i^{\min} \geq 0; \\ W_i^1(q_i^{\min} - q_i), & \text{если } q_i - q_i^{\min} < 0, \end{cases}$$

$$F_i^2 = \begin{cases} 0, & \text{если } q_i^{\max} - q_i \geq 0; \\ W_i^2(q_i - q_i^{\max}), & \text{если } q_i^{\max} - q_i < 0, \end{cases}$$

где W_i^1 , W_i^2 – весовые коэффициенты штрафных функций, которыми можно регулировать их крутизну. Кроме указанных могут быть и другие ограничения.

В качестве целевой функции можно использовать функцию, являющуюся суммой критериальной и частных штрафных функций:

$$K(q_1, \dots, q_n) = \Delta + \sum_{i=1}^{i=n} F_i^1 + \sum_{i=1}^{i=n} F_i^2.$$

Примем в качестве метода поиска новых значений обобщенных координат q_i градиентный метод, выражающийся следующей зависимостью:

$$q_i^{m+1} = q_i^m - h_i \cdot \frac{\Delta(q_1^m, \dots, q_i^m + \Delta q_i, \dots, q_n^m) - \Delta(q_1^m, \dots, q_i^m, \dots, q_n^m)}{\Delta q_i}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (8.5)$$

где h_i – шаг по i -й обобщенной координате; Δq_i – малое приращение i -й обобщенной координаты, используемое при определении частной производной по q_i .

Важно отметить, что в качестве первого приближения q_i^m ($m = 1$) используется старое значение q_i^k , то есть в начальный момент полагают $q_i^1 = q_i^k$.

Вычислительный процесс приближения к значениям q_i^{k+1} может быть прекращен по любому используемому в нелинейном программировании признаку. В частности, его можно закончить по условию $|q_i^{m+1} - q_i^m| \leq [\delta_i]$, здесь δ_i – допускаемая по точности воспроизведения траектории величина отклонений i -й обобщенной координаты.

Учитывая характер функции (8.5), в качестве окончательного следует принять значение

$$q_i^{k+1} = 0,5 \cdot (q_i^{m+1} + q_i^m).$$

Отметим, что $(m+1)$ -й шаг к $(k+1)$ -й точке в процессе вычислений может осуществляться по различным алгоритмам, свойственным методам нелинейного программирования. При использовании собственно градиентного метода $(m+1)$ -й шаг должен осуществляться одновременно по всем координатам после определения направления движения по антиградиенту.

Полученные значения q_i^{k+1} обобщенных координат соотносятся с моментом времени t_{k+1} и запоминаются. После этого в целевую функцию Δ вместо значений $a_{12}^{k+1}, \dots, a_{34}^{k+1}$ подставляются значения наддиагональных элементов, соответствующие моменту времени t_{k+2} , которые и принимаются за $a_{12}^{k+1}, \dots, a_{34}^{k+1}$. Затем вновь запускается вычислительный процесс, который заканчивается, когда будут определены значения обобщенных координат для всех назначенных реперных точек k , $k=0, \dots, K$. В результате получается таблица значений обобщенных координат q_i^k ($i=1, \dots, n$); ($k=0, \dots, K$), которую можно трактовать как функции $q_i = q_i(x_{0n}, y_{0n}, z_{0n}, x_0 \wedge z_n, y_0 \wedge z_n, x_0 \wedge y_n; t)$, являющиеся решением обратной задачи кинематики манипулятора и представленные в табличном виде.

№	t	q_1	q_2	...	q_i	...	q_{n-1}	q_n
0	t_0	q_1^0	q_2^0	...	q_i^0	...	q_{n-1}^0	q_n^0
1	t_1	q_1^1	q_2^1	...	q_i^1	...	q_{n-1}^1	q_n^1
2	t_2	q_1^2	q_2^2	...	q_i^2	...	q_{n-1}^2	q_n^2
...	...	...	...	...	...	...	...	...
k	t_k	q_1^k	q_2^k	...	q_i^k	...	q_{n-1}^k	q_n^k

...	...	...	...	...	...	...	...	...
K	T	q_1^K	q_2^K	...	q_i^K	...	q_{n-1}^K	q_n^K

При выборе количества точек на заданной траектории возникает следующее противоречие: для более точного воспроизведения траектории желательно назначать как можно больше реперных точек, но это потребует и большего машинного времени для решения обратной задачи. При редком задании точек схват может отклоняться от заданной траектории на недопустимую величину.

Таким образом, *время, через которое следует назначать опорные точки, есть функция требуемой точности воспроизведения траектории.*

После определения в табличном виде функций $q_i = q_i(t)$ можно численно их продифференцировать и найти обобщенные скорости и ускорения, возникающие в каждой степени подвижности при реализации заданной траектории движения схвата.

Будем использовать для этого центральную разность.

$$\text{Тогда: } \dot{q}_i^k = \frac{q_i^{k+1} - q_i^{k-1}}{2 \cdot \Delta t}; \quad \ddot{q}_i^k = \frac{q_i^{k+1} - 2 \cdot q_i^k + q_i^{k-1}}{\Delta t^2}.$$

Таким образом, будут получены функции $\dot{q}_i^k$, $\ddot{q}_i^k$ также в табличном виде. Чтобы формировать управляющее воздействие в виде непрерывных функций, а не табличных, целесообразно аппроксимировать табличные значения обобщенных координат, скоростей и ускорений. Для этого можно воспользоваться, например, интерполяционной формулой Лагранжа:

$$q_i(t) = q_i^0 \cdot \frac{(t-t_1) \cdot (t-t_2) \cdot \dots \cdot (t-t_K)}{(t_0-t_1) \cdot (t_0-t_2) \cdot \dots \cdot (t_0-t_K)} + q_i^1 \cdot \frac{(t-t_0) \cdot (t-t_2) \cdot \dots \cdot (t-t_K)}{(t_1-t_0) \cdot (t_1-t_2) \cdot \dots \cdot (t_1-t_K)} + \\ + q_i^2 \cdot \frac{(t-t_0) \cdot (t-t_1) \cdot \dots \cdot (t-t_K)}{(t_2-t_0) \cdot (t_2-t_1) \cdot \dots \cdot (t_2-t_K)} + \dots + q_i^K \cdot \frac{(t-t_0) \cdot (t-t_1) \cdot \dots \cdot (t-t_{K-1})}{(t_K-t_0) \cdot (t_K-t_1) \cdot \dots \cdot (t_K-t_{K-1})}.$$

В результате будет получена непрерывная функция $q_i(t)$, которая в фиксированные моменты времени k гарантированно проходит через точки q_i^k .

Пример. Пусть при $t_0 = 0$ с; $t_1 = 2$ с; $t_2 = 4$ с соответственно: $q_3^0 = 50$ мм; $q_3^1 = 60$ мм; $q_3^2 = 40$ мм; $\Delta t = 2$ с.

Тогда:

$$\begin{aligned}
 q_3(t) &= 50_{\text{мм}} \frac{(t-2) \cdot (t-4)c^2}{(0-2) \cdot (0-4)c^2} + 60_{\text{мм}} \frac{(t-0) \cdot (t-4)c^2}{(2-0) \cdot (2-4)c^2} + 40_{\text{мм}} \frac{(t-0) \cdot (t-2)c^2}{(4-0) \cdot (4-2)c^2} = \\
 &= \frac{50_{\text{мм}}}{8c^2} (t_2 - 2 \cdot t - 4 \cdot t + 8)c^2 - \frac{60_{\text{мм}}}{4c^2} (t_2 - 0 \cdot t - 4 \cdot t + 0 \cdot 4)c^2 + \\
 &+ \frac{40_{\text{мм}}}{8c^2} (t_2 - 0 \cdot t - 2 \cdot t + 0 \cdot 2)c^2 = \left(\frac{50}{8} - \frac{60}{4} - \frac{40}{8} \right) \cdot t^2 + \left(-\frac{300}{8} + 60 - 10 \right) \cdot t + 50.
 \end{aligned}$$

Окончательно: $q_3(t) = (-3,75t^2 + 12,5t + 50)_{\text{мм}}$.

2. Решение обратной задачи кинематики манипуляторов на основе линейной зависимости между абсолютными и обобщенными скоростями (управление по скорости)

Как известно, положение схвата манипулятора однозначно определяется его обобщенными координатами, а именно:

$$X = X(Q), \quad (8.6)$$

где: $X = [x(t), y(t), z(t), \alpha(t), \beta(t), \gamma(t)]$ – вектор абсолютных координат схвата;

$Q = [q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t)]$ – вектор обобщенных координат манипулятора;

n – число степеней подвижности манипулятора.

Дифференцируя (8.6) по времени, получим

$$\dot{X} = J(Q)\dot{Q}, \quad (8.7)$$

где $J(Q)$ – матрица Якоби размерностью $6 \times n$ для преобразования (8.7).

В терминах рассматриваемой нами обратной задачи кинематики манипуляционных систем матрица Якоби (размерностью $6 \times n$) имеет вид:

$$J(Q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial x}{\partial q_n} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial y}{\partial q_n} \\ \frac{\partial z}{\partial q_1} & \frac{\partial z}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial z}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial q_1} & \frac{\partial \alpha}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial \alpha}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \beta}{\partial q_1} & \frac{\partial \beta}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial \beta}{\partial q_n} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial q_1} & \frac{\partial \gamma}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial \gamma}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

Зависимость (8.7) более подробно можно представить следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d\gamma}{dt} \end{bmatrix} = J(Q) \begin{bmatrix} \frac{dq_1}{dt} \\ \frac{dq_2}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dq_n}{dt} \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

Зависимости (8.7) и (8.8) показывают, что между абсолютными скоростями $\dot{X}$ и обобщенными скоростями $\dot{Q}$ существует линейная связь, однако коэффициенты в этой линейной связи переменные, так как элементы матрицы Якоби $\frac{\partial x}{\partial q_1}, \frac{\partial x}{\partial q_2}, \dots, \frac{\partial \gamma}{\partial q_{n-1}}, \frac{\partial \gamma}{\partial q_n}$, которые образуют эти коэффициенты в различных сочетаниях, есть величины переменные.

Выражение (8.7) представляет собой прямую скоростную задачу и её решение при известных (заданных) функциях $\partial q_1(t), \partial q_2(t), \dots, \partial q_n(t)$ не представляет собой принципиальных трудностей.

Решим зависимость (8.7) относительно обобщенных скоростей $\dot{Q}$, а именно:

$$\dot{Q} = J^{-1}(Q)\dot{X} \quad (8.9)$$

Эта зависимость и есть решение обратной задачи по скорости, которая часто используется для управления манипуляционным роботом в режиме on-line.

При этом вектор обобщенных координат Q является неизвестным и значения $q_1, q_2, \dots, q_n$ приходится для данного момента времени (рассчитываемого момента реального времени) брать с датчиков обратной связи, фиксирующих текущее положение i -го звена относительно $(i-1)$ -го, то есть значение q_i .

В выражении (8.9) $J^{-1}(Q)$ есть обратная матрица по отношению к матрице Якоби $J(Q)$.

Рассмотрим более подробно последовательность решения прямой и обратной скоростных задач на примере простого манипулятора с двумя степенями подвижности (рис. 8.9).

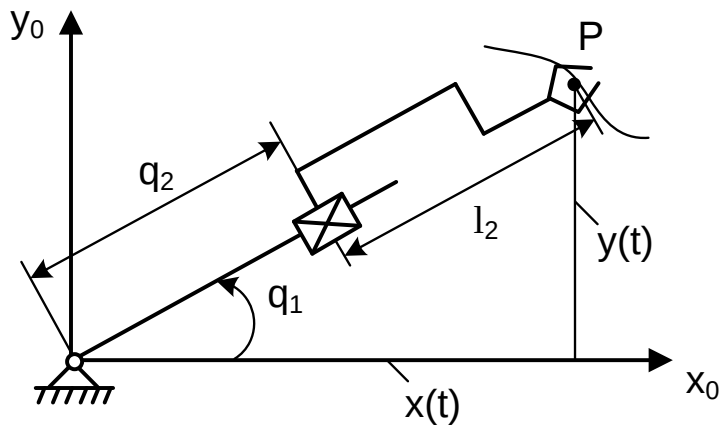


Рис. 8.9. Манипулятор с двумя степенями подвижности

Прямая задача о положении:

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= (l_2 + q_2) \cos q_1; \\ y(t) &= (l_2 + q_2) \sin q_1. \end{aligned} \right\} (8.10)$$

При этом: $q_1 = q_1(t)$, $q_2 = q_2(t)$.

Обратная задача о положении:

$$q_1(t) = \arctan \frac{y(t)}{x(t)}, \quad q_2(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} - l_2. \quad (8.11)$$

Даже для столь простого манипулятора решение обратной задачи представляет собой нелинейные зависимости.

Для более сложных манипуляторов, как правило, найти зависимость $Q = Q(X)$ в явном виде не представляется возможным.

Однако зависимость $Q = Q[X(t)]$ необходима для управления манипуляционным роботом, так как требуемое движение схвата обеспечивается соответствующими движениями звеньев манипулятора по обобщенным координатам: $q_i = q_i(t)$ $i = 1, \dots, n$.

В то же время, как было указано раньше (см. зависимость (8.9)), между обобщенными скоростями $\dot{q}_i$ и абсолютными скоростями $\dot{x}_i; \dot{y}_i; \dot{z}_i; \dot{\alpha}_i; \dot{\beta}_i; \dot{\gamma}_i$ существует линейная связь с переменными коэффициентами. Именно поэтому часто и переходят к управлению по скоростям.

Получим требуемые зависимости между обобщенными и абсолютными скоростями для рассматриваемого нами двухзвенного манипулятора, используя общий подход, не прибегая пока к обратной матрице Якоби.

Пример решается с целью продемонстрировать порядок получения аналитических зависимостей для управления по скоростям, считая это решение обратной задачи в явном виде (подобно выражениям (8.11)) невозможным или нецелесообразным из-за сложности.

Поэтому начнём решение с дифференцирования формул (8.10) по времени

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -(l_2 + q_2) \sin q_1 \frac{dq_1}{dt} + \cos q_1 \frac{dq_2}{dt} \\ \frac{dy}{dt} &= (l_2 + q_2) \cos q_1 \frac{dq_1}{dt} + \sin q_1 \frac{dq_2}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (8.12)$$

Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} = \dot{x}; \quad \frac{dy}{dt} = \dot{y}; \quad \frac{dq_1}{dt} = \dot{q}_1; \quad \frac{dq_2}{dt} = \dot{q}_2; \\ a_{11} = -(l_2 + q_2) \sin q_1; \quad a_{12} = \cos q_1 \\ a_{21} = (l_2 + q_2) \cos q_1; \quad a_{22} = \sin q_1 \end{aligned} \right\} \quad (8.13)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a_{11}\dot{q}_1 + a_{12}\dot{q}_2; \\ \dot{y} &= a_{21}\dot{q}_1 + a_{22}\dot{q}_2. \end{aligned} \quad (8.14)$$

Решим полученные зависимости (8.13), (8.14) относительно обобщенных скоростей $\dot{q}_1$ и $\dot{q}_2$. Получим вначале явную зависимость от $\dot{x}(t)$ и $\dot{y}(t)$ для обобщенной скорости $\dot{q}_1$. Для этого умножим первую из зависимостей (8.14) на a_{22} , а вторую на a_{12} :

$$\begin{aligned} a_{12}a_{22}\dot{q}_1 + a_{12}a_{22}\dot{q}_2 &= \dot{x}a_{22}; \\ a_{21}a_{12}\dot{q}_1 + a_{22}a_{12}\dot{q}_2 &= \dot{y}a_{12}. \end{aligned}$$

Вычтем из первого выражения второе: $(a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12})\dot{q}_1 = \dot{x}a_{22} - \dot{y}a_{12}$, и следовательно:

$$\dot{q}_1(t) = \frac{a_{22}}{a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}} \dot{x} - \frac{a_{12}}{a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}} \dot{y}. \quad (8.15)$$

Для получения явной зависимости относительно $\dot{q}_2(t)$ умножим первое из выражений (8.14) на a_{21} , а второе на a_{11} . Тогда:

$$\begin{aligned} a_{11}a_{21}\dot{q}_1 + a_{12}a_{21}\dot{q}_2 &= \dot{x}a_{21}; \\ a_{21}a_{11}\dot{q}_1 + a_{22}a_{11}\dot{q}_2 &= \dot{y}a_{11}. \end{aligned}$$

Вычитая из первого выражения второе, получим $(a_{12}a_{21} - a_{22}a_{11})\dot{q}_2 = \dot{x}a_{21} - \dot{y}a_{11}$.

Откуда

$$\dot{q}_2(t) = \frac{a_{21}}{a_{12}a_{21} - a_{22}a_{11}} \dot{x} - \frac{a_{11}}{a_{12}a_{21} - a_{22}a_{11}} \dot{y}. \quad (8.16)$$

Упростим выражения (8.15) и (8.16). Вначале упростим знаменатель дроби перед $\dot{x}$ и $\dot{y}$, учитывая выражения (8.13),

$$(a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12}) = -(l_2 + q_2) \sin q_1 \sin q_1 - (l_2 + q_2) \cos q_1 \cos q_1 = -(l_2 + q_2).$$

Теперь выражения (8.15) и (8.16) можно записать в окончательном виде:

$$\begin{aligned} \dot{q}_1(t) &= -\frac{\sin q_1(t)}{l_2 + q_2} \dot{x}(t) + \frac{\cos q_1(t)}{l_2 + q_2} \dot{y}(t); \\ \dot{q}_2(t) &= \cos q_1(t) \dot{x}(t) + \sin q_1(t) \dot{y}(t). \end{aligned}$$

Или компактнее

$$\begin{aligned} \dot{q}_1(t) &= -\frac{\sin q_1}{l_2 + q_2} \dot{x} + \frac{\cos q_1}{l_2 + q_2} \dot{y}; \\ \dot{q}_2(t) &= \cos q_1 \dot{x} + \sin q_1 \dot{y}. \end{aligned} \quad (8.17)$$

В матричной форме выражения (8.17) имеют вид

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sin q_1}{l_2 + q_2} & \frac{\cos q_1}{l_2 + q_2} \\ \cos q_1 & \sin q_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}. \quad (8.18)$$

Что и требовалось получить.

Выражения для обобщенных скоростей в форме (8.17) и (8.18) выше получены обычным путем алгебраических преобразований. Для сложных манипуляторных систем такой подход будет связан с громоздкими преобразованиями.

Для решения рассматриваемой задачи имеется более рациональный подход с использованием обратной матрицы Якоби.

Представим производные (8.12) и (8.14) по времени в виде выражений:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= -(l_2 + q_2) \sin q_1 \cdot \dot{q}_1 + \cos q_1 \cdot \dot{q}_2; \\ \dot{y}(t) &= (l_2 + q_2) \cos q_1 \cdot \dot{q}_1 + \sin q_1 \cdot \dot{q}_2, \end{aligned}$$

или в форме матриц:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(l_2 + q_2) \sin q_1 & \cos q_1 \\ (l_2 + q_2) \cos q_1 & \sin q_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (8.19)$$

Матрица, являющаяся первым сомножителем в правой части выражения (8.19), есть матрица Якоби.

Следовательно, выражение (8.19) можно записать в виде

$$\dot{X} = J(Q)\dot{Q}. \quad (8.20)$$

Убедимся, что первый сомножитель в правой части выражения (8.20) есть матрица Якоби для рассматриваемого манипулятора.

Действительно, беря частные производные по q_1 и q_2 от правой части зависимости (8.10), получим

$$J(Q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial q_1} & \frac{\partial x}{\partial q_2} \\ \frac{\partial y}{\partial q_1} & \frac{\partial y}{\partial q_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(l_2 + q_2) \sin q_1 & \cos q_1 \\ (l_2 + q_2) \cos q_1 & \sin q_1 \end{bmatrix}.$$

Данное выражение полностью совпадает с соответствующей матрицей выражения (8.19).

Получим обратную матрицу Якоби в следующей последовательности:

1. Матрица алгебраических дополнений исходной матрицы Якоби:

$$J_D = \begin{bmatrix} \sin q_1 & -(l_2 + q_2) \cos q_1 \\ -\cos q_1 & -(l_2 + q_2) \sin q_1 \end{bmatrix}.$$

2. Присоединенная матрица – транспонированная матрица алгебраических дополнений:

$$J_p = \begin{bmatrix} \sin q_1 & -\cos q_1 \\ -(l_2 + q_2) \cos q_1 & -(l_2 + q_2) \sin q_1 \end{bmatrix}.$$

3. Определитель исходной матрицы Якоби – Якобиан:

$$\det J(q) = \Delta = -(l_2 + q_2) \sin q_1 \sin q_1 - (l_2 + q_2) \cos q_1 \cos q_1 = -(l_2 + q_2).$$

4. Обратная матрица Якоби

$$J^{-1}(Q) = \frac{J_p}{\Delta} = \begin{bmatrix} -\frac{\sin q_1}{l_2 + q_2} & \frac{\cos q_1}{l_2 + q_2} \\ \cos q_1 & \sin q_1 \end{bmatrix}.$$

Как видно, полученное выражение полностью совпадает с первым сомножителем правой части зависимости (8.18) и, следовательно, выражение (8.9) полностью обосновано для рассмотренного примера.

Лекция

Тема 3.2.1. Построение расчетных математических моделей роботов вертикального перемещения

ВОПРОСЫ

1. Введение.
2. Общая схема и алгоритм функционирования.
3. Условия равновесия работа на поверхности.
4. Определение грузоподъемности робота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Градецкий В.Г., Рачков М.Ю. Роботы вертикального перемещения. М.: Тип. МО РФ. 1997, 223 с. (с. 5-37).

1. Введение

Мобильные роботы в настоящее время используются в промышленности и в средах, недоступных или опасных для человека, например, в космическом пространстве, под водой, а также в условиях высокой температуры и радиации. Одним из относительно новых направлений в развитии мобильных роботов является создание технологических роботов вертикального перемещения (ТРВП). Эти роботы способны выполнять технологические операции на поверхностях с произвольным углом наклона .

Последние несколько лет в развитых странах мира, таких как Япония, США, Англия и Германия, а также в России ведутся интенсивные исследования, направленные на создание дистанционно-управляемых ТРВП, которые могут перемещаться по горизонтальным, наклонным или вертикальным поверхностям. Такие роботы способны преодолевать или обходить препятствия, встречающиеся на пути их следования, выходить в необходимую начальную позицию, подготовиться к выполнению требуемых технологических операций и осуществить их выполнение.

Необходимость создания ТРВП и робототехнических комплексов на их базе определяется возникающими экстремальными ситуациями, возросшими требованиями к выполнению технологических операций и условиями, в которых человеку опасно находиться или сложно выполнять действия самому.

Экстремальные условия и среды могут отличаться повышенной радиоактивностью, высокими температурами, загазованностью и т. п. Например, необходимо выполнять дезактивацию помещений, включая стены и потолки, производить аварийные и профилактические работы на атомных электростанциях, выполнять противопожарные операции, осуществлять строительно-монтажные, покрасочные работы на высоте при строительстве различных сооружений, проведении ремонтных работ на корпусах судов в доках и многое другое.

Приводные системы ТРВП могут быть как электромеханическими, пневматическими или пневмоэлектрическими, причем последние имеют предпочтение из-за высокого коэффициента отношения развиваемой мощности к собственному весу, что особенно важно для систем ТРВП, где вес робота является одним из основных ограничений.

В качестве захватных устройств для сцепления с вертикальными поверхностями могут использоваться вакуумные устройства универсального применения, не зависящие от материала поверхности, а также управляемые магнитные захватные устройства, предназначенные для фиксации роботов на поверхностях из ферромагнитных материалов.

Создание роботов для экстремальных сред предусматривается японскими и американскими национальными программами по робототехнике, а также европейскими, в частности INTAS «MORES». Актуальность и важность применения ТРВП для различных целей послужила основой для создания в 1996 году международного координационного центра по роботам вертикального перемещения CLAWAR на базе Портсмутского университета (Великобритания).

Экономическая эффективность использования ТРВП достигается за счет выполнения работ на больших высотах без специальных строительных лесов, навесов и других приспособлений, а также за счет экономии времени при выполнении операций. Однако, сохранение здоровья и жизни людей при использовании ТРВП имеет приоритетное значение.

Существенные результаты с промышленным применением роботов вертикального перемещения достигли такие зарубежные фирмы, как «Токио Газ Лимитед», «Хитачи» (Япония), «Интернейшинл роботик технолоджи» (США), Портсмутский университет (Великобритания) и другие.

Как показала проведенная в сентябре 1990г. в г. Глазго (Великобритания) Первая Международная Олимпиада роботов, достижения нашей страны в данной области находятся на уровне, соответствующем мировым образцам - два робота вертикального перемещения Института проблем механики РАН получили медали этой Олимпиады. В Институте проблем механики РАН в рамках Государственной Научно - Технической Программы (ГНТП) "Технологии машины и производства будущего" (раздел "Машины новых поколений") в течение последних лет решается задача создания мобильных робототехнических комплексов вертикального перемещения.

Создание таких комплексов связано с выполнением фундаментальных исследований в области механики и машиностроения, с необходимостью разработки механической конструкции, систем управления и приводных систем, методов динамического управления движением с учетом статических и переменных внешних воздействий, которые возникают в результате изменения ориентации корпуса ТРВГ1 или работы технологического оборудования, установленного на борту. Дальнейшее развитие этого нового направления в робототехнике потребовало выполнения исследований, направленных на повышение мобильности и маневренности роботов, улучшение их интеллектуальных свойств, расширение технологических возможностей и областей эффективного использования.

Повышение интеллектуальных качеств мобильных роботов достигается постановкой соответствующих датчиков (локационных, тактильных, технического зрения и др.), организацией обратных связей, разработкой специальных алгоритмов движения, анализа сцен, накопления баз данных о внешней среде и автоматического принятия решений.

Японской фирмой "Хитачи" совместно с лабораторией механики научного центра в г. Цукуба разработаны два варианта ТРВП:

- 1) робот с магнитными устройствами фиксации для движения по вертикальным поверхностям из ферромагнитных материалов (корпуса судов, хранилища нефтепродуктов, корпуса ядерных реакторов). Робот имеет следующие характеристики: собственный вес 20 кгс; грузоподъемность 12 кг; скорость перемещения 1,1 м/мин.

Данный робот предполагается использовать для проведения таких работ как очистка, покраска и ремонт;

2) робот с устройствами фиксации вакуумного типа для движения по неметаллическим и металлическим поверхностям, предназначенный для контрольно-измерительных и инспекционных операций.

Японской фирмой "Токио Газ Лимитед" совместно с фирмой "Хитачи" разработан диагностический робот для технической диагностики методом ультразвуковой дефектоскопии сварных швов сферических газовых резервуаров. Данный ТРВП имеет автономное управление и следующие параметры: собственный вес 140 кгс; грузоподъемность до 60 кг; диаметр 1800 мм; высота 650 мм; скорость поступательного движения 0,9 м/мин, скорость вращательного движения 1,8 рад/мин; количество захватов на каждой из платформ равно восьми. Этот робот имеет повышенный вес приводной системы. Для сочетания мощности, надежности и возможности регулирования скорости при относительно небольших габаритах и массе необходимо разработать комбинированный привод ТРВП, позволяющий с помощью малых мощностей управлять силовыми элементами привода. При этом широкий диапазон регулирования скорости позволит использовать один привод как для транспортных, так и для технологических движений робота, что приведет к повышению его производительности.

Английской фирмой "Секьюрити" разработан ТРВП с управляемыми магнитными захватами, предназначенными для чистки корпусов судов и их окраски. Ограниченность функциональных возможностей этого робота определяется использованием педипуляторов, не способных адаптироваться к неровностям поверхности перемещения. В связи с этим актуальным является создание адаптивных схем вакуумных педипуляторов транспортной системы приводов ТРВП (СП ТРВП), а именно, механической адаптации к неровностям поверхности перемещения ТРВП и пневматической адаптации для обеспечения постоянства величины усилия со стороны ВП при наличии неплотностей под захватом. Разработка комбинированных конструкций ВП расширит их функциональные возможности и повысит надежность захвата.

Портсмутский политехник (Великобритания) разработал ТРВП с антропоморфными педипуляторами. Данный робот имеет развитую систему управления, но невысокие устойчивость и быстродействие, а также низкую точность позиционирования из-за упругой податливости в исполнительных звеньях привода. Для повышения надежности функционирования ТРВП в целом необходимо провести анализ

устойчивости СП ТРВП на основе измерения линейных и угловых скоростей его элементов, а также действующих сил и моментов. Требуется получить условия максимальной устойчивости робота с учетом конкретных параметров СП ТРВП. В области систем управления приводами роботов такого типа надо разработать структуры, позволяющие оптимизировать режимы работы СП ТРВП по положению и по быстродействию. При этом, в ряде случаев важно учитывать влияние упругой податливости в исполнительном звене привода при выводе оптимального закона управления для сохранения точности позиционирования, а также влияние величины максимально допустимого тока привода, что повышает надежность функционирования робота при любых режимах работы, вызывающих повышение потребляемого тока, без перегрузки двигателя привода. Важным является также определение условий равновесия робота на поверхности, обеспечивающих отсутствие отрыва и проскальзывания захватов.

Одним из новых перспективных применений ТРВП является его использование для подводных работ. Подводные ТРВП дают возможность значительно повысить эффективность работ в реакторах АЭС, в частности для инспекции, ремонта, а также контактного дугового сверления и резки стальных конструкций. Кроме того, подводные ТРВП имеют широкую область применения в соответствующих строительных и спасательных операциях.

Одна из первых попыток создания ТРВП для подводных операций была предпринята в Гданьском Университете. Вес робота превышает 200 кгс, и из-за малых рабочих усилий системы приводов его работоспособность крайне ограничена. Разработка методов расчета силовых элементов СП ТРВП позволит упростить определение усилий рабочих пневмоцилиндров системы. В частности, построение расчетных диаграмм для определения расхода воздуха ТРВП как функции длины хода для различных диаметров цилиндров и давлений питания системы, получение отношения между тангенциальной и нормальной силами захвата в зависимости от разницы давлений для различных материалов рабочих поверхностей, а также при разных плечах приложения сил отрыва, даст возможность эффективного проектирования транспортной СП ТРВП и систем захвата. Получение характеристик зависимости коэффициента трения захвата в функции давления при разных шероховатости поверхности и материалах захватов, зависимости уровня вакуума в СП ТРВП от типа поверхности перемещения и от формы и высоты неровностей под захватом позволят учесть их влияние и, тем самым, повысить надежность функционирования робота.

Главным недостатком всех перечисленных конструкций является низкий коэффициент отношения грузоподъемности робота к собственному весу, а также невозможность перемещения по неровным поверхностям с сохранением высокой грузоподъемности.

Одной из важнейших частей в составе ТРВП является система приводов, которая осуществляет перемещение ТРВП по поверхности, фиксацию, ориентацию, а также перемещение технологического оборудования во время выполнения рабочих операций. Приводам роботов посвящены многочисленные исследования, в частности, преимущества использования пневматических систем в приводах, их расчет и динамика рассмотрены в [55-60]. Однако, СП ТРВП имеет ряд существенных особенностей, связанных со спецификой функционирования на вертикальных поверхностях.

Разработка усовершенствованных структур и методов расчета рабочих режимов систем приводов ТРВП является решающим фактором повышения производительности роботов при выполнении ими технологических операций.

Анализ характеристик существующих ТРВП позволяет сделать вывод о необходимости совершенствования приводных систем с целью повышения коэффициента отношения грузоподъемности робота к собственному весу, а также для обеспечения возможности перемещения по неровным поверхностям с сохранением высокой грузоподъемности. Разработка систем приводов с указанными свойствами приводит к расширению функциональных возможностей ТРВП.

Принципиальную важность в СП ТРВП имеют системы безопасности, которые обеспечивают возможность устранения сбоя в процессе движения робота или транспортировку робота в начальное положение с места нахождения робота во время отказа одной из систем. В известной литературе не определены взаимосвязи между условиями выполнения технологической операции и методом, обеспечивающим безопасность ТРВП. В связи с этим целесообразно разработать общий подход к созданию систем безопасности ТРВП.

Представляет большой практический интерес разработка вариантов ТРВП для операций очистки стеклянных, металлических и бетонных поверхностей, а также применение ТРВП в составе робототехнического комплекса дезактивации с перемещением технологического оборудования по выбранной траектории, в частности, в условиях неопределенности внешней ситуации при аварийных работах.

Производительность выполнения операций дезактивации и очистки может быть повышена за счет совмещения приводных систем захвата и технологического инструмента.

Не разработаны СП ТРВП для выполнения таких трудоемких операций, как сверление, монтаж дюбелей и других, требующих повышенных технологических усилий. Одним из вариантов выполнения инспекции, покраски, сверления, монтажа дюбелей, очистки, шлифовки и других операций является использование универсального ТРВП со сменными технологическими модулями. В связи с этим, ТРВП могут найти свое место в гибких автоматизированных производствах, особенно при обработке поверхностей большой площади.

Создание ТРВП для проведения противопожарных операций путем автоматического вырезания отверстий в стенках горящих резервуаров с целью введения средств тушения в область открытого огня позволит исключить использование людей в такой экстремально опасной для жизни ситуации. Система приводов в этом случае должна выдерживать работу в условиях высоких температур.

Повышение мобильности и маневренности может достигаться за счет обеспечения перехода роботов при движении с пола на стены, со стены на потолок и т.д. Эта проблема весьма сложна, и в настоящее время имеются определенные достижения, требующие, однако, своего дальнейшего развития. Одним из методов, обеспечивающих необходимое повышение мобильности, является установка робота вертикального перемещения на мобильном роботе-носителе, способном передвигаться по горизонтальным поверхностям. Присоединение робота вертикального перемещения к вертикальным поверхностям осуществляется в автоматическом режиме по соответствующим командам управления.

Измерительно-информационные системы роботов включают сенсорные устройства ближней и дальней локализации и ориентации вблизи поверхностей, препятствий и других объектов внешней среды, что направлено на выполнение некоторых задач интеллектуального поведения, например таких как автоматическое принятие решений о дальнейшем движении при обходе или преодолении препятствий на основе анализа ситуаций.

В последнее время большое внимание в разных странах уделяется созданию автономных робототехнических систем, способных перемещаться в сложной обстановке при наличии препятствий. При этом организация перемещения по вертикальным и наклонным поверхностям с надежной фиксацией на этих поверхностях пред-

ставляет собой одну из фундаментальных технических задач, так как такие поверхности являются важнейшей составной частью различных сооружений. Движение по подобным поверхностям требует от робота обеспечения значительных усилий сцепления, которые должны быстро и надежно регулироваться системой управления. В этом плане очень важным направлением работ является усовершенствование захватных устройств, в частности, вакуумных. Для движения по поверхностям сложной конфигурации, включающим горизонтальные и вертикальные участки, большое значение приобретает создание комбинированных мобильных систем, содержащих модули вертикального и горизонтального перемещений с узлами их сопряжения. Разнообразие возможных мобильных систем обуславливается как большим различием поверхностей движения, так и многообразием технологических задач, требующих специфического оборудования. Сочетание этого оборудования, а также необходимых сенсорных устройств с транспортной мобильной системой также представляет серьезную проблему. В свете изложенного, создание мобильных роботов, способных перемещаться по вертикальным и более сложным поверхностям, является фундаментальной механической проблемой, имеющей разнообразные приложения.

Развитие научного направления по созданию мобильных комбинированных роботов вертикального и горизонтального перемещения с развитой сенсорной системой обеспечивает дополнительные свойства, связанные с автоматическим принятием решений о дальнейшем движении в неполностью детерминированных средах и экстремальных ситуациях. В этих случаях мобильные сложные робототехнические системы обладают элементами искусственного интеллекта. Поэтому супервизорное управление, которое применяется в настоящее время, по мере развития сенсорной системы робота будет постепенно заменяться более сложным управлением, обеспечивающим решение поставленных задач в изменяющихся или в экстремальных условиях.

Принципиально реализация механического перемещения транспортного модуля по вертикальной поверхности может быть осуществлена следующими способами.

Первый способ - шаговый дискретный. Он предполагает дискретные перемещения платформы робота на заданный шаг. в интервале между которыми происходит фиксация одной группы захватных устройств и освобождение другой групп. Подвидами этого способа являются шаговый дискретный способ с нерегулируемой скоростью перемещения и шаговый дискретный способ с регулируемой скоростью перемещения внутри одного шага. Преимуществами данного способа является

простота реализации и надежность функционирования. Недостатки - низкое быстродействие и ограниченные функциональные возможности. Этим способом нельзя реализовать непрерывную скорость движения платформы робота.

Второй способ перемещения по вертикальной поверхности - шаговый непрерывный. Он позволяет производить непрерывное перемещение платформы робота в шаговом режиме, при котором фиксация одной группы захватных устройств и освобождение другой группы происходит без прерывания движения платформы. При этом способе расширяются функциональные возможности робота за счет получения непрерывной скорости движения платформы робота, а, следовательно, и установленного на ней технологического оборудования. Однако повышается сложность алгоритма и системы управления.

Третий способ - гусеничный. Он предполагает получение непрерывной скорости движения платформы робота за счет использования гусеничного механизма. Подвидами этого способа являются способ с использованием встроенных в гусеничный механизм захватных устройств и гусеничный способ с независимым использованием захватных устройств. В последнем способе гусеничный механизм служит только для организации поступательного движения робота в пределах свободного хода привода при зафиксированных захватных устройствах относительно гусеницы. Основным преимуществом гусеничного способа передвижения является высокая проходимость и надежность перемещения. К недостаткам можно отнести увеличенную сложность и вес конструкции.

Четвертый способ перемещения - антропоморфный. При этом способе передвижение осуществляется с помощью многозвенных опор, имитирующих движения живых существ, в частности, насекомых. Этот способ требует наличия большого количества степеней свободы и развитой системы управления. Сложность конструктивной реализации при этом снижает надежность функционирования комплекса в целом. Однако данный способ обеспечивает наибольшую гибкость, например, при преодолении различных препятствий,

Пятый способ перемещения по вертикальным поверхностям - параллелограммный. Название способа следует из особенности его реализации, которая использует свойство параллелограмма, заключающееся в возможности поочередного перемещения его параллельных сторон при их шарнирном соединении. В этом случае отпадает необходимость использования двух платформ, что в сочетании с отсутствием приводов подъема и опускания захватных устройств обуславливает простоту и легкость конструкции. При фиксации с помощью захватных устройств

одной стороны параллелограмма, вторая сторона перемещается в заданном направлении, перенося закрепленные на ней свободные захватные устройства путем скольжения вдоль поверхности перемещения. Такой способ обеспечивает максимальную скорость движения, но имеет сравнительно невысокую надежность и ограниченные возможности в смысле технологических применений, поскольку здесь нет несущей рабочей платформы. Кроме того, эта конструкция обладает недостаточной жесткостью и небольшой грузоподъемностью.

Шестой способ - движение с помощью скользящего уплотнения, когда сила прижима к поверхности стены осуществляется за счет действия перепада давлений между окружающей средой и внутри специальной вакуумной камеры, а движение осуществляется посредством колесного привода. Такое решение обеспечивает повышенную скорость, маневренность и проходимость по поверхностям, покрытым таким строительным материалом, как, например, керамическая плитка.

Один из методов повышения маневренности и увеличения выполняемых функций состоит в том, что в созданный мобильный робототехнический комплекс включены автоматически управляемый робот горизонтального перемещения, установленный на нем робот вертикального перемещения, манипулятор для сцепления робота вертикального перемещения с поверхностью. Управление комплексом может осуществляться от единого пульта, в автономном, в супервизорном или в автоматическом режимах. Пульт управления находится в отдельном помещении на безопасном расстоянии от места выполнения работ роботом в некоторой экстремальной среде.

2. Общая схема и алгоритм функционирования

Структура ТРВП имеет свою специфику, определяемую тем, что системы приводов должна обеспечивать функционирование робота на вертикальной поверхности.

Сравнительные характеристики ТРВП различных зарубежных организаций представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Сравнительные характеристики ТРВП

Организа-ция	Вид движения	Вес, (кгс)	Грузо-подъем-ность, (кг)	Оотноше-ние Гру-зоподъем-ность/Вес	Ско-рость (м/мин)	Зона дейст-вия, (м)	Технология
JGC Япония	вакуумные захваты, магнитные захваты, вращающиеся педипуляторы	25	15	0.6	4.0	60.0	чистка, инспекция
MEL Япония	скользящее уплотнение	20	10	0.5	1.5	10.0	чистка, инспекция
Portsmouth Polytechnic Великобритания	вакуумные захваты, двухзвенные педипуляторы	50	10	0.2	0.8	20.0	инспекция
Robotics Lab Франция	гусеничный, вакуумные захваты	80	20	0.25	1.2	50.0	чистка
ИИМ РАН Россия	вакуумные захваты,	15	15	1.0	1.0	20.0	покраска, резка, противопожарные операции
	шаговый	60	100	1.6	1.5	50.0	
NASA США	локомотионный	50	20	–	–	–	–

Классификация и сравнение производится в зависимости от типа движения по основным функциональным параметрам, таким как вес работа и его максимальная полезная нагрузка, отношение нагрузочной способности к собственному весу, максимальные скорости и расстояния.

Важное значение имеет приемлемая для того или иного класса различная технология, а именно контроль качества вертикальных поверхностей, очистка, газовая резка или сварка. Как следует из табл. 1.1. соответствующей конструкции будет предпочтительней определенная технология. По возможностям автономного движения предпочтение отдается японскому и российским прототипам роботов.

В табл. 1.2 приведены схемы различных типов ТРВП в зависимости от принципа их перемещения по вертикальным поверхностям.

Таблица 1.2

Сравнительные характеристики различных ТРВП

Тип транспортной механической системы		Двухплатформенная		Гусеничная	Со скользящим уплотнением	Многозвенная		Многоногая "Паук"	
Основные параметры	Вид захватного устройства	вакуумный	магнитный	вакуумный	вакуумный	вакуумный	магнитный	вакуумный	магнитный
Мощность приводов		1,5 кВт	2,5 кВт	1,8 кВт	0,3 кВт	1,0 кВт	2,7 кВт	1,8 кВт	2,0 кВт
Нагрузочный коэффициент $n = \frac{P_{нагр}}{P_{соб}}$, где $P_{нагр}$ - усредненная полезная нагрузка, $P_{соб}$ - собственный вес		2,5	0,8	1,3	2,0	1,0		0,8	0,6
Максимальная полезная нагрузка (кгс)		120	20	30	20	10		10	10
Возможность автономного управления		средняя	отсутствует	средняя	хорошая	возможная	отсутствует	средняя	средняя
Вибрационные возможности	Диапазон частот (при амплитуде вибраций 0,2 мм)	0,1 Гц - 20 Гц			0,5 Гц - 30 Гц				
	Выдерживаемые ускорения	0,3 м/с ² - 10 м/с ²			0,2 м/с ² - 5 м/с ²				

В колёсном типе мобильного робота используется вакуумная присоска со скользящим уплотнением, выполненным по периферии вакуумной камеры, либо магнитное устройство фиксации к поверхности.

В гусеничном и шагающем типах ТРВП устройства фиксации выполнены либо в виде вакуумных пластин (гусеничный тип), либо в конечном звене привода ноги (шагающий тип).

Как следует из рассмотрения таблицы, предпочтение отдается ТРВП с вакуумными захватными устройствами по совокупности параметров (мощности приводных систем, нагрузочного коэффициента, возможности автономного управления).

Максимальной полезной нагрузкой обладают роботы двухплатформенного типа с вакуумными захватными устройствами. ТРВП с вакуумными присосками в

определённом диапазоне частот хорошо противостоят вибрационным нагрузкам при сравнительно небольших амплитудах вибраций.

Общая схема ТРВП (рис. 1.1) включает систему приводов (СП), систему управления СУ, блок преобразователей П, датчики Д в цепи обратной связи, блок питания БП. Система управления СУ представляет собой перепрограммируемый командоаппарат, реализованный на основе управляющей ЭВМ или на специализированном микропроцессоре. Информация об объекте поступает с датчиков ДО.

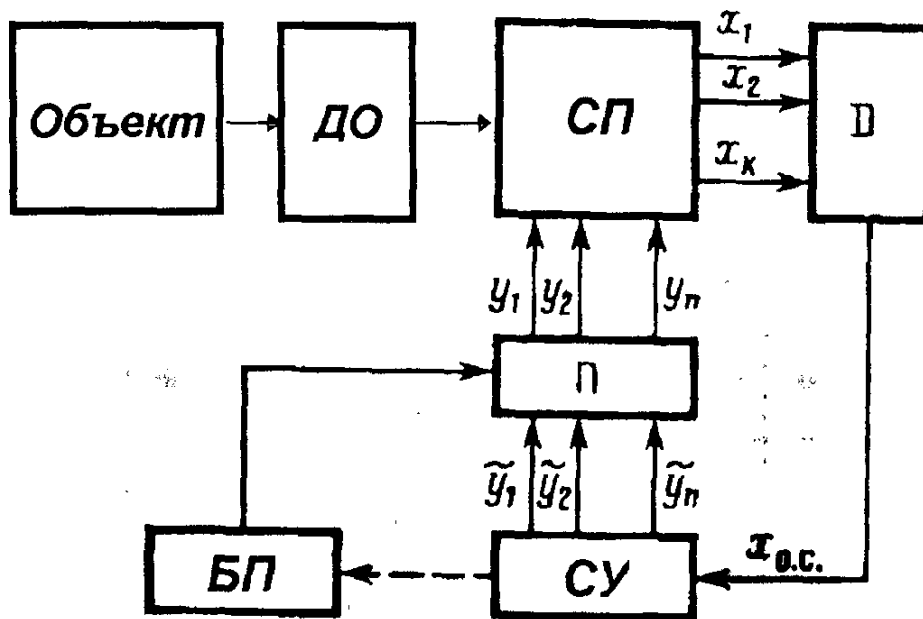


Рис.1.1 Общая структура ТРВП

В общем случае, при использовании в структуре системы пневмоприводов [55-60], в блоке электропневмопреобразователей П, содержащем пневматические клапаны с электрическим управлением, электрические сигналы управления приводами преобразуются в соответствующие сигналы давления воздуха, поступающего в полости пневмоцилиндров. С помощью датчиков Д в цепи обратной связи измеряются параметры рабочих режимов в захватах и в исполнительных механизмах, сигнализирующие, например, о конце выполнения рабочей операции или о предельно допустимых степенях вакуума в захватах. Кроме того, часть датчиков устанавливается на технологическом оборудовании с целью преобразования и передачи информации о выполнении функциональных операций роботом, например, контрольно-измерительной информации о качестве исследуемой поверхности, о результатах дефектоскопии сварных швов, об окончании и качестве выполнения покрасочных работ и т. п. Блок питания БП обеспечивает питание комплекса в целом.

Приводная система робота (рис. 1.2) содержит подвижную платформу, жестко скрепленную с транспортным двигателем, например, с двумя пневматическими цилиндрами 1, штоки поршней 2, которые связаны с пневматическими цилиндрами 3 приводных механизмов первой группы захватов.

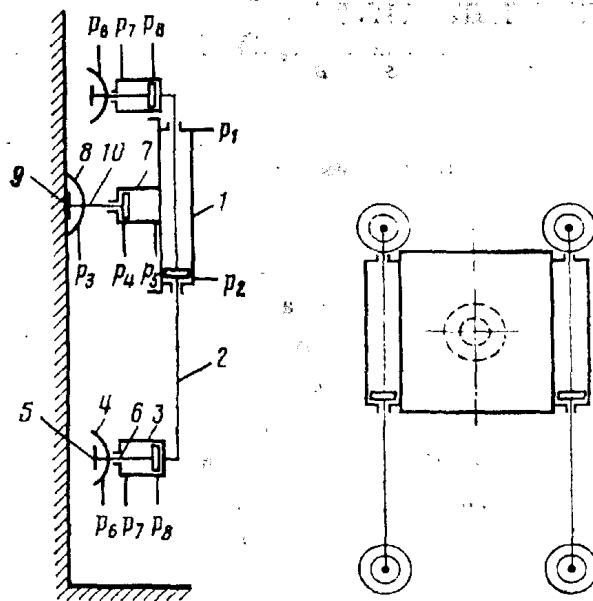


Рис. 1.2 Пример **построения** приводной **системы** ТРВП

Эти захваты 4 крепятся на опорах 5, соединенных со штоками поршней 6. К подвижной платформе крепятся пневматические цилиндры 7 второй группы захватов, удерживающих платформу на вертикальной поверхности. Эти захваты 8 крепятся на опорах 9, соединенных со штоками поршней 10. Количество вакуумных захватов первой и второй групп может быть одинаковым или различным в зависимости от технологической задачи.

Режим работы системы приводов робота определяется алгоритмом управления, реализующим последовательность включений исполнительных механизмов и, в конечном итоге, последовательность движений системы приводов захватов и платформы. На рис. 1.3 представлена циклограмма давлений в полостях пневмоцилиндров (переходные процессы в данном приближении не показаны), p_i - давление в i -й полости ($i = 1, \dots, 8$), N - номер такта.

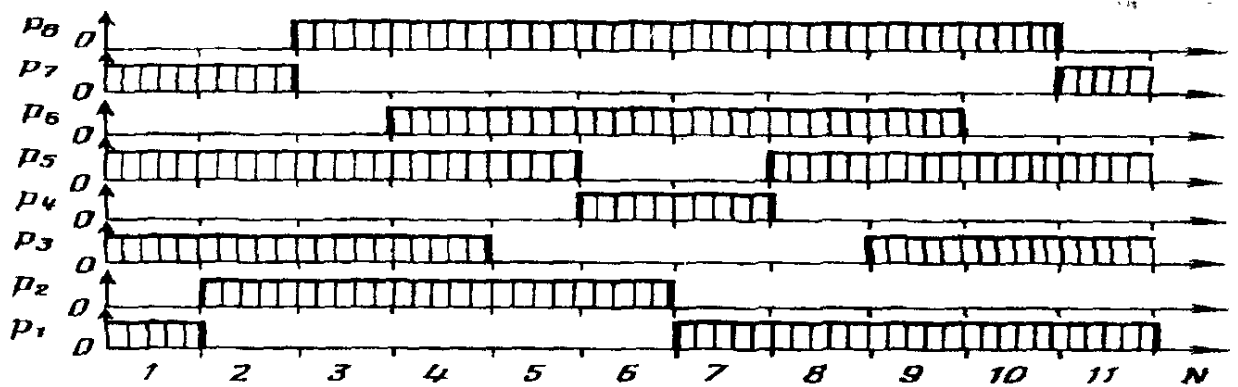


Рис. 1.3 Циклограмма давлений в СП ТРВП

В такте 1 центральная опора опущена, в ней создан вакуум, боковые опоры подняты, пневмоцилиндры платформы втянуты. В такте 2 пневмоцилиндр выдвигается и выполняется движение переноса захватов первой группы. В такте 3 центральная опора опущена, в ней создан вакуум, боковые опоры - захваты первой группы - опущены, пневмоцилиндр находится в выдвинутом состоянии. В такте 4 в захватах первой группы создается вакуум, а в такте 5 с опор второй группы вакуум снимается. Затем (такт 6) опоры захватов второй группы поднимаются. В такте 7, когда робот сцеплен с поверхностью с помощью захватов первой группы, происходит движение платформы - пневмоцилиндры втягиваются. Затем опускаются опоры захватов второй группы (такт 8), в них создается вакуум (такт 9), с захватов первой группы снимается вакуум (такт 10), и последовательность движений повторяется.

3. Условия равновесия робота на поверхности

Рассмотрим ТРВП простейшей конструкции, схема которого представлена на рис. 1.5.

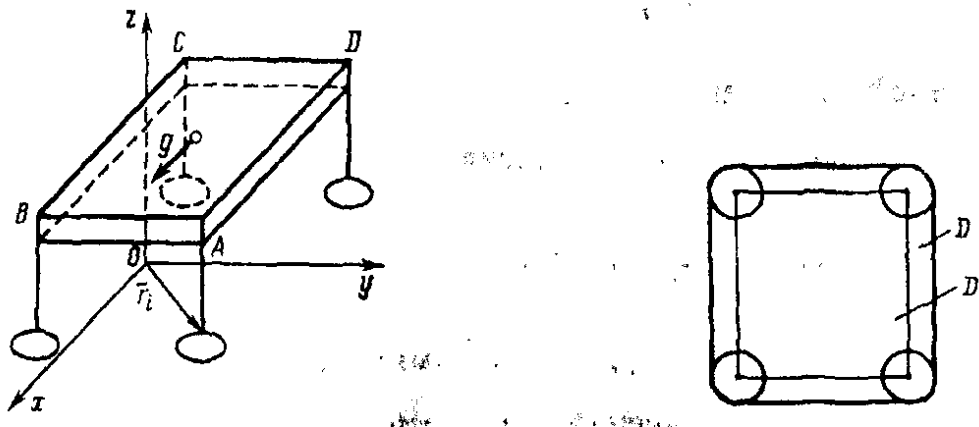


Рис. 1.5 Модель ТРВП

контакта

Рис. 1.6 Зоны точек

Робот состоит из корпуса и педипуляторов с захватами [76]. Важной задачей механики, решение которой обеспечивает надежное функционирование робота, является определение условий, гарантирующих надежный контакт педипуляторов с поверхностью при заданных внешних силах, приложенных к роботу. Ниже рассматриваются некоторые возможные подходы к решению этой задачи и приводится расчет грузоподъемности робота, т. е. расчет тех усилий, при которых робот удерживается на поверхности [77].

Свяжем декартову систему координат $Oxuz$ с неподвижной плоской поверхностью, по которой перемещается робот. Плоскость Oxy совместим с этой поверхностью, а ось z направим в ту сторону, где находится робот (см. рис. 1.5). Через r_i (X_i, y_i, O) обозначим радиусы-векторы центров стоп, $i=1, \dots, n$. На робот в состоянии равновесия действуют следующие силы.

1) Внешние активные силы (вес, реакции со стороны коммуникаций и других внешних объектов); главный вектор этих сил обозначим через R , а их главный момент относительно точки O - через M_0 .

2) Нормальные реакции поверхности; силу реакции, приложенную к i -й стопе, обозначим через N_{ik} , где k -орт оси z , а $N_i > 0$, $i=1, \dots, n$.

3) Касательные реакции поверхности (силы сухого трения); силу трения, действующую на i -ю стопу, обозначим через F_i , $i=1$ к. Силы трения лежат в плоскости Oxy и удовлетворяют закону сухого трения Кулона

Лекция

Тема 3.2.2. Определение схем роботов вертикального перемещения для выполнения различных технологических задач

ВОПРОСЫ

1. Классификация систем приводов роботов.
2. Модульность систем приводов роботов.
3. Выбор схемы привода в зависимости от вида технологической траектории.

4. Выбор схемы привода в зависимости от вида обслуживаемого технологического объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Градецкий В.Г., Рачков М.Ю. Роботы вертикального перемещения. М.: Тип. МО РФ. 1997, 223 с. (с. 37-65).

1. Классификация систем приводов роботов

Все СП ТРВП можно классифицировать по принципу фиксации на поверхности перемещения, по функциональным возможностям, по виду обслуживаемого технологического объекта и по виду движения следующим образом:

1. По принципу фиксации на поверхности перемещения:

- вакуумные
 - эжекторные
 - с вакуумным насосом
 - вентиляторные
- магнитные
 - электромагнитные
 - с постоянными магнитами
- реактивные
- механические
 - на трении
 - на промежуточной фиксирующей среде [108,109]

2. По функциональным возможностям

- универсальные
- специализированные

3. По виду обслуживаемого технологического объекта

- для плоских поверхностей
- для изогнутых поверхностей
- для труб
- для перехода с одной поверхности на другую

4. По виду движения

- продольно-шаговые
- колесно-гусеничные

- циркульные.

Некоторые схемы ТРВП различных типов даны на рис. 2.1

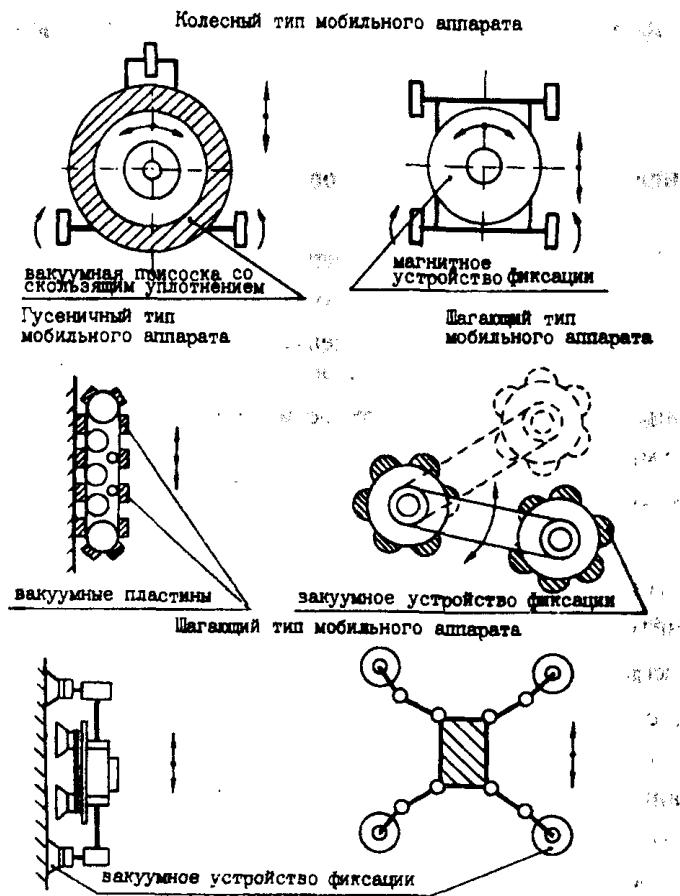


Рис. 2.1 Схемы различных мобильных аппаратов

По принципу фиксации на поверхности перемещения наиболее универсальными и компактными системами являются вакуумные эжекторные системы, которые и получают на практике наибольшее распространение.

Магнитные системы могут использоваться только для ферромагнитных поверхностей и критичны к степени их загрязнения.

Универсальные системы обеспечивают выполнение широкого круга технологических операций благодаря возможности реализации любой желаемой траектории движения робота. Специализированные системы реализуют заданный вид траекторий для выполнения специфических технологических операций. К ним, в частности, относятся сканирующие системы.

2. Модульность систем приводов роботов

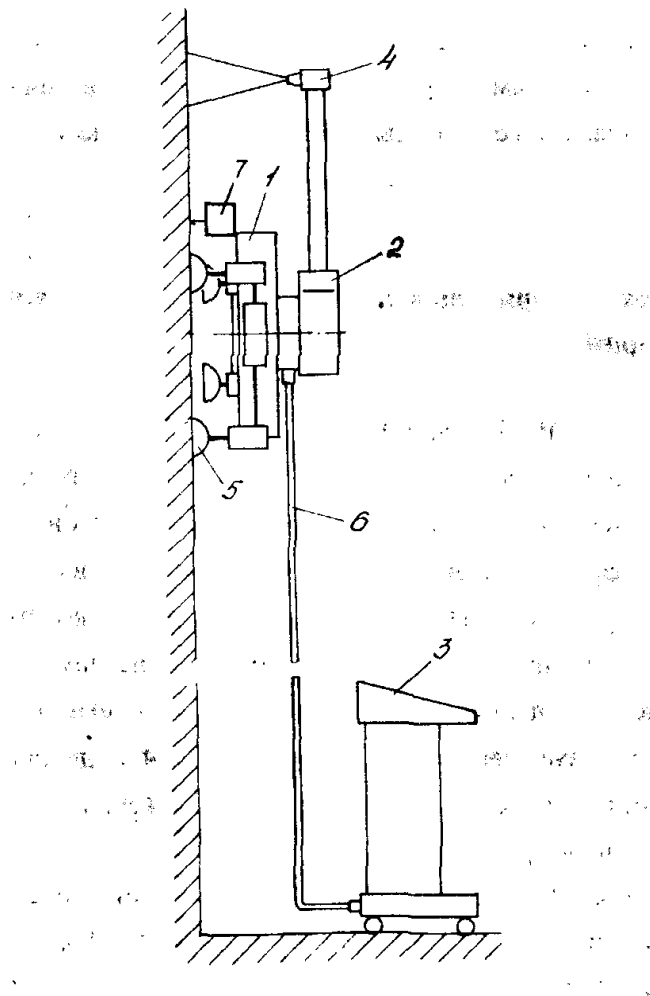


Рис.2.2 Общая модульная структура СП ТРВП

В зависимости от решаемой с помощью ТРВП задачи, его структура видоизменяется при сохранении модульности построения комплекса в целом.

Общая модульная структура (рис. 2.2) состоит из транспортного модуля 1, из технологического модуля 2, из приводов инструмента 4 и из приводов педипуляторов 5. Модуль управления 3 также может иметь свою систему приводов, если в структуре робота используется кабельная связь 6 модуля управления с бортом, ограничивающая диапазон горизонтального перемещения робота. Модуль безопасности 7 обеспечивает страховку ТРВП в случае сбоя одной из его систем.

Транспортный модуль СП ТРВП обеспечивает движение робота вдоль поверхности перемещения. Технологический модуль СП ТРВП организует необходимую траекторию движения инструмента относительно поверхности перемещения. Привод инструмента в общем случае реализует управление исполнительными органами инструмента.

Привод педипуляторов осуществляет фиксацию захватов на поверхности перемещения во время транспортного движения робота и выполнения им технологических операций на вертикальных поверхностях.

Модуль управления обеспечивает перемещение в соответствии с шириной рабочей зоны робота. В некоторых случаях модуль управления устанавливается на самоходном транспортном средстве, которое также может быть использовано для оперативной перевозки самого робота и установки его в начальную позицию на поверхности перемещения с помощью дополнительной системы перегрузки.

Выбор схемы привода в зависимости от вида технологической траектории

Выбор схемы СП ТРВП зависит от вида требуемой технологической траектории движения инструмента. Для реализации дискретной траектории движения инструмента, например, при решении задач зачистки участков поверхности, используется схема, показанная на рис. 2.3. Система приводов выполняет попеременное движение транспортного и технологического модулей во время осуществления операции. Первая группа захватов 1 и вторая группа захватов 2 перемещаются пошагово. После каждого шага включается привод 3 технологического модуля, и манипулятор 5 реализует перемещение инструмента 4 по дискретной траектории 6.

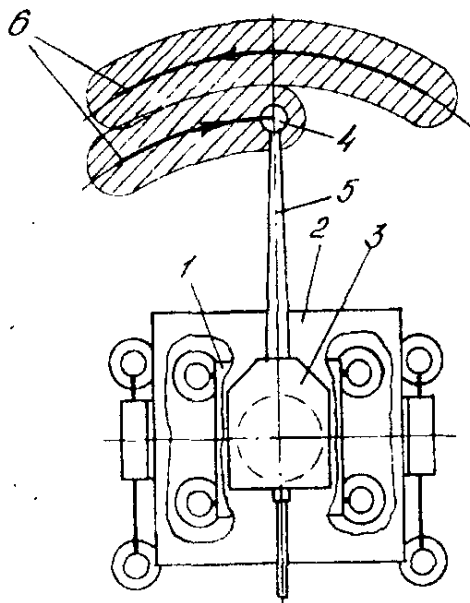


Рис. 2.3 Прерывистая траектория

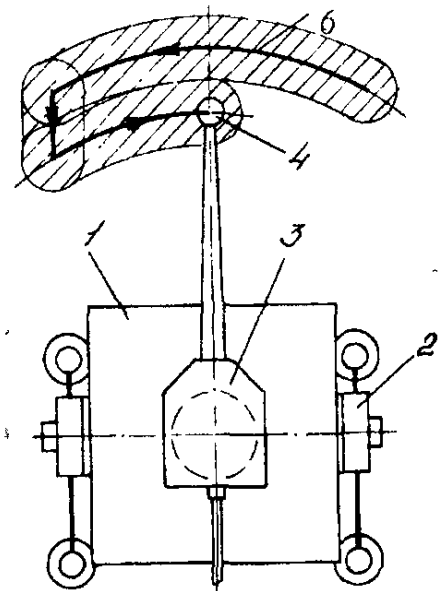


Рис. 2.4 Непрерывная траектория

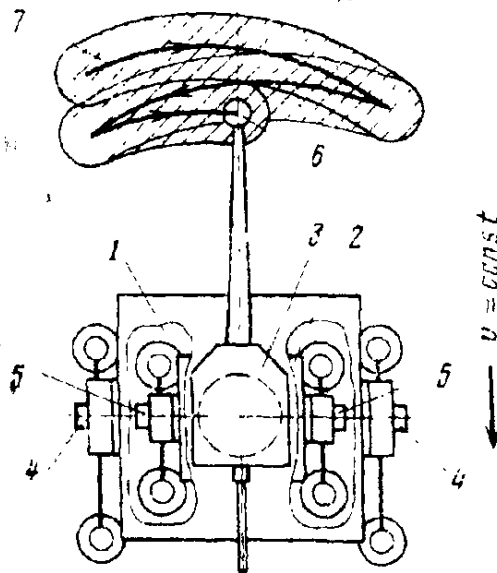


Рис. 2.5 Непрерывная скорость

Для реализации непрерывной траектории движения инструмента, например при решении задач покраски поверхности, используется схема, показанная на рис. 2.4. В данном случае вертикальный участок технологической траектории выполняется с помощью привода 2, перемещающего платформу 1 с приводом 3 технологического модуля и инструментом 4 при очередном шаге робота.

Обе приведенные схемы имеют прерывистую скорость перемещения инструмента, так как в них имеется транспортный привод только для одной группы захватов. Для реализации непрерывной скорости движения инструмента, например, при решении задач сварки поверхностей, используется схема, показанная на рис. 2.5.

В этом случае каждая группа захватов 1 и 2 должна иметь независимые приводы 4 и 5. В результате появляется возможность иметь непрерывную скорость движения инструмента 6 с произвольной траекторией 7 при наличии привода 3 технологического модуля.

Постоянная непрерывная скорость перемещения корпуса транспортного средства обеспечивается кинематической схемой движения транспортных приводов, приведенной на рис. 2.6 по периодам движения а) - г).

Система содержит корпус 1, связанный с первым приводом 2 и вторым приводом 3 перемещения штоков 4, 5, и приводы 6 перемещения захватов 7. Блок синхронизации скорости содержит реечную передачу, управляющую муфту, червячную передачу и управляющий электродвигатель [103].

Для перемещения корпуса 1 из исходного положения (рис. 2.6. а) поднимаются захваты 7 и задействуется привод 3 с соответствующим блоком 8 синхронизации скорости (рис. 2.6. б). В процессе рабочего хода привода 3 включается привод 2 со своим блоком 8 синхронизации скорости, обеспечивая движение поднятых опор 7 в сторону, противоположную движению корпуса и жестко закрепленного на нем привода 3, но со скоростью, равной скорости движения корпуса. В результате поднятые захваты остаются неподвижными относительно поверхности перемещения (рис. 2.6. в). Это позволяет произвести их фиксацию на поверхности перемещения с помощью соответствующих приводов 6 во время движения корпуса в течение незавершенного рабочего хода привода (рис. 2.6. д). Далее движение корпуса производится обоими приводами 2 и 3 с последующим отключением блока 8 синхронизации скорости привода 2 и возвратом штока 4 в исходное положение путем предварительного поднятия его опор 7 и отключения блока 8 без нарушения постоянства скорости перемещения корпуса 1 транспортного средства (рис. 2.6 е). Далее описанный порядок действий повторяется применительно к приводу 2.

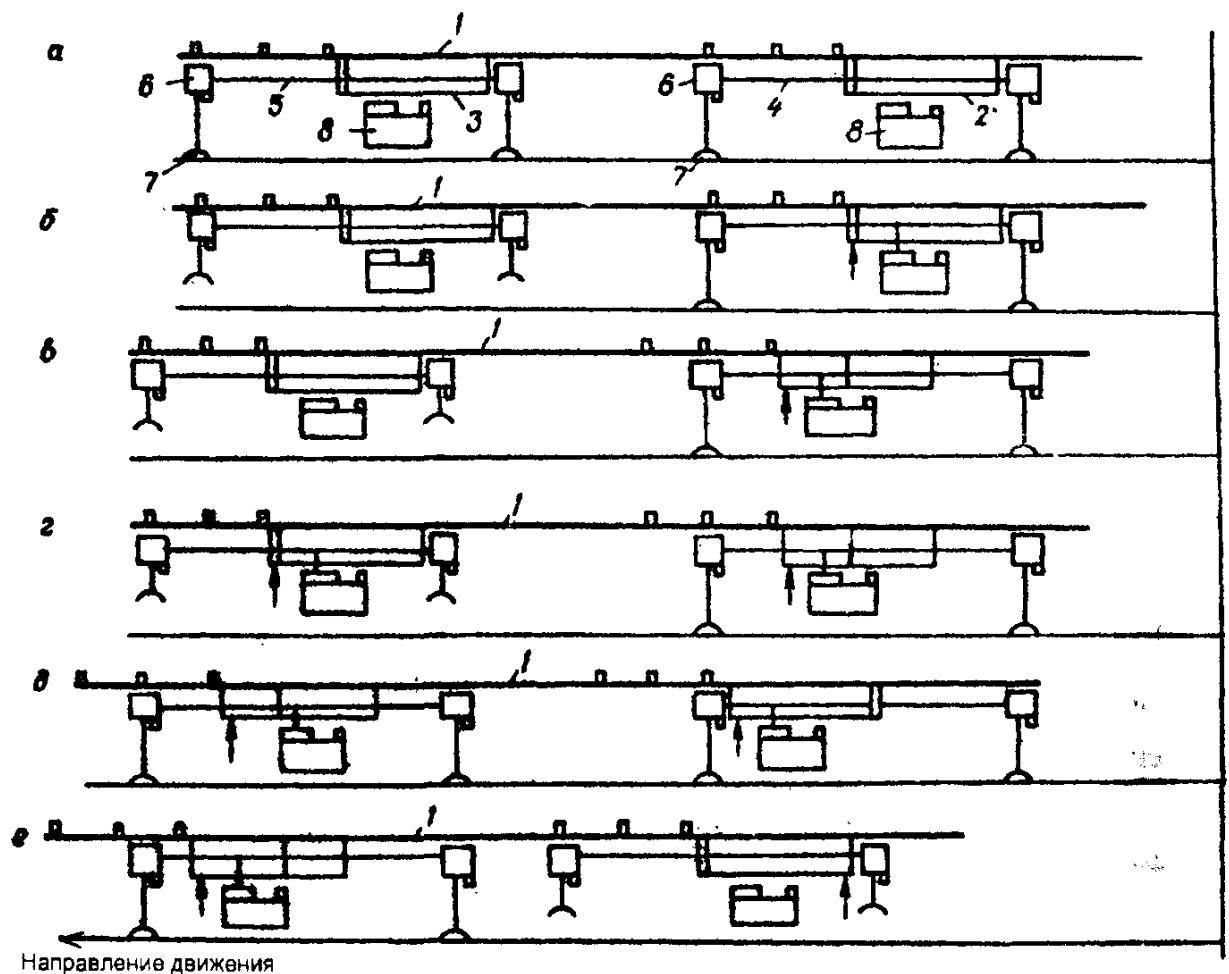


Рис. 2.6 Кинематическая схема постоянной скорости движения

Принципиальная возможность выравнивания скоростей приводов 2 и 3 обеспечивается использованием соответствующих блоков 8 синхронизации скорости. По командам из системы управления включаются управляющие микродвигатели со стабилизированном числом оборотов, которые приводят во вращение червячные передачи, соединенные через управляемые муфты с реечными передачами. В результате скорости штоков 4 и 5, соединенных с передачами, становятся равными между собой и определяются заданной скоростью электродвигателей. Отключение блоков 8 в соответствующие моменты времени производится с помощью управляемых муфт согласно алгоритму движения.

Схема системы управления рассмотренной схемой приводов показана на рис. 2.7а. На рис. 2.7 б представлен блок программного управления приводами.

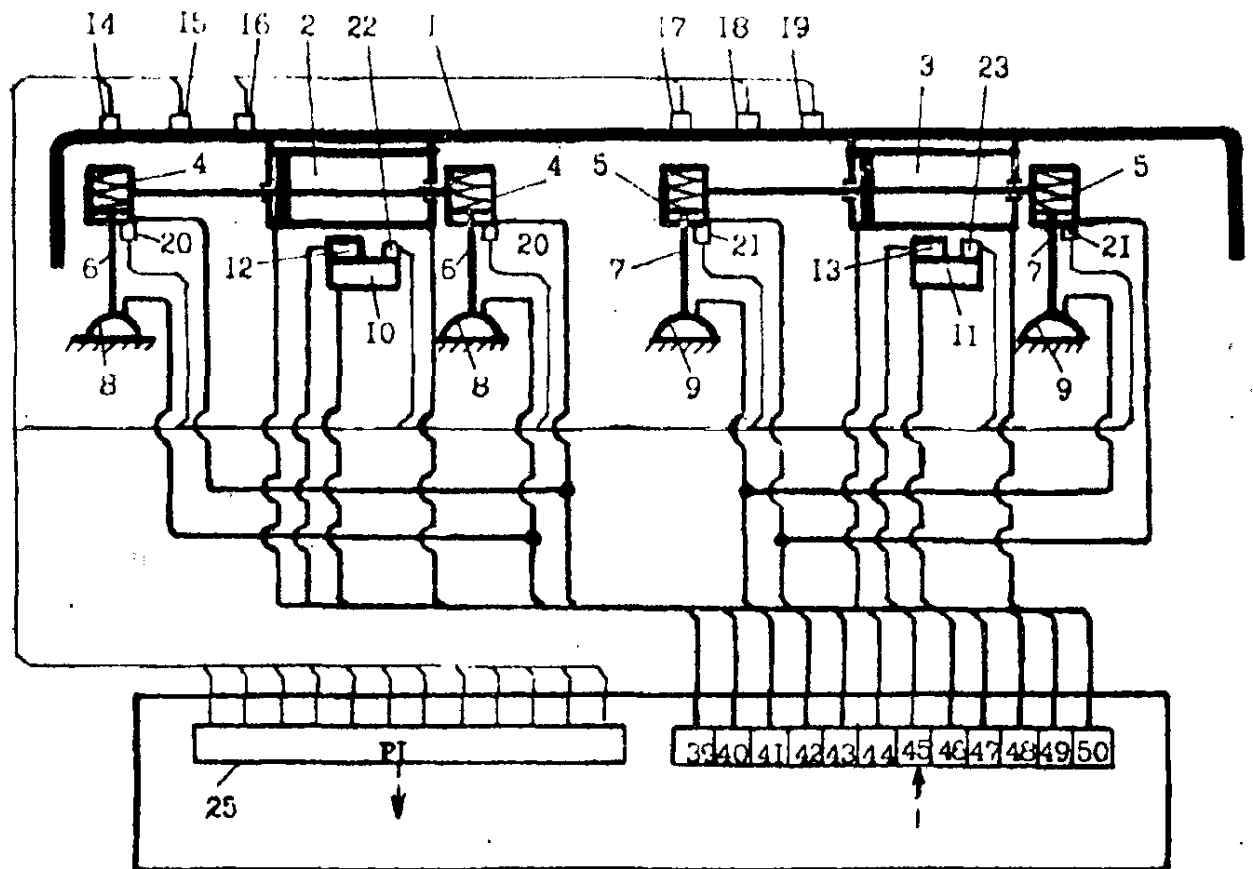


Рис. 2.7 а Схема системы управления

Робот с корпусом 1 содержит приводы 2, 3 перемещения опор (движение вперед-назад), приводы 4, 5 перемещения захватов (подъем-опускание), опоры 6, 7, захваты 8, 9, блоки 10, 11 управляющих двигателей с червячными передачами, управляемые муфты 12, 13 сцепления валов двигателей со штоками приводов 2, 3, две реечные передачи (на рис. 2.7 не показаны), датчики 14-19 контроля положения опор, датчики 20, 21 контроля, подъема-опускания захватов и датчики 22, 23 контроля сцепления муфт. Блок программного управления содержит генератор 24 частоты, три цифровых регистра 25-27, сумматор 28, блок 29 памяти, счетчик 30 времени, два триггера 31, 32, две схемы 33, 34 совпадения, схему ИЛИ 35, кнопку 36 запуска, линию 37 задержки, блок 38 отрицания, блоки 39, 40 включения приводов перемещения захватов, блоки 41 - 44 включения приводов перемещения опор, блоки 45, 46 включения вакуума под захваты, блоки 47, 48 включения электродвигателей и блоки 49, 50 включения управляемых муфт.

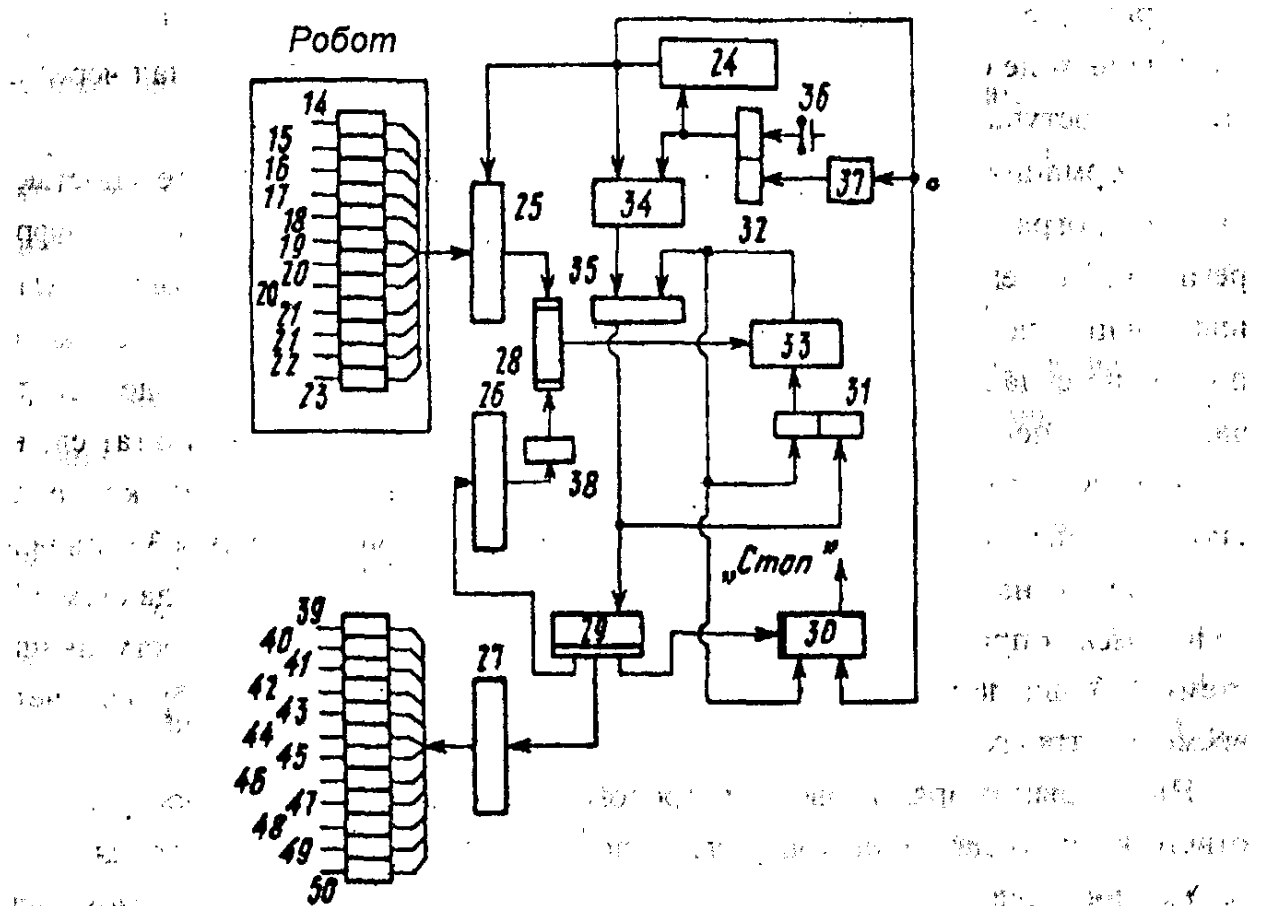


Рис. 2.7 б Блок программного управления

Корпус 1 жестко связан с двумя приводами 2, 3 перемещения. Штоки каждого из приводов 2, 3 связаны на концах соответственно с приводами 4, 5 перемещения (вверх-вниз). Штоки приводов 4, 5 служат опорами 6, 7 на которых установлены захваты, соответственно 8, 9, сцепления с поверхностью.

Каждый из приводов 2, 3, установленный на корпусе 1, соответственно связан с корпусами электродвигателей 10, 11, валы которых через соответствующие управляющие муфты 12, 13 и реечные передачи связаны со штоками соответствующих приводов 2, 3. При этом на корпусе 1 установлены в определенном порядке датчики 14 - 16 и 17 - 19 контроля положения опор 6 и 7 соответствующих приводов 2 и 3, датчики 20, 21 контроля подъема опускания соответствующих захватов 8, 9 а в корпусах управляющих муфт 12, 13 установлены датчики 22, 23 контроля сцепления соответствующих штоков приводов 2, 3 с валами соответствующих блоков 10, 11.

Генератор частоты 24 обеспечивает формирование тактовых импульсов, поступающих для опроса первого цифрового регистра и на счетный вход счетчика

времени с частотой, определяемой точностью положения перемещающихся приводов. По первому тактовому импульсу после запуска генератора также формируется опрос блока памяти.

Блок памяти обеспечивает хранение программы последовательного выполнения команд соответствующими приводами транспортного средства, кодов состояний первого входного регистра, используемые для его контроля, и кодов задания интервалов времени выполнения команд исполнительными органами. Червячные передачи блоков 10, 11 при управлении обеспечивают гашение мощности приводов 2,3.

При каждом опросе блока памяти на его выходе формируются в заданном программой порядке информационные коды, поступающие на входы регистра счетчика времени и второго и третьего цифровых регистров. При этом на втором цифровом регистре формируется код, соответствующий состоянию первого цифрового регистра, которое он должен принять после поступления информации от датчиков контроля в результате исполнения роботом очередной команды по перемещению. На третьем цифровом регистре формируется код команды, согласно которому включаются соответствующие исполнительные органы транспортного средства, а в регистр счетчика времени поступает код, соответствующий длительности времени исполнения очередной команды.

При нажатии кнопки 36 запуска взводится триггер 32, и после появления на его выходе положительного импульса запускается генератор частоты. Сигналы с выхода генератора с тактовой частотой поступают для опроса первого цифрового регистра 25 и для заполнения счетчика 30 времени. Первый тактовый импульс также поступает на первый вход схемы совпадения, на второй вход которой поступает импульс с триггера 32, взведенного после нажатия кнопки запуска. Тактовый импульс, поступивший на вход схемы совпадения, через линию 37 задержки сбрасывает триггер 32, тем самым обеспечивая однократное после запуска появление сигнала на выходе схемы совпадения. С выхода схемы совпадения сигнал через схему ИЛИ 35 поступает для опроса блока 29 памяти.

Информация из блока 29 памяти в соответствии с последовательностью, заданной программой, заносится во второй цифровой регистр 26, третий цифровой регистр 27 и регистр счетчика 30 времени. С выхода второго цифрового регистра информация через схему 38 отрицания переписывается на сумматор 28, который постоянно складывает ее с информацией, поступающей в прямом коде с тактовой частотой от первого цифрового регистра. В тот момент, когда результат сложения

становится равным нулю, на выходе сумматора, появляется сигнал, который поступает на первый вход схемы 33 совпадений. На второй вход схемы 33 совпадений поступает сигнал с триггера 31, который взводится сигналом с выхода схемы ИЛИ 35 в момент опроса блока 29 памяти. После совпадения сигналов, поступающих на схему 33 совпадений, вырабатывается сигнал, осуществляющий сбросы счетчика времени и триггера 31 и новый опрос блока памяти.

На каждый разряд первого цифрового регистра информация поступает от соответствующих датчиков контроля положение опор, датчиков контроля подъема-опускания захватов и датчиков контроля сцепления муфт. Таким образом, первый цифровой регистр может иметь разрядность, равную 12 или более. Датчики контроля могут быть выполнены в виде контактов, которые при определенном положении опор и муфт замыкают цепь сигналов, поступающих на соответствующий разряд первого цифрового регистра. При каждом опросе блока памяти на третьем цифровом регистре формируется код, согласно которому включаются соответствующие исполнительные органы робота. Перед этим запускается счетчик времени, который заполняется до момента, определяемого кодом, поступающим на его регистр при опросе памяти. Если до этого момента срабатывает сумматор (в результате совпадения информации на первом и втором цифровых регистрах), это значит, что задающие команды исполняются верно и в заданное время, и тем самым дается разрешение для нового опроса блока памяти и исполнения следующей команды. Если счетчик времени успевает заполниться, а робот команду не выполнил, происходит останов выполнения программы перемещения до принятия решения со стороны оператора.

Таким образом, устройство управления обеспечивает циклическое исполнение команд для последовательных пошаговых перемещений робота.

Для принятия исходного положения кнопкой запуска включается блок управления. С помощью сигналов генератора частоты начинается опрос первого цифрового регистра и выполняется однократный опрос блока памяти. При первом опросе блока памяти в регистр счетчика времени заносится код длительности принятия исходного положения, во второй цифровой регистр - код, соответствующий информации от датчиков контроля при исходном положении, и последовательно подаются команды на расцепление штоков приводов от валов двигателей штоков 10, И соответственно с помощью муфт 12,13, включение вакуума с помощью блоков 45, 46 под захваты 8, 9, включение давления в приводы 2. 3 перемещения, для установления опор в крайнее левое положение через блоки 43. 44, опускание опор 6, 7

с помощью приводов 4. 5 через блоки 39, 40, и выключение давления, устанавливающего опоры в крайнее левое положение.

После принятия исходного положения для начала движения, например влево, подают последовательно следующие команды: снять вакуум с захватов 8. поднять опоры 6, соединить вал блока И со штоком привода 3 с помощью муфты 13. подать давление слева от поршня в привод 3, выключить двигатель блока 11. Так как захваты 9 в этом случае сцеплены с поверхностью, а привод 3 жестко связан с корпусом, то в момент включения двигателя начинается перемещение корпуса относительно поверхности или, что то же самое, относительно опор 7 привода 3.

В тот момент, когда датчик 18 контроля положения оказывается над опорой 7 привода 3, на первом цифровом регистре устройства управления появляется код, по которому вырабатываются команды на сцепление вала блока 10 со штоком привода 2 с помощью муфты 12, подачу давления в привод 2 слева от поршня - для перемещения опор вправо и на включение двигателя блока 10. Так как штоки приводов 2 и 3 оказываются связанными с валами двигателей, то перемещение опор 6 привода 2 относительно поверхности в этом случае не происходит из-за вращения двигателей с одинаковой скоростью. При необходимости выравнивания скоростей вращения двигателей можно использовать стабилизаторы оборотов. После этого выполняются последовательно команды на включение вакуума под захваты 8 привода 2 и на их опускание.

В момент, когда датчики 15 и 19 оказываются над соответствующими опорами, для дальнейшего движения необходимо выполнить последовательно команды на выключение вакуума под захватами 9 у привода 3, на расцепление штока привода 3 от вала мотора с помощью муфты 13, на снятие давления в приводе 3, обеспечивающего движение корпуса влево при закрепленных на поверхности захватах 9, и на поднятие захватов. После принятия этого положения вырабатывается команда на подачу давления в привод 3 справа от поршня для перемещения опор 7 в крайнее левое положение.

В момент, когда датчик 16 располагается над опорами 6 привода 2, на первом цифровом регистре вырабатываются последовательно команды на сцепление штока привода 2 с валом блока 10 с помощью муфты 13, на подачу давления в привод 3 для движения поршня вправо, на включение вакуума под захваты 9 и на опускание захватов.

После выполнения этих команд блок программного управления вырабатывает последовательно исполнительные команды на отключение вакуума с захватов

8, на поднятие захватов, на расцепление штока привода 2 с валом двигателя с помощью муфты 12 и на подачу давления в привод 2 для перевода опор 6 в крайнее левое положение. Затем выполняются следующие команды: на сцепление штока привода 2 с валом двигателя с помощью муфты 12 и на подачу давления в привод 2 для перевода опор 6 в правое положение. В дальнейшем цикл непрерывного перемещения механизма с помощью пошагового движения опор двух приводов повторяется.

Расположение датчика 18 относительно датчика 19 и датчика 15 относительно датчика 16 на расстоянии, не меньшем произведения скорости движения штока на время выполнения фиксации (опускание опоры, подача вакуума под захват, отключение противоположного привода), позволяет завершить фиксацию до окончания движения поршня соответствующего привода перемещения в горизонтальном направлении.

В некоторых случаях появляется возможность упрощения структуры транспортного модуля за счет выполнения технологического модуля с автономным манипулятором. В манипуляторе закрепляется инструмент, траектория движения которого определяется не только транспортным модулем при его перемещении, но и движением манипулятора.

Задача резки металлических поверхностей с помощью ТРВП, как правило, отличается сложностью реализации транспортного и технологического модуля. Например, для вырезки отверстия в стене резервуара (в частности при проведении противопожарных операций) необходимо поднять тяжелое технологическое оборудование на значительную высоту и обеспечить прохождение резаком контура отверстия за данное время.

Оптимальным путем решения этой проблемы является сдвигание технологического инструмента, в данном случае резака. Схема робота с такой структурой дана на рис. 2.8.

Два резака технологического модуля установлены неподвижно относительно центра робота, который перемещается по траектории, обеспечивающей прохождение контура отверстия резаками. Благодаря одновременной реализации двух технологических траекторий при одной транспортной траектории существенно повышается производительность ТРВП. В приведенной схеме есть возможность проводить работу за границей поверхности перемещения, что также расширяет функциональные возможности ТРВП.

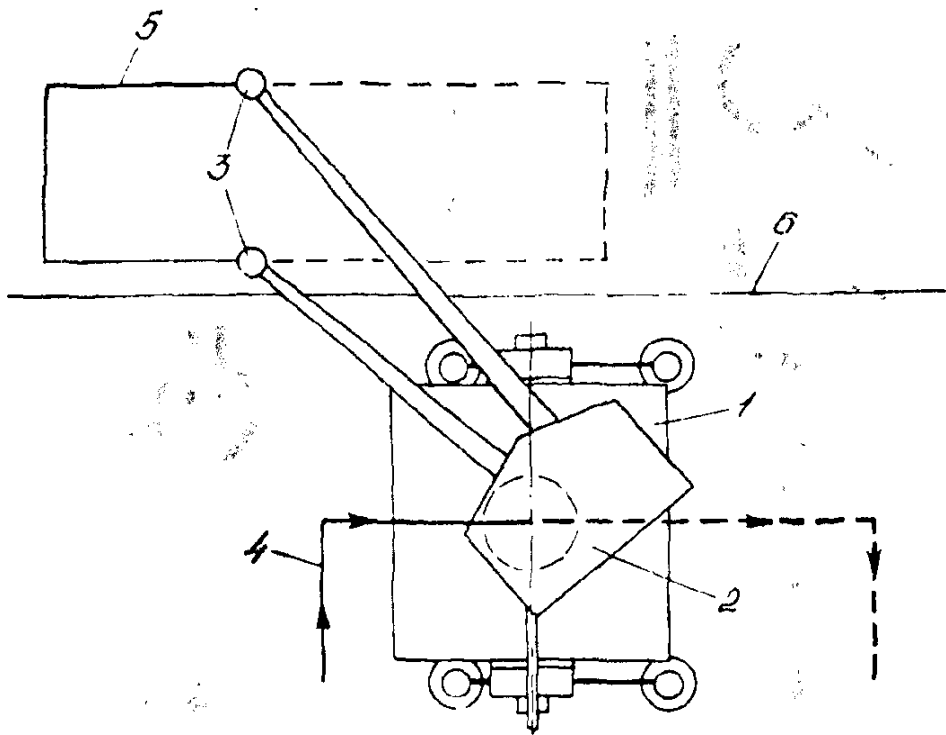


Рис. 2.8 Робот со сдвоенным инструментом

1 - транспортный модуль; 2 ■ технологический модуль; 3 ■ резаки; 4 -траектория движения центра робота; 5 - контур вырезаемого отверстия; 6 - граница поверхности перемещения.

Два резака технологического модуля установлены неподвижно относительно центра робота, который перемещается по траектории, обеспечивающей прохождение контура отверстия резаками. Благодаря одновременной реализации двух технологических траекторий при одной транспортной траектории существенно повышается производительность ТРВП. В приведенной схеме есть возможность проводить работу за границей поверхности перемещения, что также расширяет функциональные возможности ТРВП.

Для технологических операций, требующих реализации сканирующих траекторий движения ТРВП, например для инспекции поверхности, оптимальной является структура СП ТРВП с перпендикулярным расположением транспортных приводов, осуществляющих горизонтальное и вертикальное перемещение робота. Один из вариантов указанной структуры показан на рис. 2.9.

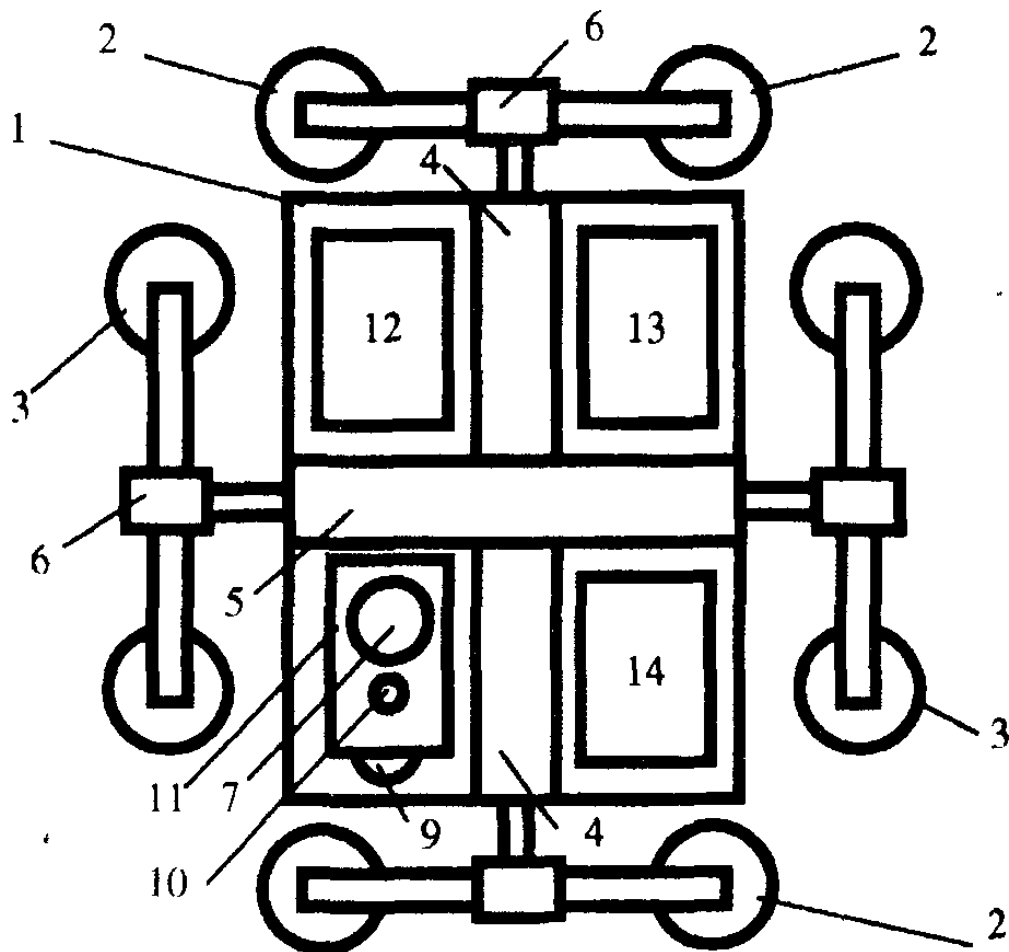


Рис. 2.9 Сканирующая схема привода робота

Привод 4 реализует вертикальное перемещение робота с помощью захватов 2, а привод 5 - горизонтальное перемещение с помощью захватов 3. Перпендикулярное расположение транспортных приводов дает возможность организовать любую желаемую комбинацию вертикальных и горизонтальных участков движения платформы 1 без использования узла поворота, что повышает быстродействие системы в целом и снижает вес конструкции. При использовании пневмоприводов в данной структуре достигается дополнительная жесткость конструкции, что позволяет выполнять силовые технологических операции, такие как монтаж дюбелей с помощью специального оборудования 6-14 на борту .

Дальнейшее развитие рассмотренной структуры производится за счет развязки одного из приводов от платформы (рис. 2.10). Такая развязка добавляет возможность диагонального движения платформы робота в любом направлении.

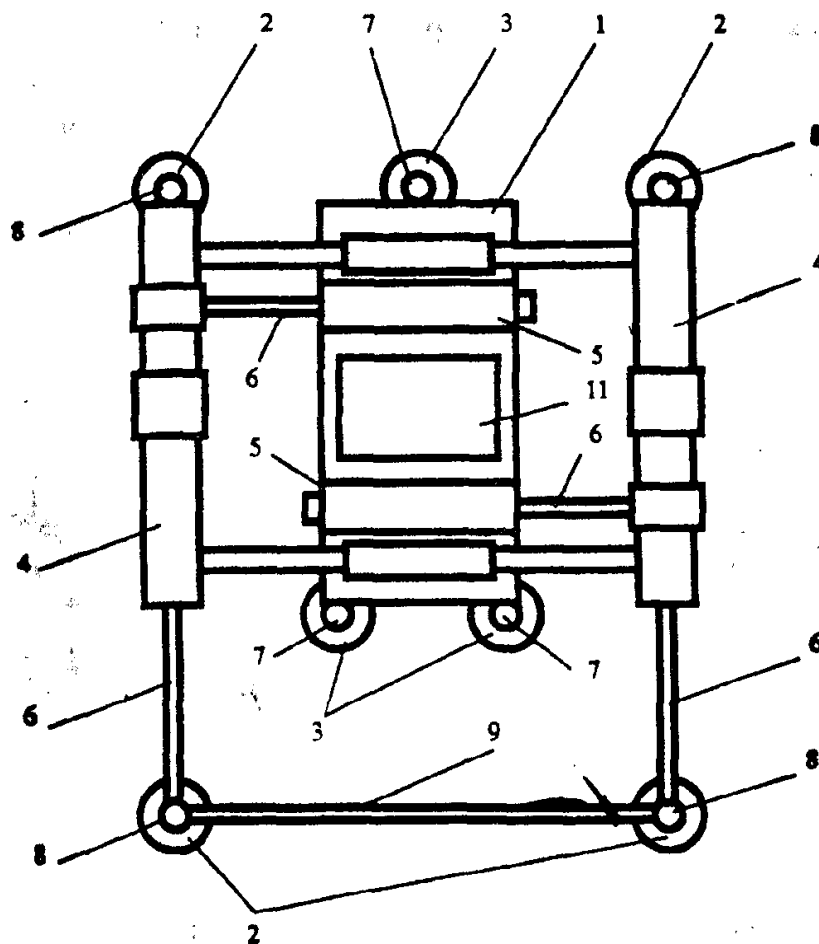


Рис. 2.10 Диагональная схема привода робота
платформа, 2,3 - педипуляторы. 4,5 - транспортные приводы, 6 - шток, 7,8 - приводы педипуляторов, 9 - силовая рама, 10 - направляющие, 11 - технологический блок.

Транспортный модуль робота имеет внешнюю и внутреннюю группу педипуляторов с вакуумными захватами (ВЗ). Два горизонтальных пневматических цилиндра установлены на платформе. Внешняя группа педипуляторов установлена на штоке вертикальных транспортных цилиндров с помощью внешних цилиндров подъема-опускания ВЗ. Внутренняя группа педипуляторов соединена с платформой с помощью внутренних цилиндров подъема-опускания ВЗ. Корпуса вертикальных транспортных цилиндров соединены со штоками горизонтальных транспортных цилиндров. Данная схема представляет собой конструкцию с непосредственным соединением вертикальных и горизонтальных транспортных цилиндров, позволяющую выполнять двухкоординатное движение без узла поворота и использовать, учитывая жесткость полученной конструкции, цилиндры с корпусами из пластиковых материалов. В результате вес робота становится минимальным, что дает возможность применять его, например, для чистки стекол.

Для повышения мобильности движения робота используется специальная схема привода педипуляторов, приведенная на рис. 2.11 а) и б).

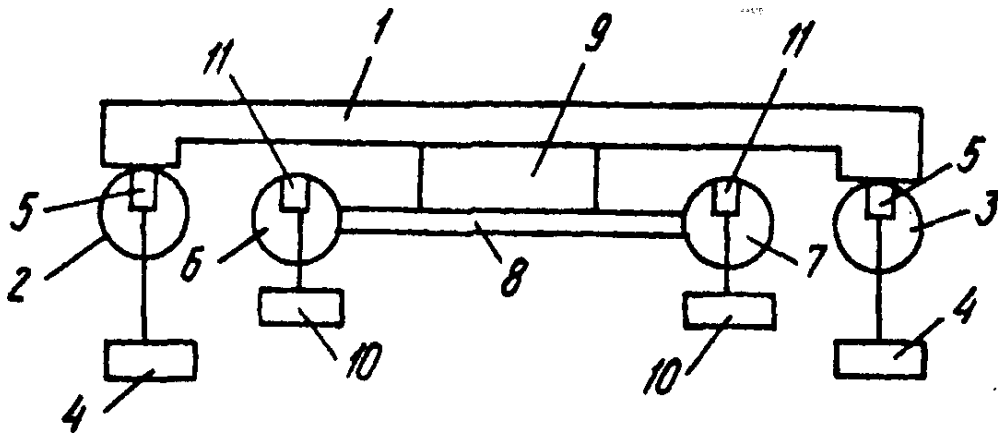


Рис. 2.11 а Робот повышенной мобильности (вид спереди)

Структура робота в этом случае состоит из платформы 1 (рис. 2.11 а), по краям которой установлены цилиндры 2 и 3, штоки которых связаны со стойками ходовых опор с захватами 4, а торцы - с направляющими 5. Цилиндры 6 и 7 связаны между собой консолью 8, по центру которой закреплен узел поворота 9. Входное звено узла 9 связано с центром платформы 1. Длина цилиндров 6 и 7 выполнена с возможностью разворота между цилиндрами 2 и 3 относительно центра платформы 1. Цилиндры 6 и 7 на концах штоков имеют стойки с захватами 10, а на торцах - направляющие 11. На концах штоков каждого цилиндра имеются пазы 12 и 13 (рис. 2.11 б), в которые вставлены стержни 14 и 15. На нижних концах стержней закреплены вакуумные захваты, а на верхних концах смонтированы шаровые опоры 16 и 17, подпружиненные соответственно пружинами 18 и 19. Форма направляющих 5 и 11 выполнена полупараболической с вершиной, направленной по ходу движения робота, и с возможностью перемещения вдоль нее шаровых опор 16 и 17 по всей длине хода штока.

При прямолинейном перемещении робота производится поочередное перемещение штоков пар пневмоцилиндров 2, 3 и 6, 7. При выдвинутых вперед штоках цилиндров 2 и 3 опоры 16 и 17 находятся в нижнем положении на направляющих 5 и, преодолевая усилия пружин 18 и 19, прижимают захваты 4 к поверхности перемещения. В захватах создается вакуум и робот удерживается на вертикальной поверхности. В этом положении штоки цилиндров 6 и 7 не выдвинуты и пружины 18 и 19 отжимают захваты 10 в верхнее положение.

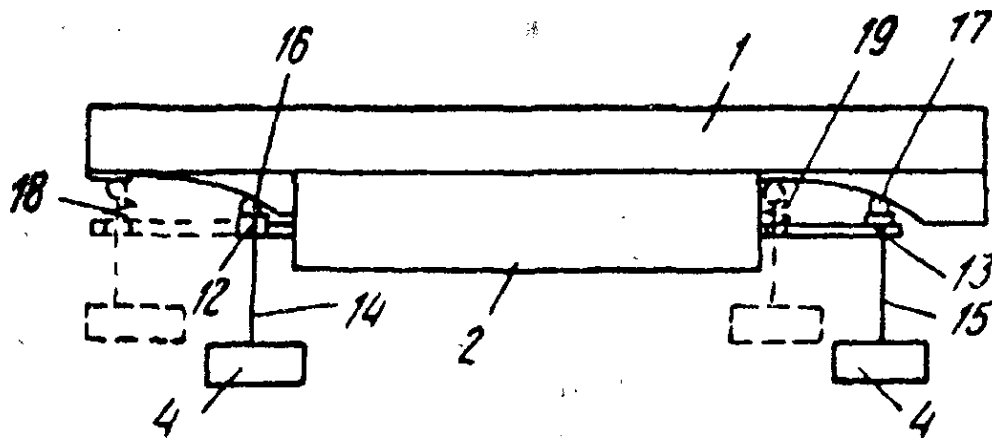


Рис. 2.11 б Робот повышенной мобильности (вид сбоку)

После этого в передние части цилиндров 2 и 3 подается давление и их корпуса вместе с платформой передвигаются на один шаг вперед. При этом захваты 4 продолжают работать, несмотря на то, что их штоки оказываются не выдвинутыми. Затем подается давление в задние полости цилиндров 6 и 7 и захваты 10 плавно, не задевая поверхности на конечном участке благодаря параболической форме направляющих 11 приводятся в положение контакта с поверхностью перемещения и фиксируются на ней. После этого снимается вакуум с захватов 4, которые пружинами 18 и 19 поднимаются в верхнее положение. Далее производится второй шаг платформы 1 путем подачи давления в передние полости цилиндров 6, 7 и последовательность действий повторяется.

Поворот робота осуществляется при поднятых захватах 10 и зафиксированных захватах 4 разворотом пневмоцилиндров 6 и 7 на требуемый угол узлом поворота 9. Затем описанным выше способом фиксируются захваты 10 и поднимаются захваты 4, и узел поворота 9 разворачивает платформу 1 с пневмоцилиндрами 2 и 3 по новому направлению движения, совмещая оси всех цилиндров. Таким образом достигается повышенная мобильность робота, а также уменьшение его веса и стоимости из-за исключения пневмоцилиндров подъема-опускания и необходимых для их управления электропневмоклапанов.

4. Выбор схемы привода в зависимости от вида обслуживаемого технологического объекта

Вид обслуживаемого технологического объекта определяет возможности робота по движению вдоль поверхностей различной геометрической формы.

В п. 3 были рассмотрены схемы приводов для движения по плоской поверхности и несущественно изогнутым поверхностям (до радиуса 6 м). Для движения по

несущественно изогнутым поверхностям достаточно использовать шарнирное соединение захватов в педипуляторе. Для движения по существенно изогнутым поверхностям и поверхностям труб применяются специальные приводов, способные адаптироваться под радиус поверхности перемещения.

На рис. 2.12 а) и б) показана схема приводов для движения по существенно изогнутым поверхностям и поверхностям труб.

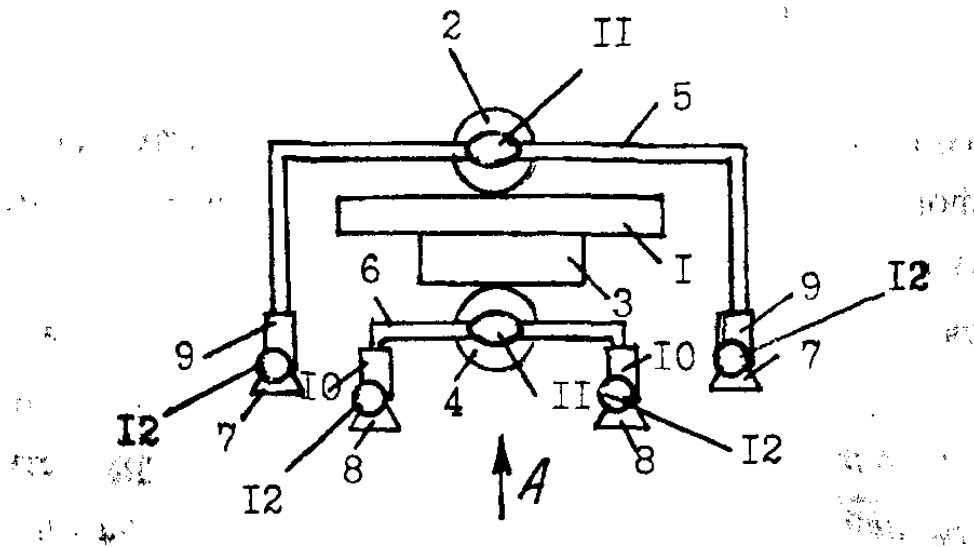


Рис. 2.12 а Робот для перемещения по внешним поверхностям труб (вид спереди)

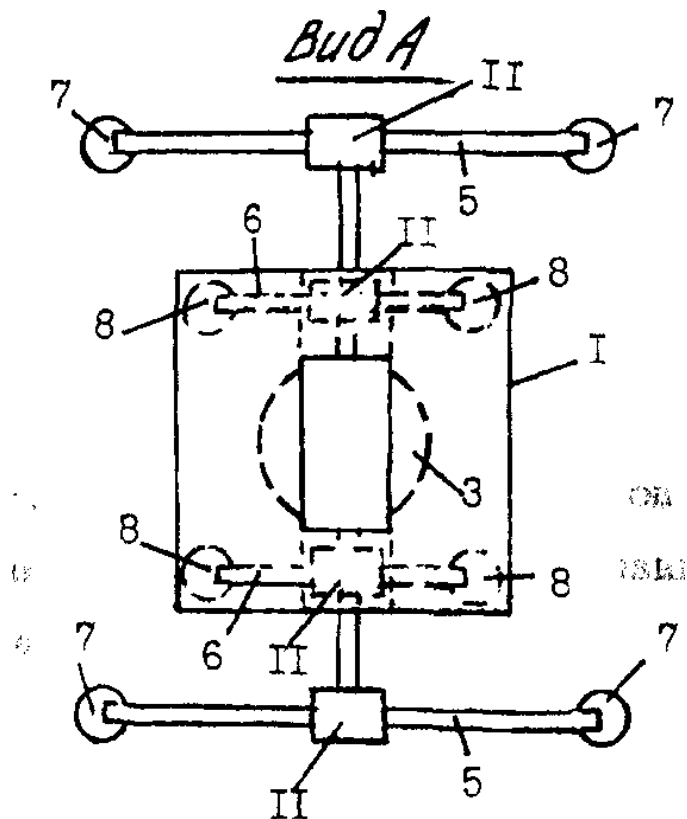


Рис. 2.12 б Робот для перемещения по внешним поверхностям труб (вид сверху)

Приведенная конструктивная схема, содержит платформу 1, на которой жестко установлен пневмоцилиндр 2 и через узел 3 поворота - пневмоцилиндр 4. На концах штоков пневмоцилиндров 2 и 4 выполнены соответственно сдвоенные консоли 5 и 6, на которых закреплены ходовые опоры в виде вакуумных захватов соответственно 7 и 8 с приводами подъема-опускания 9 и 10. Блоки поворота 11 консолей выполнены с возможностью складывания консоли в направлении поверхности трубы, по которой происходит перемещение робота. Вакуумные захваты имеют шаровые соединения 12. Консоль на 6 выполнена с возможностью разворота под консолью 5.

Алгоритм работы пневмоцилиндров состоит в следующем (рис. 2.12 в). При поступательном движении блоки 11 разворачивают захваты 7 до контакта с поверхностью трубы, при этом шаровые соединения 12 позволяют автоматически обеспечить полное прилегание захватов к поверхности. В этом положении блоки 11 фиксируются, обеспечивая адаптацию робота к данному диаметру трубы или отводятся в исходные положения при изменяющемся

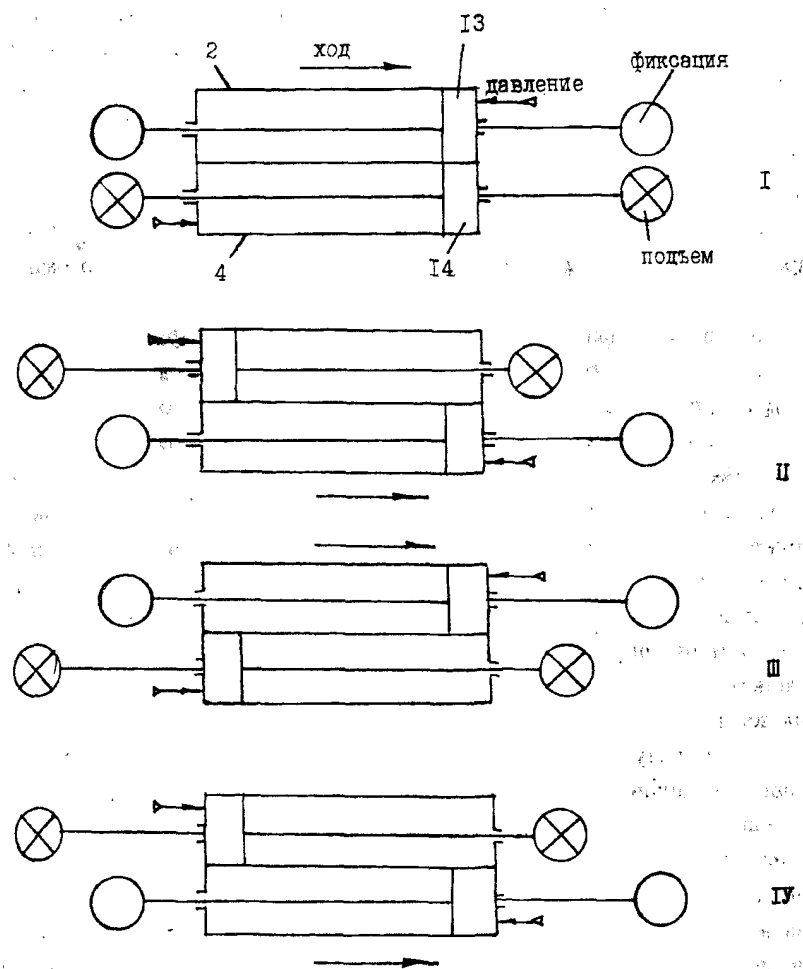


Рис 2.12 в Алгоритм работы пневмоцилиндров

диаметре трубы. При этом захваты 7 фиксируются, а захваты 8 подняты. Платформа 1 перемещается вместе с корпусом цилиндра 2 относительно неподвижного поршня 11 (рис 2.12 в, позиция 1) при подаче давления в правую полость цилиндра 2. Одновременно давление подается в левую полость цилиндра 4 для смещения поршня 12 в исходное положение. После окончания рабочего хода приводы 10 и 11 опускают захваты 8, которые фиксируются на поверхности. Затем освобождаются и поднимаются захваты 7 с помощью приводов 10. В правую полость цилиндра 4 подается давление, а платформа 1 вместе с корпусом цилиндра 4 относительно неподвижного поршня 12 выполняет очередной шаг. Одновременно давление подается в левую полость цилиндра 2 для смещения поршня 11 в исходное положение. Далее цикл движений повторяется.

При необходимости разворота платформы 1 фиксируются захваты 8, поднимаются захваты 7 и включается узел 3 поворота. После этого для движения в новом направлении ось цилиндра 4 совмещается с осью цилиндра 2 путем опускания и фиксации захватов 7, подъема захватов 8 и включения узла 3 поворота в соответствующем направлении. В зависимости от формы консолей 5 и 6 возможно перемещение робота как по внешней, так и по внутренней поверхности труб.

Таким образом, в структуре робота появляется блок адаптации, расширяющий его эксплуатационные возможности. Это позволяет строить более гибкие системы, одной из которых является система для вертикальных труб с локальными изгибами. На рис. 2.13 приведена схема СП ТРВП для перемещения внутри труб с изгибами. На роботе может быть установлена диагностическая аппаратура.

Движение робота производится с помощью поочередной фиксации опор опорных поясов и силового цилиндра. При отсутствии изгибов в трубе датчики не касаются ее поверхности, и робот перемещается прямолинейно. В данном режиме корректирующие клапаны соединены с атмосферой, на выходе элемента «ИЛИ» нет управляющего сигнала и силовой клапан связывает бесштоковую полость силового цилиндра с глухой камерой.

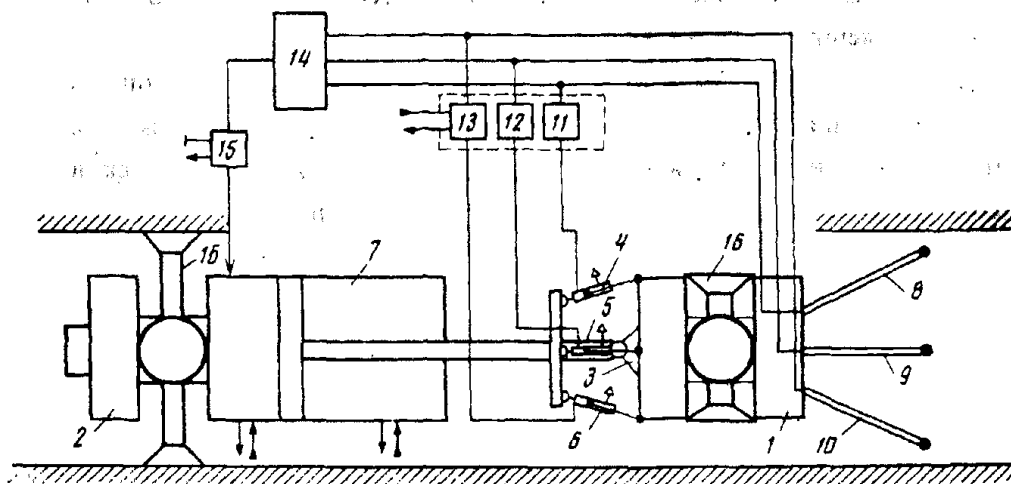


Рис. 2.13 Робот для перемещения по внутренней поверхности труб

1 - передний опорный пояс; 2 - задний опорный пояс; 3 - шарнир; 4, 5, 6 - корректирующие цилиндры; 7 - силовой цилиндр; 8, 9, 10 - датчики; 11, 12, 13 - корректирующие клапаны; 14 - элемент ИЛИ; 15 - силовой клапан; 16 - опоры

При подходе к изгибу трубы один или два датчика входят в контакт с внутренней поверхностью трубы и выдают сигналы на соответствующие корректирующие клапаны. Эти клапаны управляют корректирующими цилиндрами для перемещения переднего пояса вокруг шарнира в сторону исключения контакта датчиков с поверхностью трубы. Три датчика, расположенные под углом 120° по сечению трубы, позволяют обеспечить пространственное отслеживание произвольного изгиба оси трубы. В момент касания поверхности трубы хотя бы одним датчиком поступательное движение робота прекращается, так как на выходе элемента «ИЛИ» появляется сигнал на соединение бесштоковой полости силового цилиндра с атмосферой через силовой клапан. После коррекции положения переднего пояса поступательное движение робота продолжается до окончания рабочего хода силового цилиндра. При значительных изгибах трубы происходит несколько корректировок положения переднего пояса за один рабочий ход силового цилиндра. После этого передний пояс фиксируется на поверхности трубы, а задний пояс подтягивается к переднему. Затем цикл движений повторяется.

Перспективным направлением развития ТРВП является создание роботов, способных переходить с одной поверхности на другую в автоматическом режиме. Этот класс роботов в определенном смысле синтезирует в себе возможности рассматриваемых СП ТРВП.

На рис. 2.14 приведена схема робота, который обеспечивает переход на поверхность, расположенную под любым углом наклона (по величине и по знаку) к

направлению его движения. Разработанная конструкция содержит комбинированный привод перемещения двух платформ, содержащих гусеничный механизм со встроенными захватными устройствами, а также блок автоматической коррекции направления движения платформ при переходе робота с одной поверхности на другую.

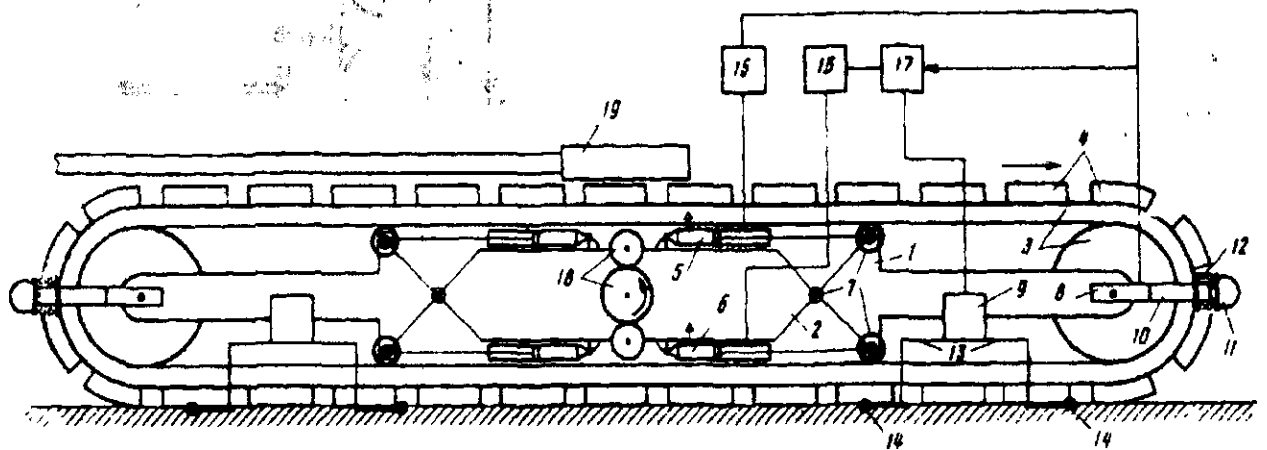


Рис. 2.14 Гусеничная схема робота

1 - платформа; 2 - корпус; 3 - гусеничный механизм; 4 - захватные устройства; 5, 6 - корректирующие цилиндры; 7 - шарниры; 8, 9 - выключатели; 10-щуп; 11 - датчик препятствия; 12 - пружина; 13 - датчик опоры; 14 - опоры; 15, 16 - клапаны; 17- реле; 18 - редуктор; 19 - канал питания.

Прямолинейное движение робота осуществляется посредством силового привода, который перемещает гусеничный механизм с захватными устройствами. При этом мощность силового привода должна обеспечивать отрыв от поверхности перемещения только одного захватного устройства в каждый момент времени, в то время как фиксация устройства осуществляется суммой всех контактирующих с поверхностью перемещения захватных устройств. Для возможности прохода неровностей при движении робота штоковые полости корректирующих цилиндров соединены с атмосферой через соответствующие клапаны, что придает конструкции необходимую податливость. При переходе на поверхность, составляющую с исходной поверхностью угол до 90° и больше, датчик препятствия входит в контакт с этой поверхностью и через щуп воздействует на выключатель, который включает соот-

ветствующий корректирующий цилиндр. Поскольку корректирующие цилиндры связаны с передней платформой, то она переходит на новую поверхность. Если эта поверхность имеет наклон больше 90° , то во время перехода датчик препятствия вдавливают подпружиненное звено щупа, не создавая механического сопротивления движению и, в тоже время, поддерживая выключатель вертикали в замкнутом состоянии. Сигнал с выключателя вертикали на релейный элемент позволяет перед отрывом датчика опоры от поверхности перемещения разомкнуть управляющую цепь соответствующего корректирующего цилиндра, что обеспечивает движение робота по потолку.

При выходе на новую поверхность ее контакт с датчиком препятствия прерывается и выключатель через клапан соединяет штоковую полость соответствующего корректирующего цилиндра с атмосферой. Релейный элемент при этом снова замыкается. Находясь на ровной поверхности, гусеничный механизм автоматически выравнивает положение платформ. При переходе на поверхность, составляющую отрицательный угол с исходной (поворот вправо на рис. 2.14), датчик опоры выходит из контакта с поверхностью перемещения и выключатель опоры замыкается. В результате задействуется соответствующий корректирующий цилиндр и происходит аналогичный вышеописанному процесс перемещения передней платформы вниз до момента касания датчиком опоры новой поверхности перемещения.

Для обеспечения заднего хода задействуются симметричные блоки задней платформы. Поворот робота осуществляется путем сдвигания рассмотренной конструкции на общем корпусе и независимого управления скоростью каждого гусеничного механизма. Эта функция реализуется системой управления робота. В целом рассмотренная структура обладает высоким быстродействием, а следовательно и высокой производительностью,

Простейшим случаем рассмотренного принципа является использование колеса при переходе с одной поверхности на другую. Другим принципом, наравне с циркульным переходом, является схема с подвижным соединением двух платформ (рис. 2.15).

Конструкция робота состоит из первой основной платформы 1 и второй дополнительной платформы 2, которые соединены подвижным соединением в виде зубчатой передачи (шарнира) 3 по своим торцам. Платформа 1 содержит пневмоцилиндры 4 поступательного движения, на концах штоков которых установлены вакуумные захваты 5, содержащие приводы 6 подъема-опускания. На платформе 1

установлены также пассивные вакуумные захваты 7 со своими приводами 8 подъема-опускания. Подвижное соединение 3 приводится в движение моментным двигателем 9. На платформе 2 установлен поворотный узел, содержащий червячное колесо 10, жестко связанное с пневмоприводом 11 подъема-опускания дополнительных вакуумных захватов 12 и через червяк 13 - с выходным валом двигателя 14, корпус которого смонтирован на платформе 2, которая подвижно связана с пневмоприводом 11 подшипниками 15.

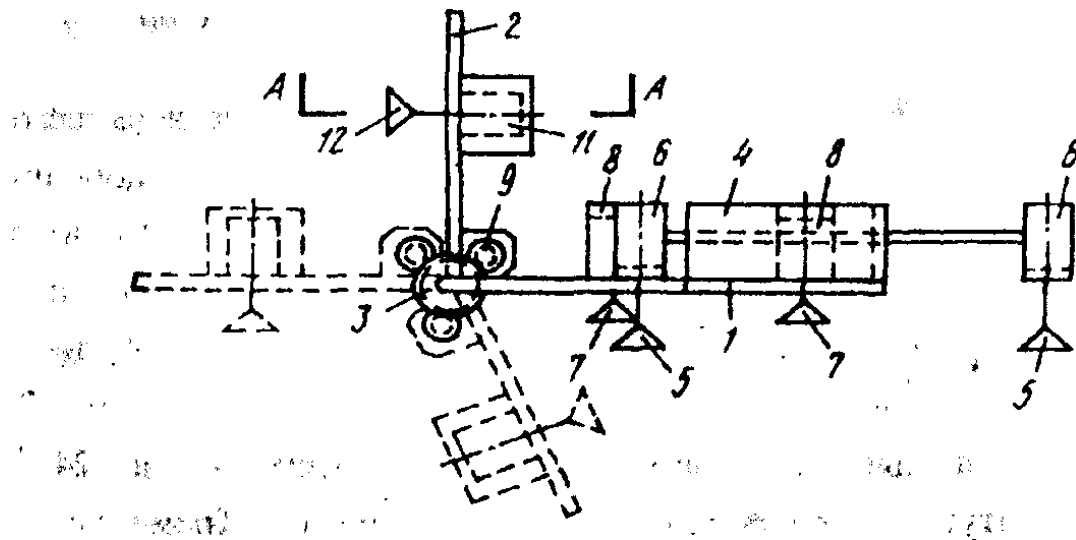


Рис. 2.15 а Схема робота: средства с вариантом исполнения подвижного соединения с электроприводом

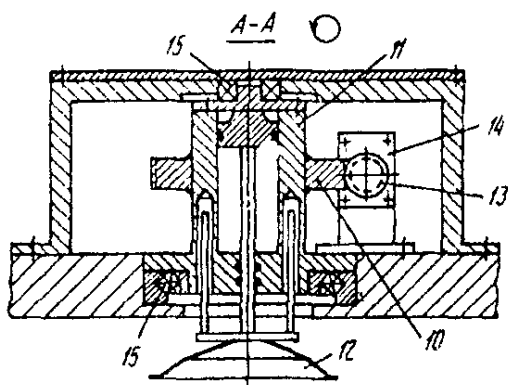


Рис. 2.15 б Механизм поворота платформы

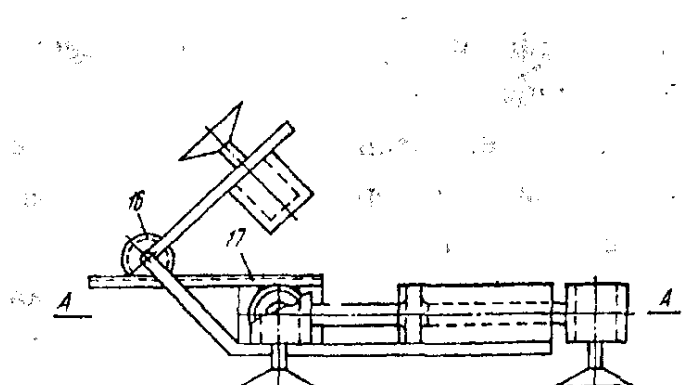


Рис.2.15 в Вариант исполнения

платформ
соединения

подвижного

с пневмоприводом

(вид

сбоку)

Вариантом выполнения подвижного соединения, обеспечивающего поворот относительно платформы 1 платформы 2 без использования дополнительного привода может быть механизм, содержащий шестерню 16 (рис. 2.15 в), связанную с дополнительной платформой 2 и сходящую в зацепление с рейкой 17, жестко связанной с корпусом пневмоцилиндра 18 с двумя пружинами 19, двумя поршнями 20 и межпоршневой полостью 21. На штоках 22 пневмоцилиндра 18 размещены пальцы 23, находящиеся в разрезных фиксирующих втулках 24. Разрезные фиксирующие втулки 24 жестко связаны с платформой 1. Кроме того, на приводах 6 подъема-опускания установлены направляющие втулки 25. При этом ход В штоков 22 больше ширины Г разрезных фиксирующих втулок 24, а ширина Г больше расстояния Е от торцов пальцев 23 до торцов направляющих втулок 25.

Пальцы 23 выполнены так, что их часть диаметром D больше разреза Ж (рис. 2.15 д) в разрезных фиксирующих втулках 24, а часть диаметром d меньше разреза Ж.

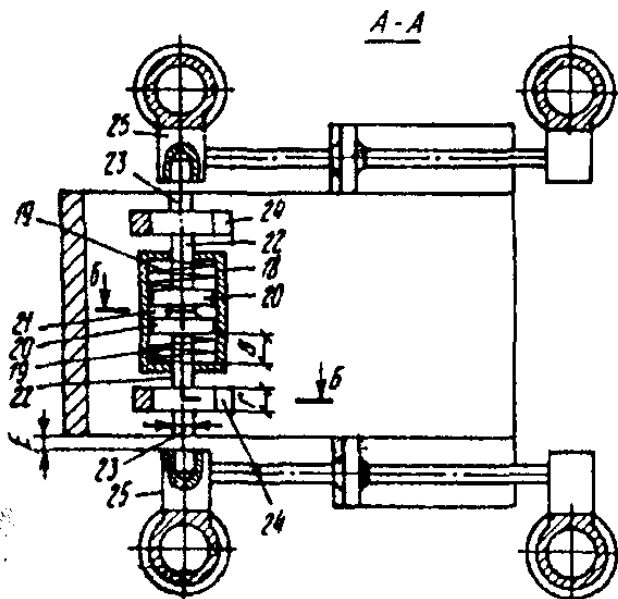


Рис. 2.15 г Вид по разрезу А - А
разрезу Б - Б

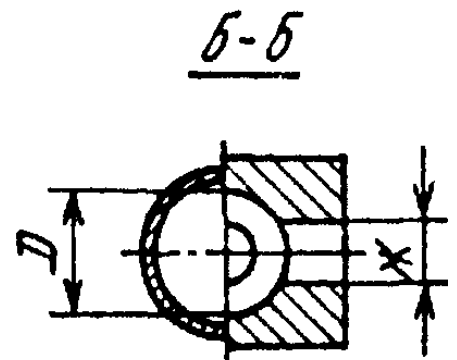


Рис. 2.15 д Вид по

При перемещении по поверхности задействуется основная платформа 1 (рис. 2.15 е, позиция I), а дополнительная платформа 2 находится в транспортном положении. Перемещение осуществляется с помощью пневмоцилиндров 4 путем переменной фиксации и поднятия захватов 5 и 7 приводами 6 и 8. При подходе к поверхности, расположенной под некоторым углом к поверхности перемещения устройства, задействуется двигатель 9 и платформа 2 поворачивается до момента

упора захвата 12 в новую поверхность (позиция П). Момент упора может быть зафиксирован датчиком вакуума, связанным с полостью захвата 12, который закрепляется на новой поверхности, после чего захваты платформы 1 освобождаются. С помощью моментного двигателя 9 платформа 1 переводится на платформу 2 (позиция III). Для осуществления перемещения по новой поверхности узел поворота обкатыванием червяка 13 при включении двигателя 14 разворачивает обе платформы относительно червячного колеса 10 шарниром 3 по ходу движения (позиция IV). После этого платформа 1 с помощью двигателя 9 переводится на новую поверхность и фиксируется на ней (позиция V). Захват 12 освобождается, и платформа 2 перемещается в транспортное положение (позиция VI).

Изменение направления движения транспортного средства осуществляется путем перевода платформы 1 на платформу 2 и ее поворота относительно зафиксированного захвата 12. Величина выступов, которые могут быть преодолены при переходе с одной поверхности на другую, регулируется выдвиганием штока пневмопривода 11. В случае выполнения подвижного соединения 3 без использования дополнительного двигателя поворот платформы 2 относительно платформы 1 производится следующим образом.

Штоки пневмоцилиндра 4, а вместе с ними и приводы 6 выдвигаются в крайнее положение таким образом, чтобы направляющие втулки 25 оказались соосны с пальцами 23. Затем подается давление в полость 21, при этом штоки 22 выдвигаются из пневмоцилиндра 18 и выталкивают пальцы 23 из втулок 24. При этом движении пальцы 23 входят в направляющие втулки 25 до того, как часть пальцев 23 диаметром D выйдет из разрезных фиксирующих втулок 24. При этом пальцы 23 получают возможность пройти через разрез в разрезной фиксирующей втулке 24. В результате этого движения пальцев 23 рейка 17 связывается через приводы 6 со штоками пневмоцилиндра 4 и освобождается от фиксации с основной платформой 1 только после того, как она зафиксируется пальцами 23 в направляющих втулках 25. Затем движением штоков пневмоцилиндра 4 приводится в движение рейка 17, которая вращает шестерню 16, а вместе с ней и платформу 2. При этом пальцы 23 выходят из разрезов втулок 24.

При фиксации платформы 2 в транспортном положении штоки пневмоцилиндра 4, а вместе с ними и приводы 6 выдвигаются в крайнее положение таким образом, чтобы пальцы 23 вошли обратно во втулки 24. Затем снимают давление из

полости 21 и под действием пружин 19 штоки 22 вместе с пальцами 23 возвращаются в исходное положение. В результате пальцы 23 входят стороной с диаметром D в разрезные фиксирующие втулки 24 и выходят из направляющих втулок 25, фиксируя таким образом платформу 2 относительно платформы 1. При этом пневмоцилиндры 4 могут функционировать в режиме поступательного движения робота.

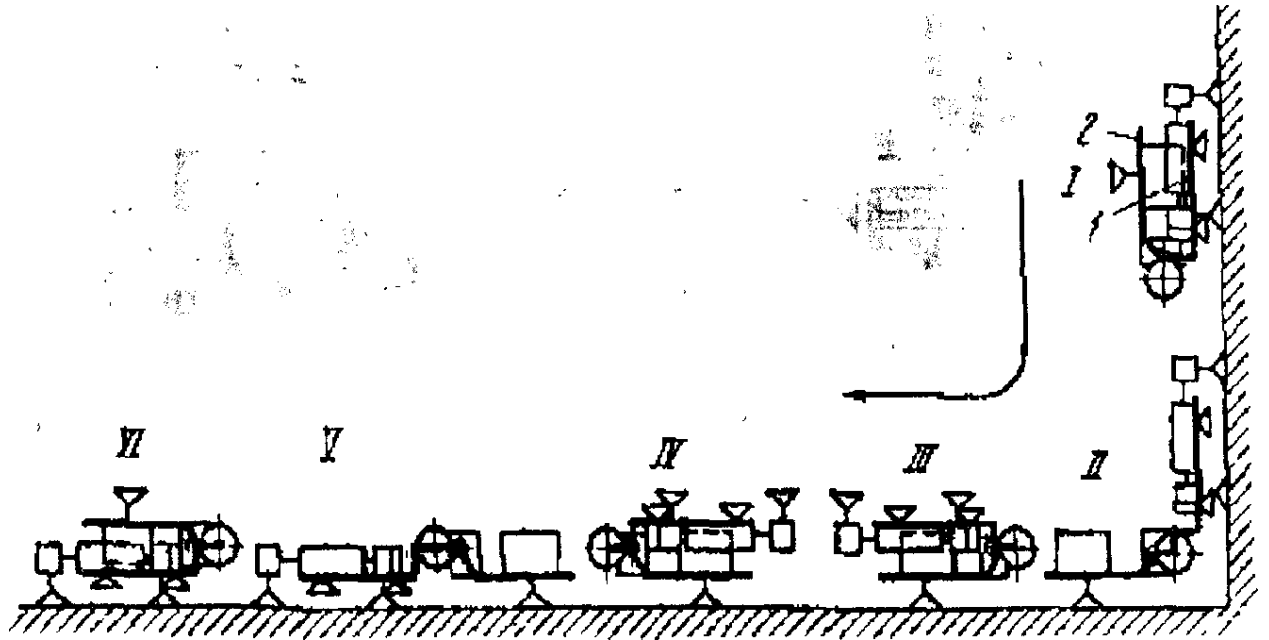


Рис. 2.15 е Алгоритм перехода с поверхности на поверхность

Таким образом, данная схема сочетает в себе простоту конструкции и гибкость выполнения перехода с одной поверхности на другую, расположенную под произвольным углом. Рассмотренная схема обеспечивает высокую несущую способность робота благодаря жесткости ее конструкции.

Многозвенная схема также позволяет реализовать автоматический режим перехода с одной поверхности на другую. Конструктивная реализация данной схемы приведена на рис. 2.16 а). На рис 2.16 б) дана схема расположения датчиков, а на рис. 2.16 в) - схема перехода.

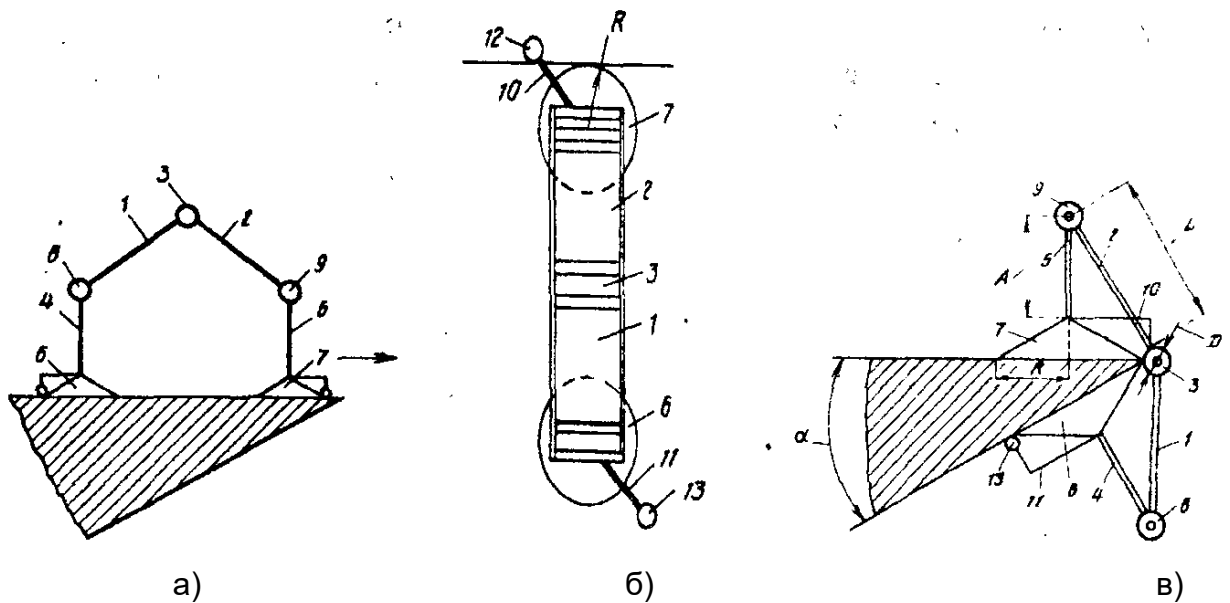


Рис. 2.16 Многозвенный шагающий аппарат

Робот содержит бедра 1 и 2, соединенные через поворотный узел 3. каждое из которых связано по меньшей мере с одной из голени 4 и 5, снабженных опорами в виде вакуумных захватов 6 и 7. Голени связаны с бедрами соответственно поворотными узлами 8 и 9.

На опорах 6 и 7 закреплены по ходу движения устройства под углом к его оси кронштейны 10 и 11, на торцах которых находятся датчики 12 и 13 определения наличия поверхности. Они могут представлять собой как контактные датчики типа щупов с конечными выключателями, так и бесконтактные датчики типа локационных струйных датчиков, способных определять край поверхности перемещения устройства [83].

Проекция длины кронштейнов 10 и 11 на продольную ось устройства равна радиусу захватов 6 и 7. Длина бедер равна

$$L = \sqrt{A^2 + R^2} + D/2,$$

где A - длина голени с учетом высоты захвата, R - радиус захватов, а D - диаметр поворотного узла.

При движении по плоскости захваты с помощью узлов 3, 8 и 9 поочередно перемещаются в направлении движения. Во время перемещения одного захвата, другой фиксируется на поверхности путем подачи в него вакуума, что стабилизирует конструкцию при движении. В перемещаемом захвате вакуум отсутствует, что позволяет ему двигаться вдоль поверхности, обеспечивая отслеживание наличия поверхности перед собой с помощью установленного на нем датчика.

В момент сигнала с датчика 12 об отсутствии поверхности перемещения захват 7 автоматически фиксируется у края поверхности, благодаря заданным размерам кронштейна 10. После этого снимается вакуум с захвата 6, и узел 9 переводит узел 3 на край поверхности, что гарантируется заданной длиной бедра 2 с учетом диаметра узла 3. Затем узлы 3 и 8 перемещают бедро 1 голень 5 до срабатывания датчика 13, фиксирующего наличие новой поверхности под захватом 6. Алгоритм движения перехода не зависит от угла между поверхностями. Далее подается вакуум в захват 6, снимается вакуум в захвате 7 и соответствующим поворотом узлов 9, 3 и 8 голень 4 перемещается на новую поверхность до получения сигнала о ее наличии с датчика 12. После этого производится движение по новой поверхности. Оперативное изменение направления движения при перемещении по плоскости осуществляется с помощью узлов поворота 8 или 9 при соответственно зафиксированных опорах.

Таким образом, особенностью данной конструкции является повышенная маневренность при выполнении перехода робота с одной поверхности на другую в автоматическом режиме.

Лекция

Тема 3.2.3. Испытания и анализ функционирования роботов вертикального перемещения в различных технологических комплексах

ВОПРОСЫ

1. Робот вертикального перемещения для операций очистки.
2. Робот вертикального перемещения в робототехническом комплексе дезактивации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Градецкий В.Г., Рачков М.Ю. Роботы вертикального перемещения. М.: Тип. МО РФ. 1997, 223 с. (с.163-212).

1. Робот вертикального перемещения для операций очистки

Одной из основных направлений применения ТРВП для очистки является очистка больших стеклянных поверхностей и окон высотных зданий и сооружений. Особенностью данной операции является хрупкость поверхности перемещения робота. Для этой цели был разработан робот с минимальным весом, способный переносить технологическое оборудование очистки при обеспечении необходимой жесткости конструкции.

Общая схема приводной системы робота построена по схеме сканирующего транспортного модуля робота. Он имеет внешнюю и внутреннюю группу педипуляторов с вакуумными захватами. Два горизонтальных пневматических цилиндра установлены на платформе. Внешняя группа педипуляторов установлена на штоке вертикальных транспортных цилиндров с помощью внешних цилиндров подъема-опускания ВЗ. Внутренняя группа педипуляторов соединена с платформой с помощью внутренних цилиндров подъема-опускания ВЗ.

Пневматический контур ТРВП показан на рис. 8.1.

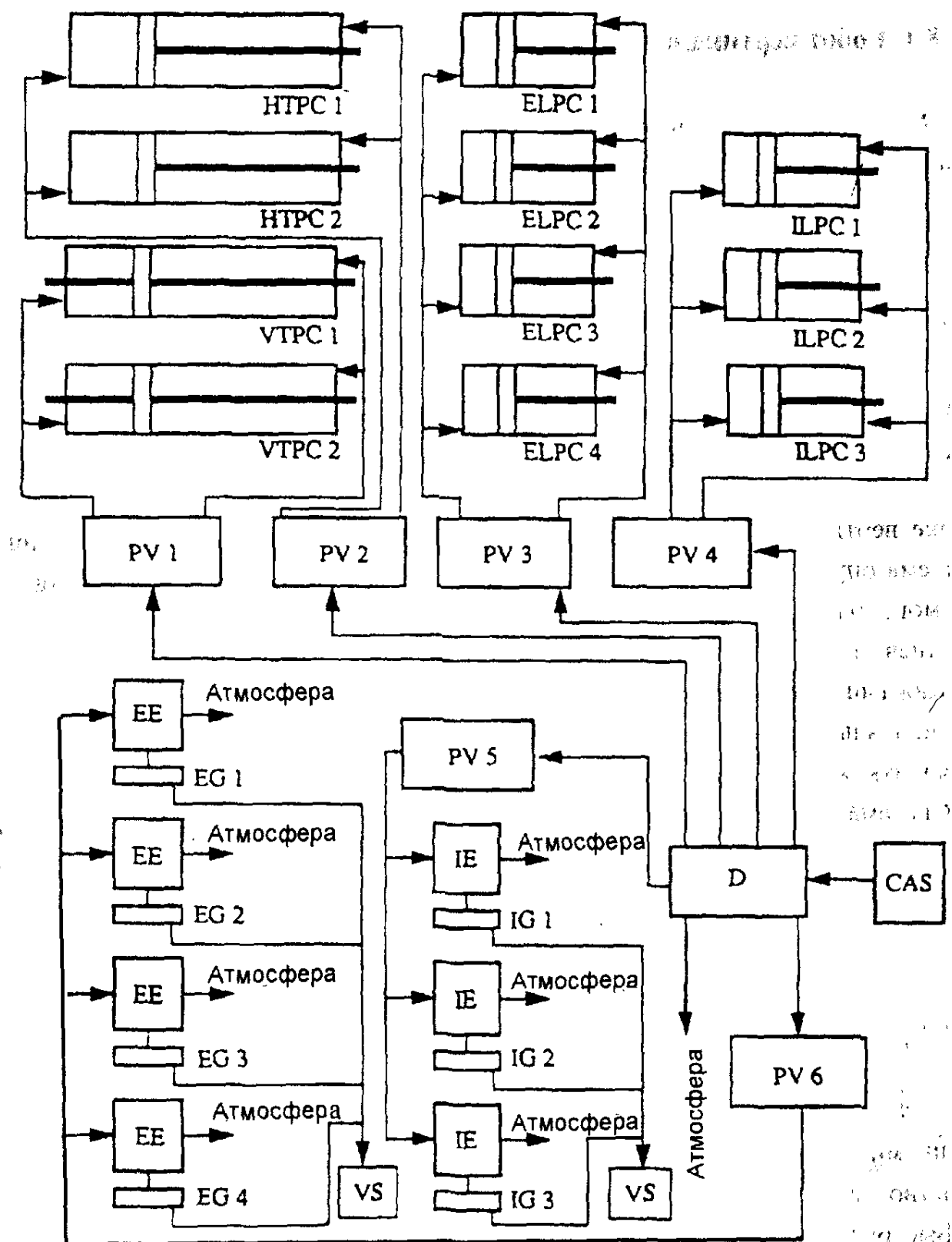


Рис. 8.1 Пневматический контур ТРВП

Каждый ВЗ питается от автономного эжектора. Силовые направляющие между вертикальным транспортным цилиндром и платформой позволяют достичь дополнительную жесткость робота.

Система запитывается сжатым воздухом, который подается на транспортный модуль по питающему кабелю. Далее воздух с помощью распределителя D поступает на вход шести электропневматических клапанов (PV1 - PV6).

Вертикальные транспортные цилиндры VTPC и горизонтальные транспортные цилиндры HTPC управляются клапанами PV1 и PV2 соответственно. Четыре горизонтальных внешних цилиндра подъема-опускания ELPC и три внутренних цилиндра подъема-опускания ILPC управляются с помощью клапанов PV3 и PV4 соответственно. Клапан PV5 питает четыре автономных эжектора EE для управления внешними захватами EG. Внутренние захваты IG управляются с помощью PV5 посредством соответствующих эжекторов.

Быстрый переход от вертикального к горизонтальному движению возможен благодаря прямому соединению вертикальных и горизонтальных транспортных цилиндров. Блок питания C AS через коллектор D подает сжатый воздух на систему захватов, контролируемую датчиками вакуума VS.

Основные технические характеристики разработанного ТРВП для очистки:

1. Нагрузка
 - номинальная транспортная 10 кгс
 - стационарная 20 кгс
2. Собственный вес 3,5 кгс
3. Максимальный шаг 80 мм
4. Диапазон скоростей шага (10-50) мм/с
5. Максимальная высота шага 40 мм
6. Число степеней свободы 3
7. Система захватов
 - тип вакуумная
 - число внешних захватов 4
 - число внутренних захватов 3
 - источник вакуума автономные эжекторы
 - число эжекторов 7
8. Технологическое оборудование
 - для стеклянных поверхностей привод с обратнопоступательным движением щетки
 - для металлических и бетонных поверхностей привод с вращательным движением щетки
9. Габаритные размеры

Управление цифровых образовательных технологий

- длина 540 мм
- ширина 430 мм
- высота 180 мм

10. Питание

- давление воздуха 0,5 МПа
- расход воздуха (максимальный) 70 л/мин
- напряжение питания клапанов 24 В (0,5А)
- напряжение питания технологического привода 12 В (5А)

11. Система управления

ручная и программная

Внешний вид ТРВП с наличием защитного кожуха и без него приведен соответственно на рис. 8.2 а. б.

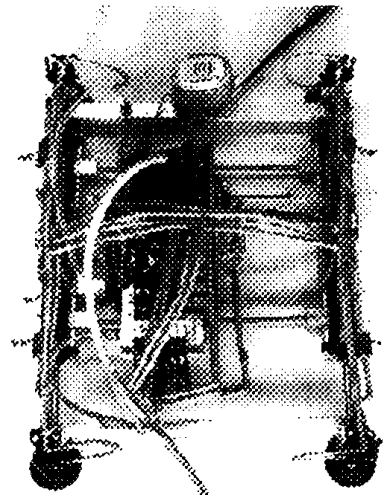
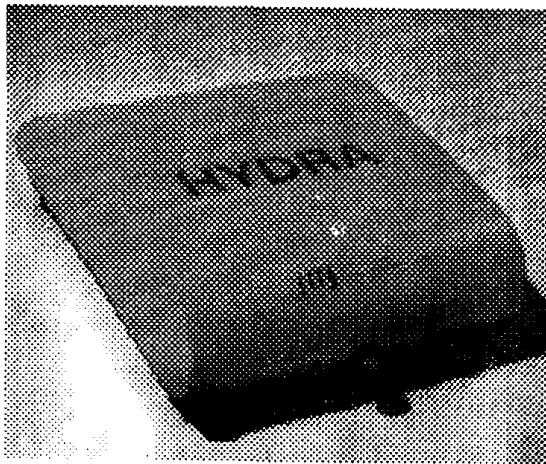


Рис. 8.2 ТРВП для очистки

Алгоритм управления движением робота показан на рис. 8.3

Элементы приводов

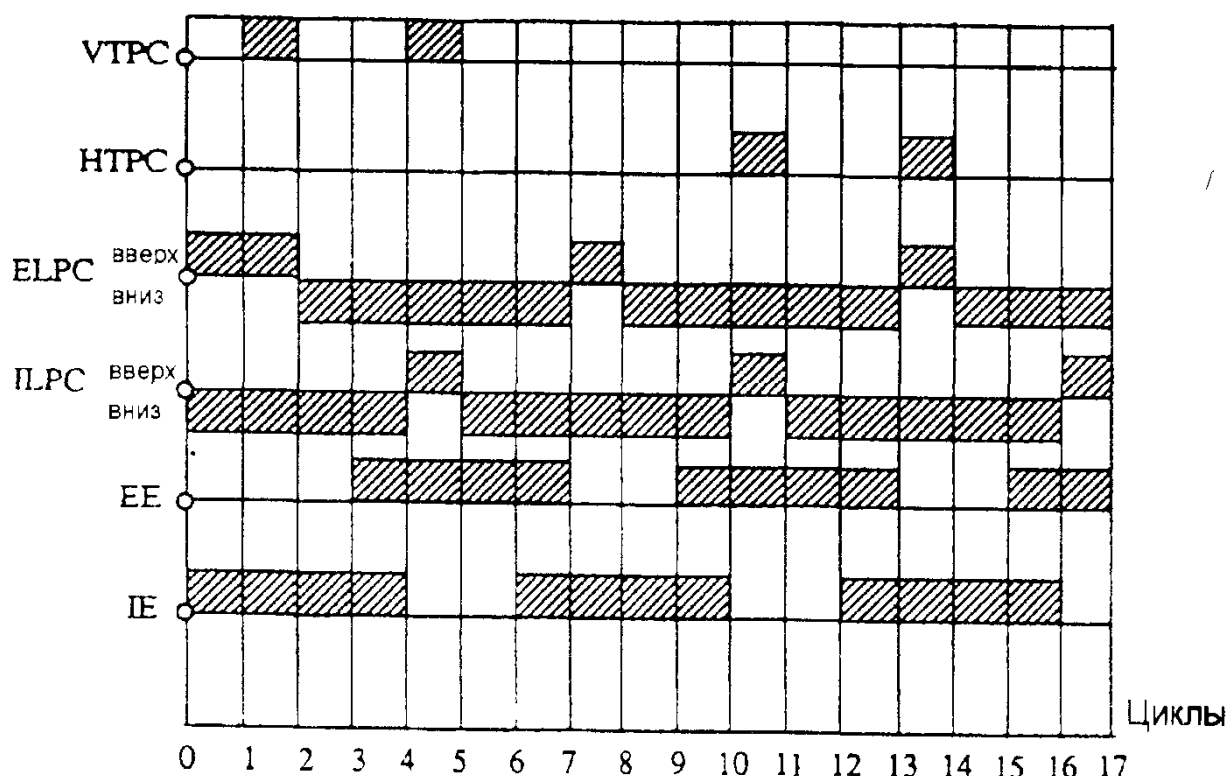


Рис. 8.3 Алгоритм управления движением робота

Один шаг вертикального движения занимает первые восемь циклов. Промежуточное движение занимает циклы с 8 по 10. С 10 по 17 цикл выполняется горизонтальное движение.

Система управления расположена как на борту робота, так и на наземном блоке управления. Главный компьютер, установленный и на наземном блоке управления, используется в основном для диалога между оператором и ТРВП. Бортовой компьютер выполняет функции безопасности электронной и механической частей робота. Главный компьютер базируется на процессоре Motorola. Периферийная электроника на борту включает мониторинг параметров. Система управления ТРВП обеспечивает адаптивный контроль положения ВЗ во время движения для предотвращения утечек вакуума, приводящих к неплотному захвату поверхности.

Схема применения ТРВП для чистки стеклянных поверхностей показана на рис. 8.4. Технологическое оборудование состоит из щетки 5, закрепленной на системе приводов возвратно-поступательного движения 6. Тип привода зависит от требуемой технологической скорости. Сопло 7 для распыления чистящего раствора установлено на платформе робота для того, чтобы обслуживать рабочую зону 8 щетки.

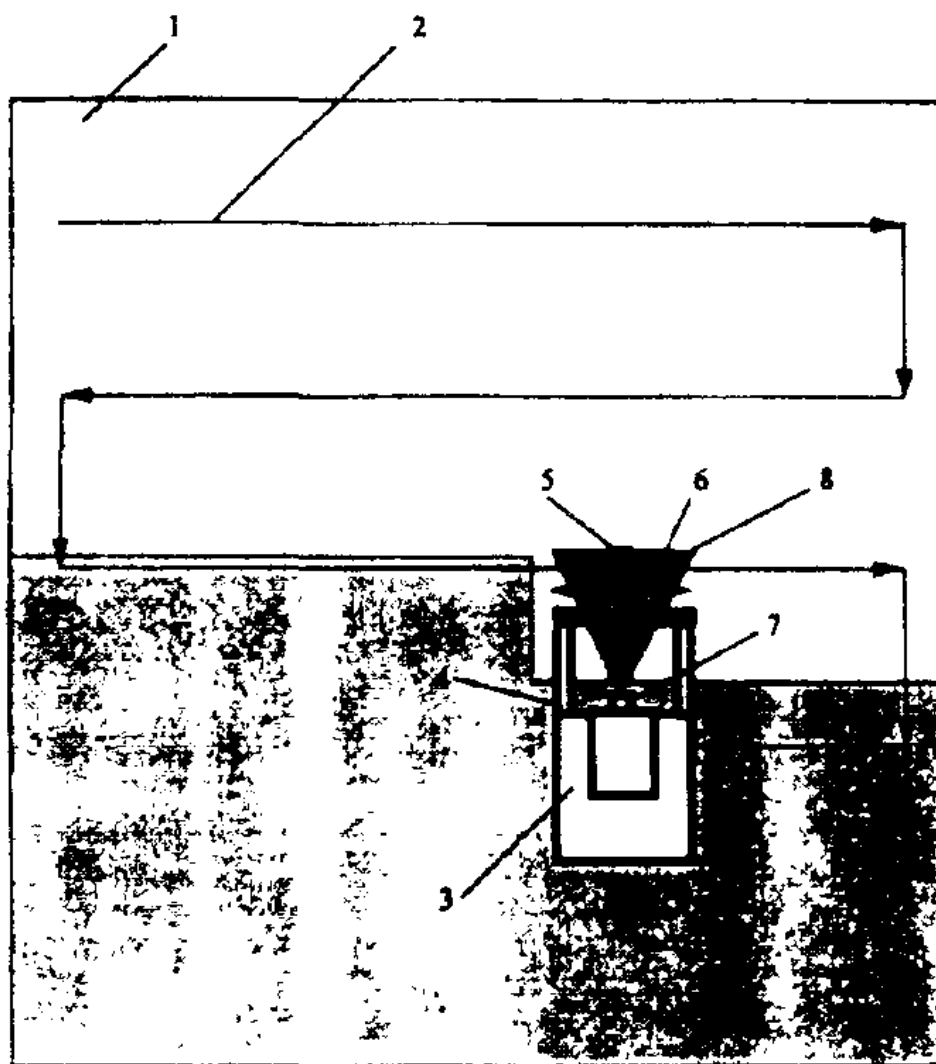


Рис. 8.4 Очистка стеклянных поверхностей

Траектория 2 движения ТРВП 3 начинается с верхней части поверхности 1. Технологический узел 4 постоянно находится в верхней части ТРВП во время движения. Это обеспечивает контакт захватов с поверхностью перемещения только на сухой части поверхности, что дает отсутствие проскальзывания захватов по влажной части поверхности после ее чистки и предохраняет поверхность от загрязнения.

На рис. 8.5 показана схема движения ТРВП при чистке металлических, бетонных и кирпичных поверхностей.

Особенностью данного применения является необходимость достаточно высокого чистящего усилия. Для обеспечения указанного усилия используется привод с вращательным движением 6 щетки 5. Обычно чистка этих поверхностей выполняется механически без применения химических чистящих растворов.

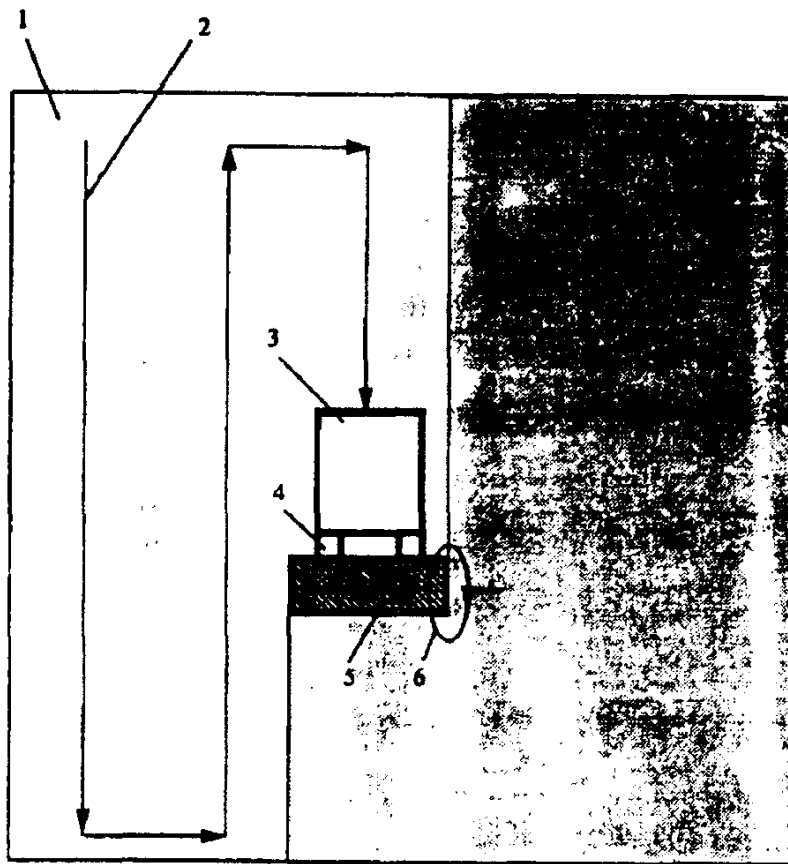


Рис. 8.5 Очистка металлических поверхностей

Щетка изготавливается из различных рабочих материалов в зависимости от вида очищаемой поверхности. Так, например, для очистки металла от ржавчины наиболее пригодна щетка, изготовленная из высокопрочной стальной проволоки.

Технологическое движение ТРВП 3 в данном случае целесообразно начинать с боковой части очищаемой поверхности 1, как это показано на рис. 8.5. В этом случае технологический узел 4 находится всегда впереди ТРВП по его движению, что позволяет производить захват уже очищенной поверхности. Такая траектория 2 движения повышает надежность перемещения робота и уменьшает вероятность утечек вакуума из-под захватов.

2. Робот вертикального перемещения в робототехническом комплексе дезактивации

Дальнейшим развитием автоматизации очистных операций является создание комплекса дезактивации помещений и сооружений АЭС в условиях радиоактивных загрязнений. При этом ТРВП входит в состав комплекса как часть, автоматически взаимодействующая с технологическим роботом горизонтального перемещения.

Схема комплекса дезактивации приведена на рис. 8.6.

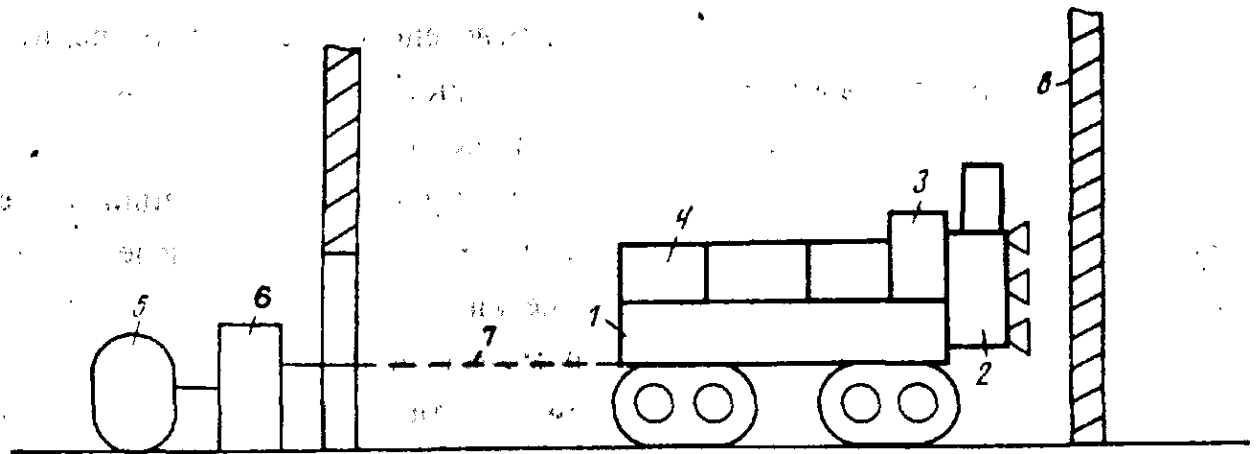


Рис. 8.6 Схема комплекса дезактивации

1 - робот горизонтального перемещения; 2 - робот вертикального перемещения с технологическим оборудованием; 3 - блок сопряжения роботов вертикального и горизонтального перемещения; 4 - блок питания; 5 - оператор; 6 - пульт управления; 7 - канал управления; 8 - поверхность обработки

Для повышения маневренности и расширения выполняемых функций в созданный мобильный робототехнический комплекс включены автоматически управляемый робот горизонтального перемещения, установленный на нем робот вертикального перемещения и манипулятор для сцепления робота вертикального перемещения с поверхностью. Управление комплексом может осуществляться от единого пульта, в автономном, в супервизорном или в автоматическом режимах. Пульт управления находится в отдельном помещении на безопасном расстоянии от места выполнения работ роботом в экстремальной среде.

Для правильного синтеза структуры ТРВП с учетом специфики поставленной задачи, включающей перемещение технологического оборудования по выбранной траектории, в частности, в условиях неопределенности внешней ситуации, необходимо предварительное проведение моделирования ориентации и передвижения транспортного модуля ТРВП.

Применение моделей в процессах управления сложной многосвязной системой, каковой является подвижный робот, имеет ряд особенностей. Это прежде всего недостаточное соответствие между событиями внешней среды и модельным представлением о них, которым наделяется искусственный интеллект робота. Кроме того, в многосвязной системе много переменных, поэтому использование обобщенных модельных представлений связано с редукцией данных и нечеткостью

описания модели. Отображение внешнего мира в базе знаний автономной мобильной робототехнической системы, использующей визуальную информацию, носит часто описательный характер на естественном языке. В результате лингвистическое описание событий в базе знаний должно быть переведено в адекватную аналитическую форму. Все это вызывает определенные трудности при анализе и имитационном моделировании систем типа подвижного робота.

По этим причинам для разработки модели процесса ориентации и передвижения ТРВП целесообразным становится применение теории нечетких множеств [36]. Эта теория позволяет принимать четкие решения («дефазификаторы») при нечеткой исходной информации. Модель может учитывать как описательный (обобщенный) характер поступающей информации, так и неопределенность в восприятии и поведении робота, связанную с недостаточным соответствием между внешними событиями и субъективным представлением о них.

В качестве математического аппарата для моделирования ориентации и движения ТРВП используется теория нечетких моделей. Процедурные правила нечеткого контроллера постулируются в форме линейных уравнений с переменными коэффициентами [121].

Процедурное контрольное правило ($i=1, 2, \dots, m$) записывается в форме

$$R^i : x_1 \text{ есть } A_1^i, x_2 \text{ есть } A_2^i, \dots, x_n \text{ есть } A_n^i, \\ \rightarrow y^i = P_0^i + P_1^i x_1 + \dots + P_n^i x_n, \quad j=1, 2, \dots, n, \quad (8.1)$$

где A_j^i - нечеткие переменные, характеризующие в лингвистической форме переменные x_j на входе; P_j^i -коэффициенты в линейном уравнении для правила R^i ; y^i - угол поворота ТРВП относительно предыдущего его положения. Функция принадлежности μ нечеткого множества X записывается как $\mu(X)$ и аппроксимируется функциями (R-L)-типа [34]. Переменные A_j^i и x_j определяются в конкретной ситуации предметной областью исследования и описаны ниже для ТРВП (рис. 8.7). По входным значениям $x_1^0, \dots, x_n^0$ выход (угол поворота робота на y^0 градусов) определяется через усреднение весов переменных: $y^1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y^i$.

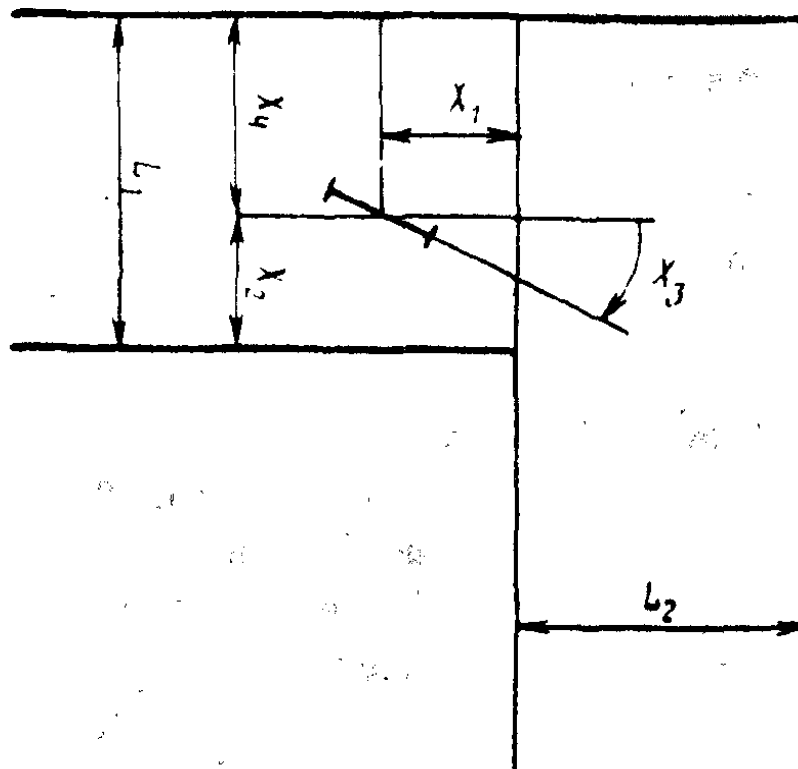


Рис. 8.7 Параметры управления

Определение входных переменных X_1 – X_4

$$y^o = \sum_{i=1}^m W^i y^i / \sum_{i=1}^m W^i, \quad (8.2)$$

$$W^i = \bigwedge_{j=1}^n \mu_j^i(x_j^o), \quad j=1, 2, \dots, n. \quad (8.3)$$

Количество m нечетких правил в алгоритме управления соответствует числу тех комбинаций лингвистических переменных A_j^i ($j = 1, \dots, n$; $i = 1, \dots, m$), которыми можно описать данное положение робота $(x_1^0, \dots, x_n^0)$.

Идентификация правил нечеткого алгоритма управления заключается в определении:

- числа нечетких градаций пространства входа (например, маленький, средний и большой для x_1 , маленький и большой для x_2 и т. д.);
- функций принадлежности $\mu(X)$ этих нечетких лингвистических переменных;
- коэффициентов в выводах логических правил управления.

Оператор может контролировать поворот и траекторию ТРВП, выводимых на экран монитора. Скорость ТРВП сохраняется постоянной, поэтому контролирует-

ся только его поворот.

Определение нечетких правил управления производится, согласно таким образом, чтобы выходная ошибка (равная разнице результатов на выходе модели и выходе процесса) была минимальна. После выбора функций принадлежности по (8.2) коэффициенты определяются таким образом, чтобы минимизировать получаемую ошибку. Поскольку последняя нелинейна по отношению к параметрам функций принадлежности, процесс идентификации коэффициентов повторяется вместе с оптимизацией функций принадлежности.

В результате управление реализуется в модели в виде 20 контрольных правил. На входе (рис. 8.8) выбираются четыре переменные x_i , $i = 1, 2, 3, 4$, где x_1 - расстояние от робота до первого угла поворота (см. рис. 8.7), x_2 - расстояние от пола, x_3 - направление движения робота, x_4 - расстояние от потолка. В качестве выходного результата получают величину y - угол поворота ТРВП.

Для нечеткого разделения пространства входа выбираются три нечеткие переменные для x_1 , две - для x_2 , три - для x_3 и одна - для x_4 . На рис. 8.8 показаны идентифицированные функции, связанные с лингвистическими уровнями описания входных переменных ТРВП.

В табл. 8.1 и 8.2 приведены логические правила управления и коэффициенты P_j^1 .

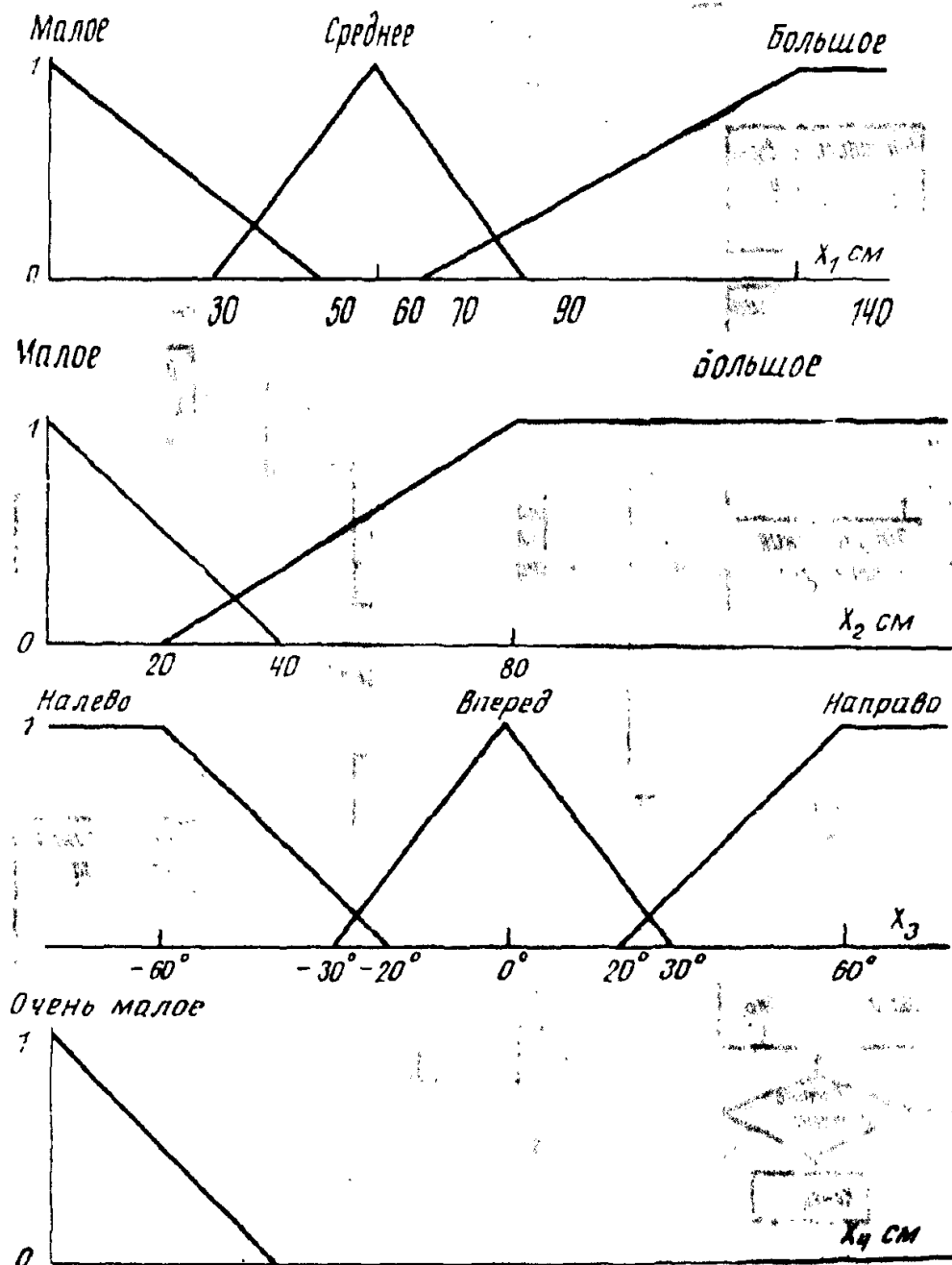


Рис. 8.8 Контрольные правила

Программа, моделирующая на экране монитора передвижение ТРВП в помещениях различной планировки предусматривает:

- возможность осуществления ручного и автоматического режимов управления ТРВП;

Функции принадлежности для нечетких переменных:

1. создание и использование библиотеки стандартных планов помещений;
2. возможность изображения новых сцен планов с помощью блока когнитивной графики (КГ), а также коррекции библиотечных планов в процессе работы при получении дополнительной информации от ТРВП.

Блок-схема программы приведена на рис. 8.9. Блок-схема подпрограммы, осуществляющей автоматическое управление ТРВП, показана на рис. 8.10.

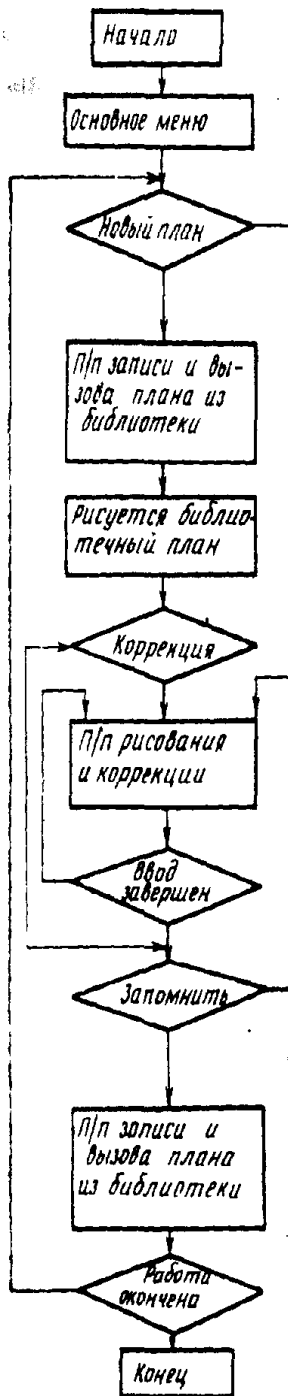


Рис. 8.9 Программа управления

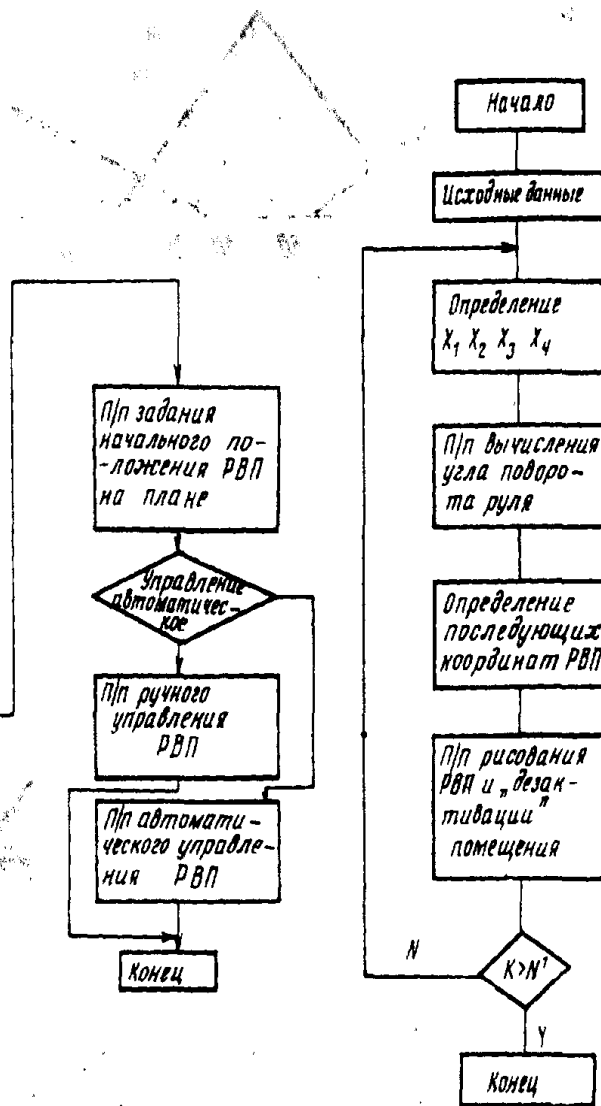


Рис. 8.10 Подпрограмма управления

Подпрограмма позволяет на основе алгоритма нечеткой логики и процедурных правил управления осуществлять автоматическое перемещение ТРВП по периметру помещения заданной планировки. Блок 1 формирует исходные данные:

- 1) начальные координаты ТРВП;
- 2) таблицы 1 и 2 коэффициентов P_j^1 и процедурных правил;

- 3) функции принадлежности для переменных x_1, x_2, x_3, x_4 в соответствии с рис.
- 4) совокупность лингвистических переменных A_j^1 . Блок 2 определения значений x_1, x_2, x_3, x_4 (входных переменных, характеризующих местоположение ТРВП) функционирует на основе знания координат робота и информации о плане помещения. На практике это равносильно измерению ТРВП расстояний до пола или препятствий с помощью датчиков.

Нечеткие переменные в контрольных правилах

Таблица 8.1

Правило	x_1	x_2	x_3	x_4
R^1	—	—	Л	ОМ
R^2	—	—	В	ОМ
R^3	М	М	Л	—
R^4	М	М	В	—
R^5	М	М	П	—
R^6	М	Б	Л	—
R^7	М	Б	В	—
R^8	М	Б	П	—
R^9	С	Б	Л	—
R^{10}	С	М	В	—
R^{11}	С	М	П	—
R^{12}	С	Б	Л	—
R^{13}	С	Б	В	—
R^{14}	С	Б	П	—
R^{15}	Б	Б	Л	—
R^{16}	Б	М	В	—
R^{17}	Б	М	П	—
R^{18}	Б	Б	Л	—
R^{19}	Б	Б	В	—
R^{20}	Б	Б	П	—

М — малое, С — среднее, Б — большое, ОМ — очень малое, Л — налево, П — направо, Н — вперед.

Таблица 8 2
Коэффициенты в формуле (8.1) для логических правил управления $R^1 \dots R^{20}$

Правила	P_0	P_1	P_2	P_3	P_4
R^1	3.000	0.000	0.000	-0.045	-0.004
R^2	3.000	0.000	0.000	-0.030	-0.090
R^3	3.000	-0.041	0.004	0.000	0.000
R^4	0.303	-0.026	0.061	-0.050	0.000
R^5	0.000	-0.025	0.070	-0.075	0.000
R^6	3.000	-0.066	0.000	-0.034	0.000
R^7	2.990	-0.017	0.000	-0.021	0.000
R^8	1.500	0.025	0.000	-0.050	0.000
R^9	3.000	-0.017	0.005	-0.036	0.000
R^{10}	0.053	-0.038	0.080	-0.034	0.000
R^{11}	1.220	-0.016	0.047	-0.018	0.000
R^{12}	3.000	-0.027	0.000	-0.044	0.000
R^{13}	7.000	-0.049	0.000	-0.041	0.000
R^{14}	4.000	-0.025	0.000	-0.100	0.000
R^{15}	0.370	0.000	0.000	-0.007	0.000
R^{16}	-0.900	0.000	0.034	-0.030	0.000
R^{17}	-1.500	0.000	0.005	-0.100	0.000
R^{18}	1.000	0.000	0.000	-0.013	0.000
R^{19}	0.000	0.000	0.000	-0.006	0.000
R^{20}	0.000	0.000	0.000	-0.010	0.000

Подпрограмма вычисления угла поворота ТРВП (блок 3) отработана по схеме нечеткой логики и процедурным правилам управления, изложенным ранее. Используются лингвистическая градация и функции принадлежности переменных $x_1 - x_4$, представленные на рис. 8.8.

Подпрограмма блока 3 включает в себя следующие составные части:

- 1) преобразование входных переменных $x_1 - x_4$ в лингвистическую форму A_j^i ($j=1, \dots, 4; i=1, 20$);
- 2) определение наборов $A_1^i - A_4^i$ и функций принадлежности $\mu_j^i(x_j)$ для заданных переменных $x_1 - x_4$ с условиями $x_1 \rightarrow A_1^i, \dots, x_4 \rightarrow A_4^i$
- 3) идентификация номера i контрольного правила R^i в процедуре нечеткого управления;
- 4) вычисление значения угла поворота u_n для данного шага в операторе цикла.

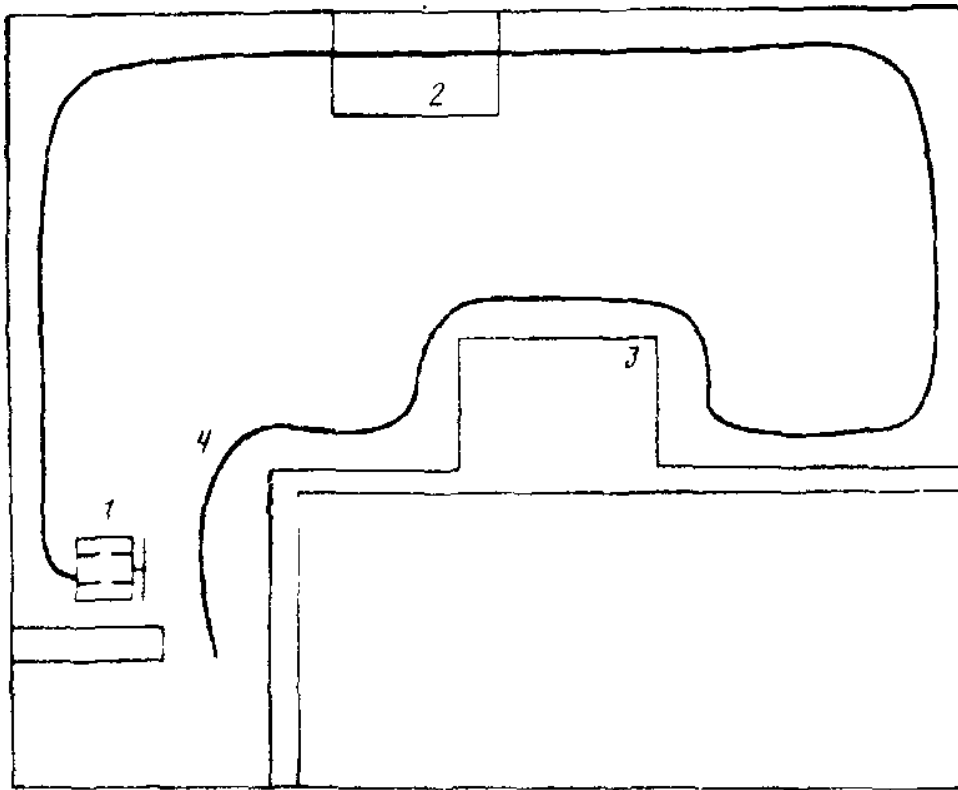


Рис. 8.11 Маршрут, пройденный ТРВП в результате моделирования па экране компьютера его передвижения в автоматическом режиме управления

1 - робот; 2-зона радиоактивного заражения; 3 - препятствия ; 4 - маршрут движения
робота в автоматическом режиме управления

Определение последующих координат ТРВП (блок 4) происходит на основе рекуррентных формул, включающих в себя шаг, текущие координаты и угол поворота y_n для данного шага в цикле.

Подпрограмма рисования ТРВП и, например, «дезактивации» помещения (блок 5) служит для изображения робота на экране, а также для уничтожения пятен - областей, характеризующих радиационное загрязнение (в случае, если маршрут ТРВП проходит через них). В результате создается графическое изображение очистки зоны заражения после прохождения ТРВП.

Условный переход (блок 6) контролирует момент завершения маршрута. Здесь K - номер стены, вдоль которой движется ТРВП, N - общее число препятствий.

Изложенная схема моделирования позволяет осуществлять автоматическое передвижение ТРВП в помещениях различной планировки и с различными препятствиями практически без участия оператора. Необходимым условием для данного

режима работы является информация о местоположении робота относительно пола или препятствий. На практике это достигается путем установки на борту робота датчика, измеряющего необходимые расстояния.

На рис. 8.11 показан маршрут, пройденный ТРВП в результате моделирования его передвижения в автоматическом режиме управления. Результаты моделирования обхода препятствий и задачи движения робота по периметру служебного помещения АЭС показали работоспособность предложенного нечеткого алгоритма управления робототехническим комплексом.

На рис. 8.12 представлена фотография общего вида комплекса.

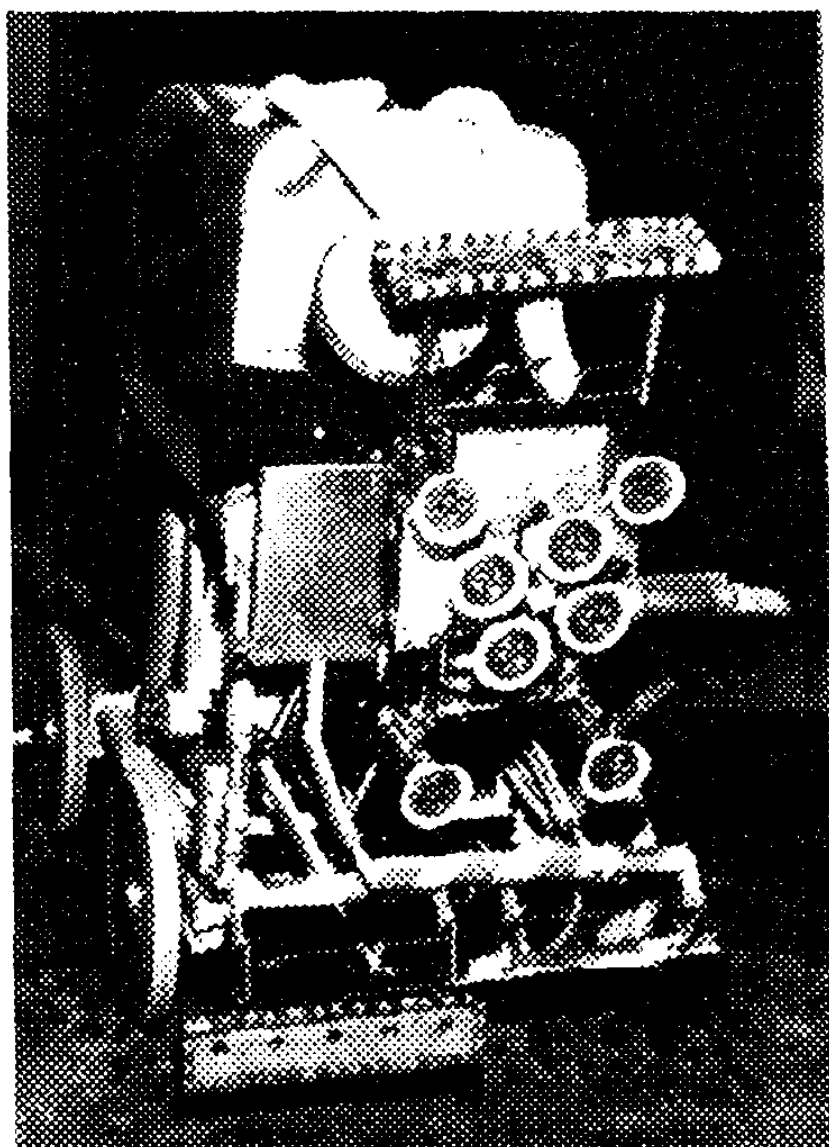


Рис. 8.12 Комплекс дезактивации

На переднем плане находится модуль ТРВП, установленный на модуле горизонтального перемещения с возможностью автоматической стыковки и расстыковки с ним в процессе выполнения операции дезактивации.

Производительность выполнения операций дезактивации и очистки повышается за счет совмещения приводных систем захвата и технологического инструмента.

На рис. 8.13 а, б схематично показана такая совмещенная система (вид сбоку и вид сверху соответственно).

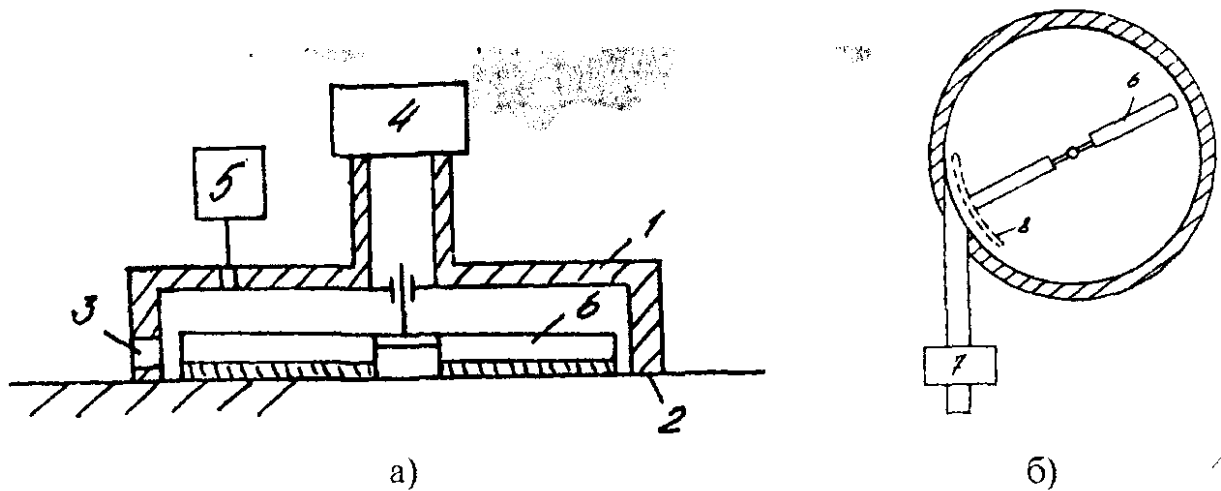


Рис. 8.13 Технологический захват

Система содержит камеру 1 с открытым торцом 2 и минимум с одним каналом 3 в стенке для сообщения с атмосферой. Полость камеры 1 сообщена с системой 4 отсоса и с системой 5 подачи моющего раствора. Рабочий орган 6 (например, в виде щеток) размещен в камере с возможностью вращения относительно его вертикальной оси. Канал 3 снабжен блоком прерывания в виде клапана 7, закрывающим его с частотой (1-10) Гц [129].

Открытым торцом камеру устанавливают на обрабатываемой поверхности и перемещают по ней, при этом благодаря системе 4 во внутренней рабочей полости движется воздушный поток, проникающий через канал в стенке, вместе с потоком рабочей жидкости из системы 5. За счет периодического закрытия канала 3 разрежение в рабочей полости с той же периодичностью возрастает, тем самым повышается интенсивность снятия и удаления предварительно смоченного загрязнения.

Вместо клапанов 7 для снижения энергопотребления и уменьшения габаритов устройства в качестве блока прерывания воздушного потока можно использовать воздушную заслонку 8 (на рис. 8.13 б показана штриховой линией), установленную на рабочем органе 6 с возможностью перекрытия канала 3. При вращении рабочего органа заслонка позволяет получить импульсные динамические воздействия на входе в камеру 1, что обеспечивает повышение эффективности очистки поверхности.

На рис. 8.14 а приведена схема, реализующая способ, повышающий эффективность очистки поверхности движения газожидкостным потоком, а на рис. 8.14 б - траектории движения газожидкостного потока.

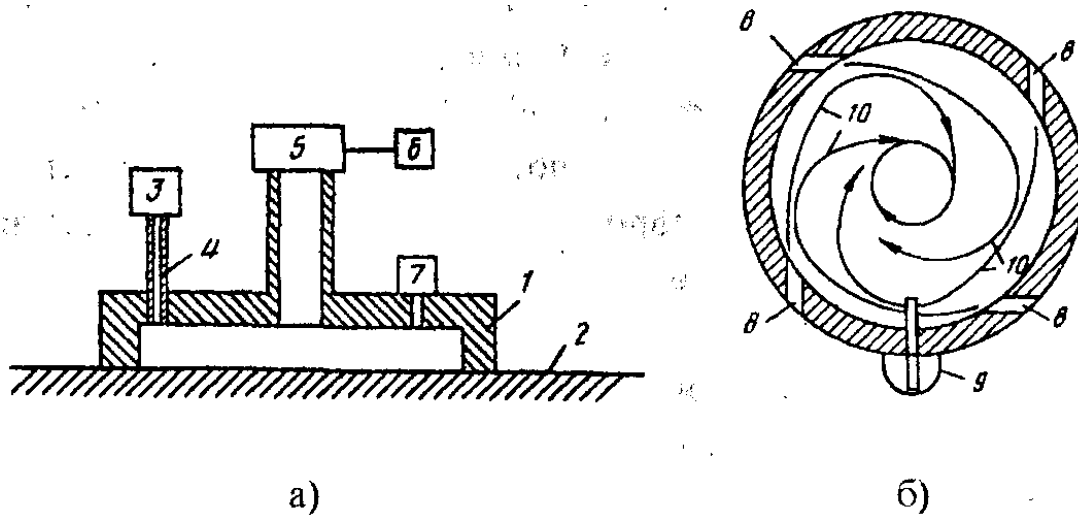


Рис. 8.14 Захват с газожидкостной очисткой

Рабочий насадок 1 накладывают на очищаемую поверхность 2, после чего включают систему подачи 3 моющей жидкости через трубопровод 4 в рабочий насадок. Далее включают систему отсоса 5 и регулятором 6 создают разрежение в полости насадка величиной (0,010-0,015) МПа. Величину разрежения контролируют с помощью датчика давления 7. При этом воздух из атмосферы всасывается в полость насадка через тангенциальные отверстия 8 (рис. 8.14 б), закручиваясь и смешиваясь с моющей жидкостью.

Путем соответствующего подбора расхода моющей жидкости в системе 3 с учетом геометрии полости насадка устанавливают скорость движения газожидкостного потока в пределах (35-95) м/с. Скорость движения контролируют посредством датчика скорости 9, установленного на периферии полости насадка с возможностью контакта с газожидкостным потоком, движущимся по траекториям 10. В качестве системы отсоса 5 может быть использован вентиляторный агрегат, а в качестве его регулятора 6 - регулятор оборотов вентиляторного агрегата. Моющая жидкость представляет собой поверхностно-активное вещество, например, синтанол, верталин или лабомит.

В результате реализации способа при различных условиях получены данные по эффективности очистки, которая отражается коэффициентом очистки K , равным отношению интенсивности загрязнения до и после очистки. При скорости потока 34

м/с и разрежении 0,009 МПа - $K = 63$, при скорости 65 м/с и разрежении 0,010 МПа - $K = 67$, при скорости 65 м/с и разрежении 0,012 МПа $K=67$, при скорости 95 м/с и разрежении 0,015 МПа - $K = 68$; при скорости 96 м/с и разрежении 0,016 МПа - $K = 63$. Максимальный коэффициент очистки достигался при скорости в диапазоне (35 - 95) м/с и разрежении (0,010-0,015) МПа.

Установленная скорость движения газожидкостного потока позволяет верхним ограничением обеспечить достаточное время для химического взаимодействия моющей жидкости с загрязнениями, а нижним ограничением - создать требуемую для механического воздействия скорость потока. Установленное давление в полости насадка позволяет обеспечить нормальный режим отсоса отработанного газожидкостного потока при поддержании его необходимой скорости и создания оптимального усилия прижима насадка к очищаемой поверхности, которое нижним ограничением дает прижим, исключающий вытекание моющей жидкости из полости насадка, а верхним ограничением не препятствует перемещению насадка по очищаемой поверхности.

Повышение качества очистки поверхности достигается применением комбинированной приводной системы, схема которой дана на рис. 8.15 [115].

Схема содержит привод 1 перемещения фиксирующего элемента 2, резервуар 3 с чистящим веществом 4 и поршнем 5 над ним. С резервуаром шарнирно связана щетка 6 с лопастями 7. На уровне щетки 6 с резервуаром 3 связан ролик 8, который установлен с возможностью взаимодействия с конечным выключателем 9 при сжатии нажимного элемента в виде сильфона 10.

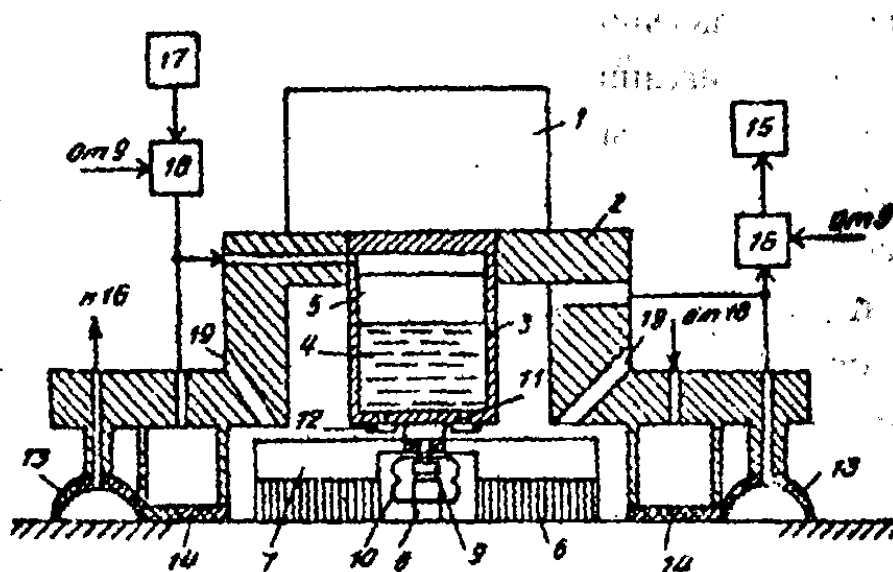


Рис. 8.15 Комбинированный захват

В нижней части резервуара 3 выполнена перфорация 11, закрытая подпружиненными заслонками 12 с возможностью выхода через нее вещества 4 под давлением. Рабочая поверхность элемента 2 выполнена в виде двух concentric расположенных кольцевых присосок 13 и 14. Источник вакуума 15 связан с полостью внешнего кольцевого присоса 13 и с полостью элемента 2 через электропневмоклапан 16. Источник сжатого воздуха 17 связан с газовой полостью резервуара 3 над поршнем 5 и с внешней поверхностью внутреннего кольцевого присоса 14 через электропневмоклапан 18. Выход выключателя 9 связан с управляющими входами электропневмоклапанов 16 и 18. Полость элемента 2 связана с атмосферой посредством каналов 19, оси которых выполнены с возможностью пересечения с плоскостями лопастей 7 путем их тангенциального расположения относительно оси вращения лопастей 7.

Для фиксации транспортного средства на наклонной или вертикальной поверхности привод 1 перемещает элемент 2 с присосками 13 и 14 до их контакта с поверхностью фиксации. Наличие контакта определяется автоматически роликом 8, установленным несколько ниже торцов поверхностей 13 и 14 и перемещающимся до их уровня, преодолевая сопротивление сильфона с воздействием на конечный выключатель. Сигнал с выключателя о наличии контакта поступает на электропневмоклапаны 16 и 18, которые соединяют соответственно источник вакуума с полостью присоса 13 и с полостью элемента 2, а источник сжатого воздуха - с газовой полостью резервуара и с внешней поверхностью присоса 14.

В результате присос 13 фиксирует элемент 2 по периметру, одновременно герметизируя его внутреннюю полость, в которой также создается разрежение, однако с наличием расхода воздуха из атмосферы через каналы 19. Формируемые таким образом струи воздуха воздействуют на лопасти 7, раскручивая их вместе со щеткой 6 относительно резервуара 3. При этом сжатый воздух воздействует на поршень 5, выдавливая вещество 4 через перфорацию, преодолевая сопротивление подпружиненных заслонок 12. Вещество 4 в качестве которого используется соответствующий моющий раствор в зависимости от вида загрязнения поверхности, попадает на щетку 6 в ее центральной части. За счет центробежных сил вращения вещество 4 равномерно распределяется по всей рабочей поверхности щетки 6, которая при вращении производит очистку поверхности фиксации от загрязнений. Отработанный раствор 4 с периферийных частей щетки 6 отсасывается в вакуумный канал. Таким образом обеспечивается оптимальная циркуляция раствора 4 в про-

цессе очистки. В случае радиоактивных загрязнений отработанный раствор собирается в специальный отстойник вакуумного канала. Вакуумные каналы полостей 2 и 13 при необходимости могут быть независимыми, для чего клапан 16 и источник 15 выполняются сдвоенными.

Для исключения затекания раствора 4 в полость 13 и во внешнюю среду, особенно при радиоактивном загрязнении, присос 14 под действием сжатого воздуха уплотняет возможные неровности на поверхности фиксации и одновременно организует герметизирующее увеличение перепада давлений между областью пониженного давления в полости элемента 2 и областью повышенного давления над присосом 14. Таким образом даже при наличии неплотностей под присосом 13 устройство сохраняет работоспособность. Надежность работы устройства обеспечивается также помещением выключателя 9 в полость сильфона 10, который, кроме свойства возвращения ролика 8 в исходное положение при подъеме устройства, герметизирует контактную поверхность выключателя 9 от воздействия раствора 4.

Возврат всего устройства в исходное положение производится с помощью привода 1 после соединения всех клапанов с атмосферой. При этом присосы 13 и 14 прекращают фиксацию, щетка перестает вращаться, а перфорация закрывается заслонками 12 с помощью возвратных пружин, препятствуя подаче раствора 4. Таким образом обеспечивается фиксация транспортного средства одновременно с автоматической качественной очисткой поверхности фиксации.

Лекция

Тема 3.2.4. Испытания и анализ функционирования роботов вертикального перемещения в различных технологических комплексах

ВОПРОСЫ

1. Робот вертикального перемещения для монтажа дюбелей.
2. Робот вертикального перемещения для противопожарных операций.
3. Многоцелевой робот вертикального перемещения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Градецкий В.Г., Рачков М.Ю. Роботы вертикального перемещения. М.: Тип. МО РФ. 1997, 223 с. (с.182-201).

1. Робот вертикального перемещения для монтажа дюбелей

Монтаж дюбелей является сложной технологической операцией, которая распространена при строительстве и ремонте зданий и сооружений. Данная операция является трудоемкой и дорогостоящей при выполнении вручную на вертикальных поверхностях, особенно на больших высотах. Монтаж дюбелей производится также в условиях опасной радиации во время консервации атомных станций. Кроме этого, операции по вставлению дюбелей со взрывными зарядами при разборке бетонных и стальных конструкций используются для разборки атомных реакторов.

Конструкция ТРВП с широкими силовыми возможностями для монтажа дюбелей представлена на рис. 8.16 (вид сверху и сбоку).

Транспортный модуль содержит приводную систему с технологическим блоком. Система захватов состоит из ВЗ вертикального и горизонтального движения. Два цилиндра вертикального движения смонтированы вдоль

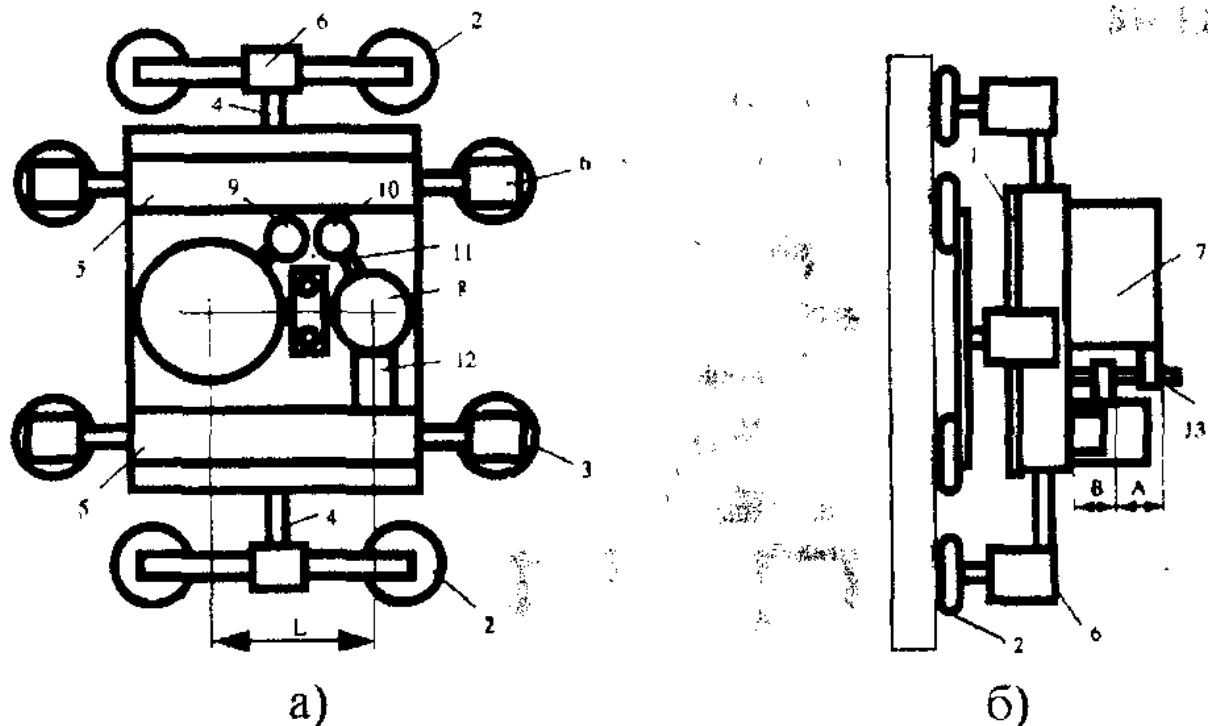


Рис. 8.16 Схема ТРВП для монтажа дюбелей

1 - платформа, 2 - вертикальные захваты, 3 - горизонтальные захваты, 4 - вертикальный привод, 5 - горизонтальный привод, 6 - привод захватов, 7 - блок сверления, 8 - блок монтажа, 9, 10 - подающие цилиндры, 11 - кронштейн, 12 - магазин дюбелей, 13 - направляющие, L - расстояние между блоками сверления и монтажа, A - рабочий ход блока сверления, B - рабочий ход блока монтажа

центральной оси под центральной платформой. Два цилиндра горизонтального движения установлены на противоположных сторонах сверху платформы.

Основные технические характеристики разработанного ТРВП:

1. Несущая способность

- номинальная транспортная

20 кгс

- стационарная

100 кгс

2. Вес с технологическим оборудованием

18 кгс

3. Максимальный шаг

125 мм

4. Диапазон скоростей шага

(10-50) мм/с.

5. Высота преодолеваемых препятствий

40 мм

6. Степени свободы

7

7. Система захватов

вакуумное

- число захватов вертикального движения

4

- число захватов горизонтального движения

4

8. Технологическое оборудование:

Сверление

- тип

Dseu 638 Kinetik (FEIN)

- мощность

230 Вт

- диаметр сверла для бетона

до 10 мм

- вес

1,8 кгс

Монтаж :

- тип

PSR 3,6 VS (BOSCH)

- напряжение

3,6 В

- вес

0,7 кгс

9. Габаритные размеры

- длина

950 мм

- ширина

540 мм

- высота

350 мм

Для достижения надежности движения используется комбинированная система питания. На рис. 8.17 показана схема многоуровневой системы питания ВЗ, обеспечивающей высокую степень безопасности ТРВП.

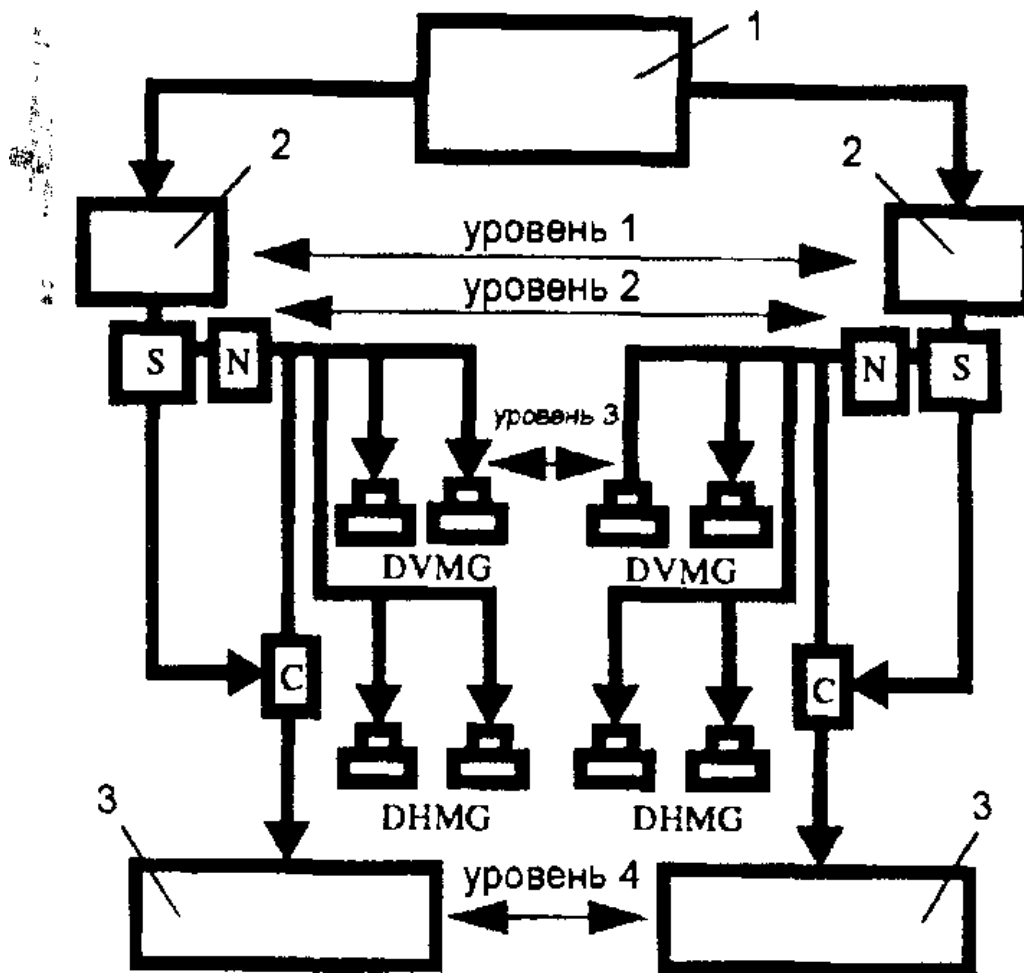


Рис. 8.17 Многоурневная система питания ВЗ ; ,

1 - система питания, 2 - источник вакуума, 3 - вакуумный ресивер, DVMG - вертикальные захваты, DHMG - горизонтальные захваты, S - датчик вакуума, N - обратный клапан, C - управляющий клапан

Первым уровнем является дублирование источника вакуума для двух диагональных захватов вертикального движения и двух диагональных захватов горизонтального движения. В случае падения вакуума в одном из источников робот может удерживаться на поверхности перемещения посредством четырех захватов. Диагональное расположение этих захватов обеспечивает наиболее стабильное положение ТРВП.

Вторым уровнем системы является использование обратных клапанов в питающих линиях захватов. Клапана автоматически закрывают линию питания при падении вакуума в источнике, сохраняя тем самым уровень вакуума в захвате.

Третий уровень обеспечивает безопасность посредством использования автономного функционирования различных захватов. Это может быть достигнуто при-

менением независимых дополнительных источников вакуума, например, эжекторов, в каждом захвате. При этом падение вакуума в одном из захватов не влияет на уровень вакуума в других захватах [146].

Четвертый уровень системы состоит из вакуумных ресиверов. Датчик в линии питания дает сигнал при падении давления в основном источнике вакуума и открывает управляющий клапан, соединяющий ресивер с объемом захватов. Этот процесс обеспечивает возможность организации движения робота в аварийной ситуации в исходную позицию.

Система управления приводами ТРВП показана на рис. 8.18.

Система питается сжатым воздухом через питающий кабель, при этом бортовой распределитель запитывает элементы системы приводов в соответствии с приведенной схемой.

Транспортный и технологический движения робота выполняются в программном и ручном режимах в соответствии с иерархической структурой управления.

Главный компьютер используется для графического мониторинга и управления ТРВП. Язык программирования С может быть использован в качестве рабочего языка.

Вторым уровнем управления является бортовой компьютер, который работает в реальном режиме времени с помощью системы PAERL, что обеспечивает возможность гибкого изменения программ. Связь между главным и бортовым компьютером осуществляется с помощью серийного интерфейса RS 232 [159].

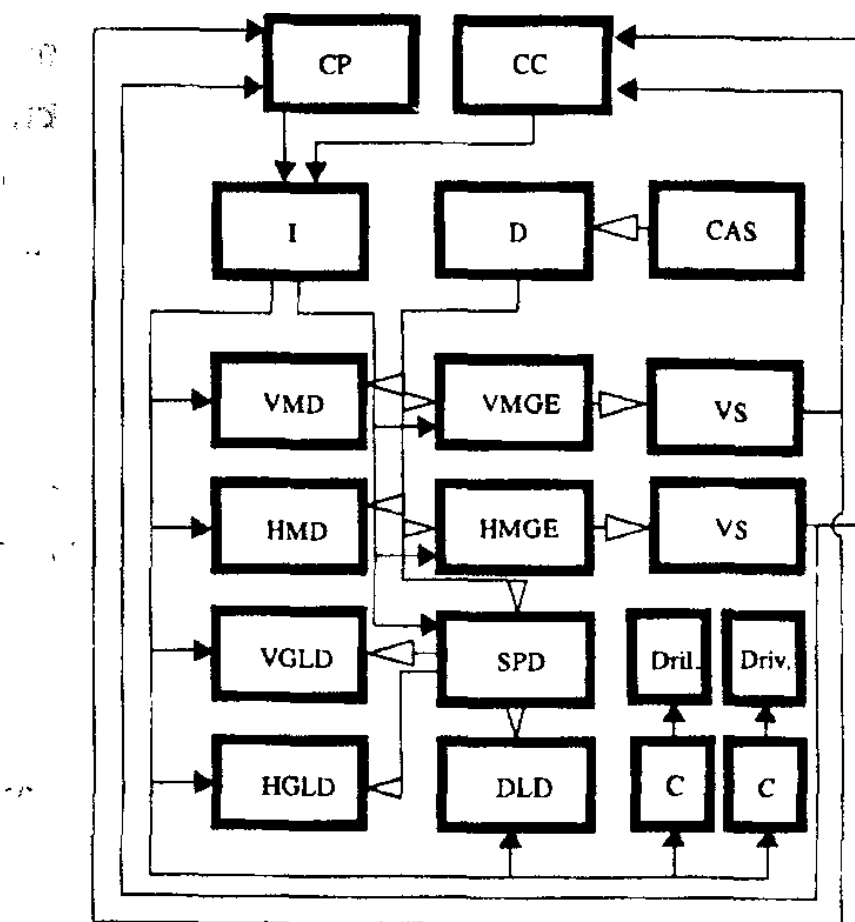


Рис. 8.18 Система управления приводами

CP - панель управления, CC - компьютер, I - интерфейс, CAS - компрессор, D - распределитель, C - контактор, VS - вакуумный датчик, Dril. - мотор сверла, Driv. - мотор блока монтажа, DLD - привод сверла, SPD- задатчик давления, VMD - вертикальный привод, VGLD - привод вертикальных захватов, HGLD - привод горизонтальных захватов, VMGE - эжектора вертикальных захватов, HMGE - эжектора горизонтальных захватов

Монтаж дюбелей и взрывных устройств состоит из последовательности сверления базового отверстия и автоматической вставки болта или заряда в это отверстие. Как сверление, так и вставка требует наличие движения подачи технологического инструмента.

Монтаж дюбелей выполняется после транспортного движения робота в рабочую зону. Блок сверления выполняет свою операцию посредством соединенного с ним цилиндра подачи. Во время сверления все захваты зафиксированы на поверхности. После операции сверления ТРВП перемещается на один шаг таким образом, что блок монтажа оказывается непосредственно над высверленным базовым отверстием. Данный автоматический поиск отверстия обеспечивается тем, что

расстояние между блоком сверления и блоком монтажа дюбелей равно рабочему ходу транспортного цилиндра.

Первый дюбель из магазина вводится в базовое отверстие посредством цилиндра, соединенного с блоком монтажа. В этой позиции все педипуляторы находятся в нижнем положении и зафиксированы на поверхности. После монтажа первого дюбеля из магазина поступает следующий дюбель на рабочую позицию блока монтажа.

Алгоритм выполнения технологического движения по монтажу дюбеля показан на рис. 8.19.

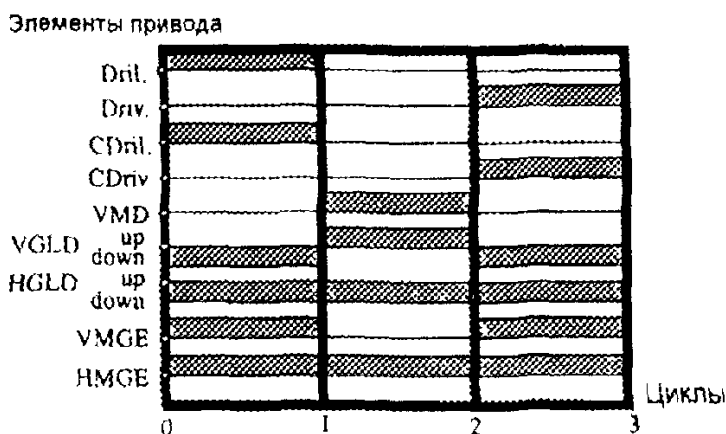


Рис. 8.19 Алгоритм монтажа дюбеля

Dril. - мотор сверла. Driv. - мотор блока монтажа. CDril. - подача сверла, CDrive. - подача блока монтажа. VMD - вертикальный привод. VGLD - привод вертикальных захватов. HGLD - привод горизонтальных захватов. VMGE - эжектора вертикальных захватов. HMGE - эжектора горизонтальных захватов

Технологическое движение занимает три цикла. На первом цикле производится сверление, на втором - рабочий ход платформы и на третьем - монтаж дюбеля. Максимальная глубина сверления и ввода дюбелей равна ходу цилиндров соответствующих технологических блоков. Точность операции обеспечивается технологическими направляющими указанных цилиндров и предварительной установкой их рабочих усилий.

Монтаж дюбелей является силовой технологической операцией, при которой необходимо учитывать допустимую изгибающую нагрузку на рабочие цилиндры приводов.

Вид ТРВП для монтажа дюбелей показан на рис. 8.20.

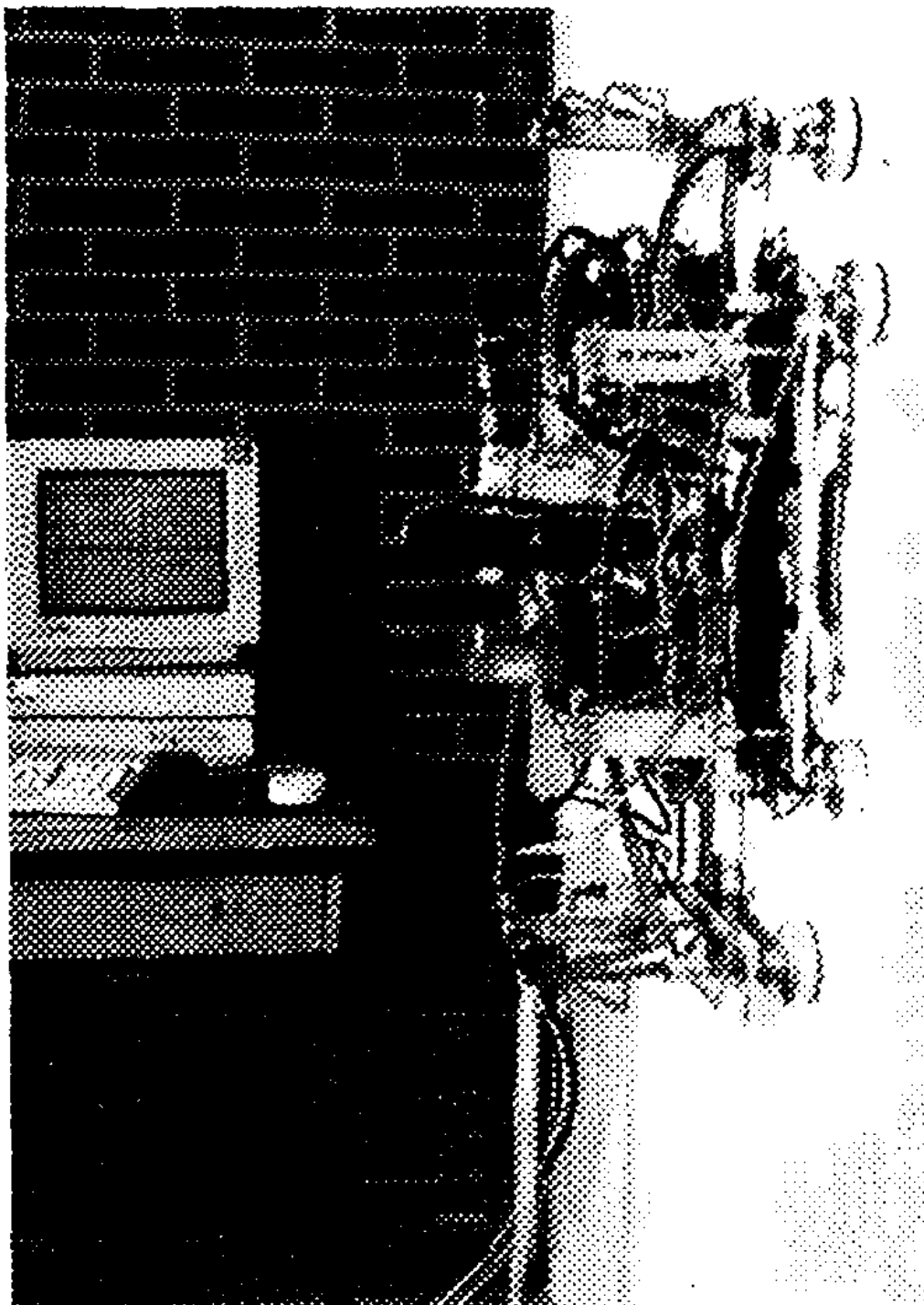


Рис. 8.20 ТРВП для монтажа дюбелей

На приведенной фотографии показан вариант выполнения блока монтажа с завинчиванием дюбеля.

2. Робот вертикального перемещения для противопожарных операций

Существующие приемы по вырезанию отверстий в стенах горящих резервуаров, когда газосварщиков на люльке автоподъемников поднимают к горящему резервуару, являются чрезвычайно опасными для их жизни и здоровья, т.к. в случае внезапного выброса нефтепродуктов через край резервуара или образуемую прорез в стене возможна гибель газосварщиков или тяжелые ожоговые травмы [95].

В качестве технологического модуля ТРВП для автоматизации этой операции удобно использовать блок газовой резки, который отличается простотой аппаратного оформления и возможностью дистанционного управления и транспортирования устройства пожарным автомобилем.

Конструкция пожарного ТРВП имеет модульный принцип построения, приведенный на рис. 8.21.

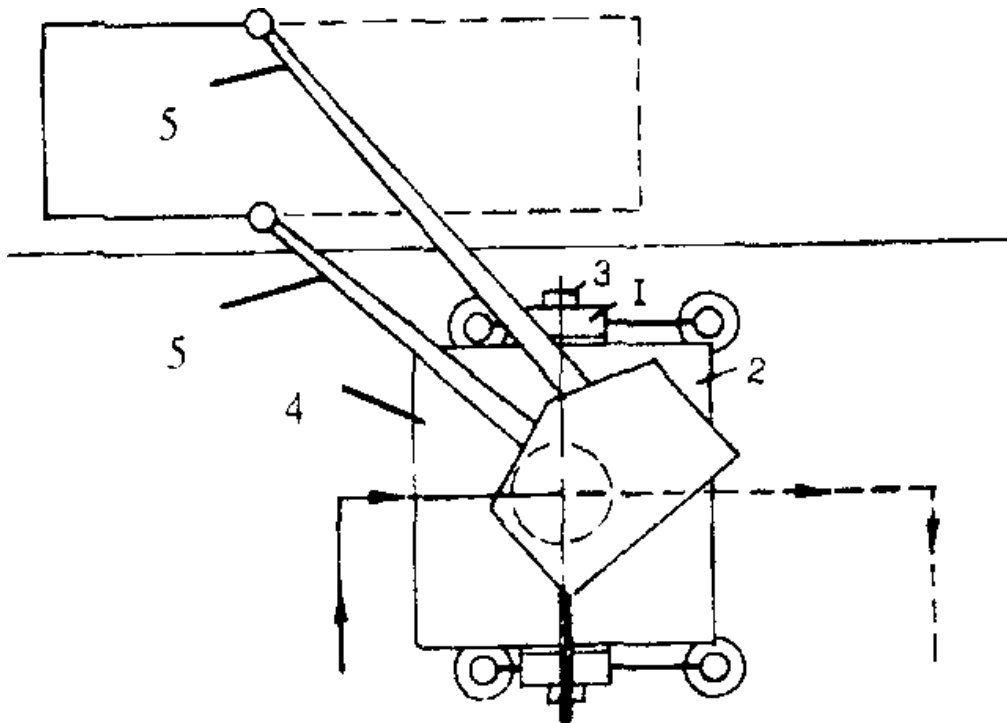


Рис. 8.21 Схема пожарного ТРВП

Основными модулями робота являются транспортный модуль 1, технологический модуль 2 и модуль управления 3. Транспортный модуль связан с блоком управления электрическими коммуникациями, расположенными в защитном трубчатом кожухе 4. В этом же теплоизолированном кожухе размещены питающие коммуникации, по которым на борт робота подаются сжатый воздух для приводов транспортного модуля, рабочие газы для функционирования резаков 5 технологического модуля, а также низковольтное напряжение на управляющие клапана и устройство поджига резаков, установленных по схеме сдвоенного технологического инструмента (гл. 2).

Транспортный модуль имеет две платформы, каждая из которых снабжена группой вакуумных захватных устройств из термостойкого герметика ВИКСИНТ У2-28. Обе платформы связаны между собой через узел поворота. Поворот может быть осуществлен относительно любой платформы, находящейся в зафиксированном состоянии. Кроме узла поворота платформ может быть предусмотрен автономный узел поворота, обеспечивающий перемещение резака, установленного на кронштейне, по дуговой траектории с заданной рабочей скоростью.

Технологический модуль размещается на транспортном модуле и содержит блок резки, установленный на кронштейне, длина которого определяется размерами вырезаемого отверстия. Подача рабочих газов для выполнения резки осуществляется посредством дискретных клапанов, которые могут находиться как на борту робота, так и в наземном модуле управления.

Алгоритм выполнения противопожарной операции заключается в установке робота на исходную позицию на стенке резервуара, перемещения робота по стенке до уровня горячей жидкости, прорезания отверстия в стенке, возврата робота на исходную позицию и в снятии робота со стенки резервуара.

Установка робота на исходную позицию и его снятие со стенки резервуара может производиться автоматически с помощью телескопических устройств, что исключает возможность поражения обслуживающего персонала температурными воздействиями.

Перемещение робота по стенке резервуара до уровня горячей жидкости производится программным способом, обеспечивающим дискретное пошаговое вертикальное движение транспортного модуля. При пересечении уровня горячей жидкости датчик температуры, установленный на кронштейне технологического модуля, реагирует на перепад температур стенки резервуара, идентифицируя тем самым расположение транспортного модуля под уровнем горячей жидкости в зоне более низких температур и установку блока резки над уровнем, как это предусмотрено технологией выполнения противопожарной операции. После этого осуществляется прорезание отверстия в стенке резервуара.

Алгоритм вырезания отверстия зависит от используемого конструктивного варианта робота. Для робота с автономным узлом поворота резака схема вырезания отверстия в стенке резервуара приведена на рис. 8.22.

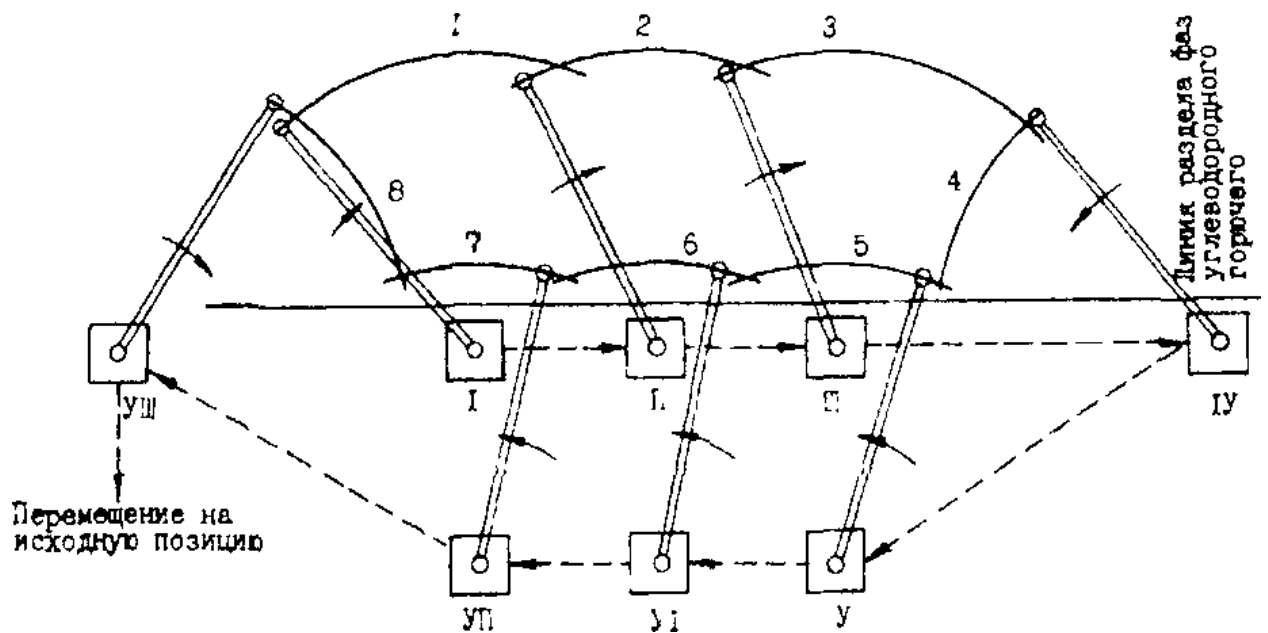


Рис. 8.22 Алгоритм вырезания отверстия автономным резак

1-8 - последовательность вырезания отверстия; I-VIII - позиция транспортного модуля робота во время вырезания отверстия

Прохождение контура отверстия начинается с левого верхнего угла последовательным выполнением пересекающихся дуговых траекторий. Этим траекториям соответствуют позиции робота I-VIII, находящегося во время перемещения резака в неподвижном состоянии. После выполнения очередного этапа дуговой траектории резак отключается, а робот перемещается на следующую позицию. На позиции VIII производится замыкание контура отверстия, при этом робот находится вне зоны под контуром, что исключает его повреждение при падении вырезанной части стенки резервуара.

Для конструктивного варианта робота, приведенного на рис. 8.21, алгоритм вырезания отверстия реализуется следующим образом (рис. 8.23).

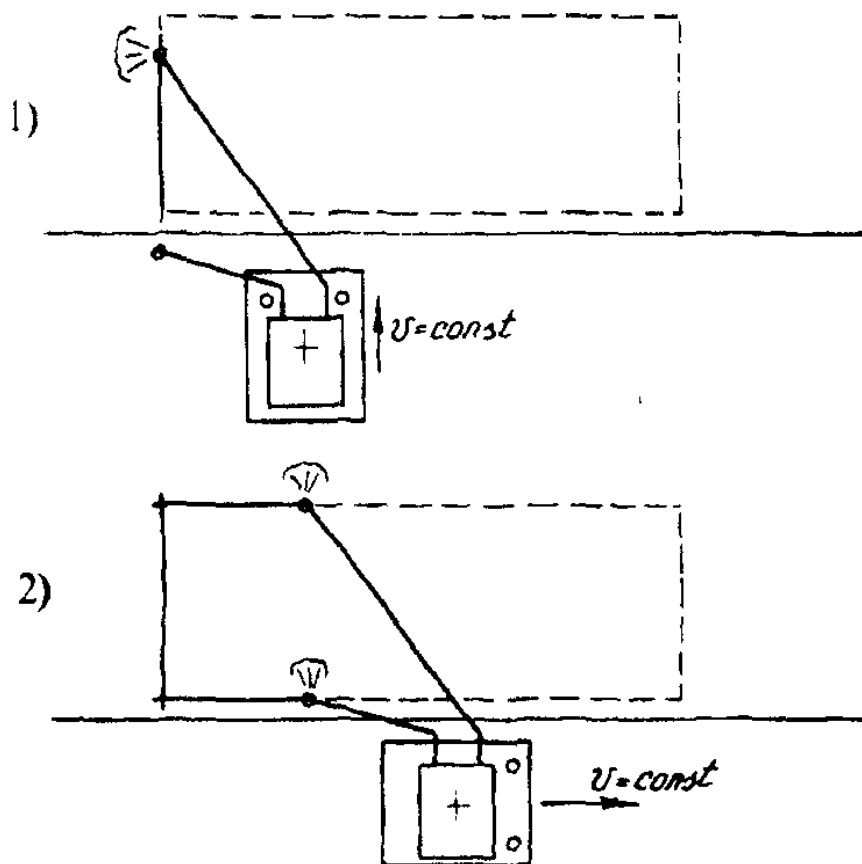


Рис. 8.23 Алгоритм вырезания отверстия сдвоенным резак

Прохождение контура начинается с левого нижнего угла путем включения верхнего резака и движения транспортного модуля вверх со скоростью, необходимой для прорезания стенки резервуара. После достижения верхним резак

левого верхнего угла отверстия нижний резак занимает положение в левом нижнем углу, платформа транспортного модуля разворачивается на 90° вправо, сохраняя положение технологического модуля с резаками в неподвижном состоянии. После включения нижнего резака начинается движение вправо с вырезанием верхней и нижней части контура. При достижении резаками правой границы контура отверстия производится включение нижнего резака и поворот платформы еще на 90° , что обеспечивает возможность движения робота вниз. В правом нижнем углу происходит замыкание контура. Вырезанный металл под действием собственной силы тяжести выпадает с внешней стороны резервуара, при этом робот находится в безопасном положении вне зоны под контуром. Далее робот продолжает движение вниз на исходную позицию для снятия со стенки резервуара.

Циклограмма работы технологического оборудования приведена на рис. 8.24.

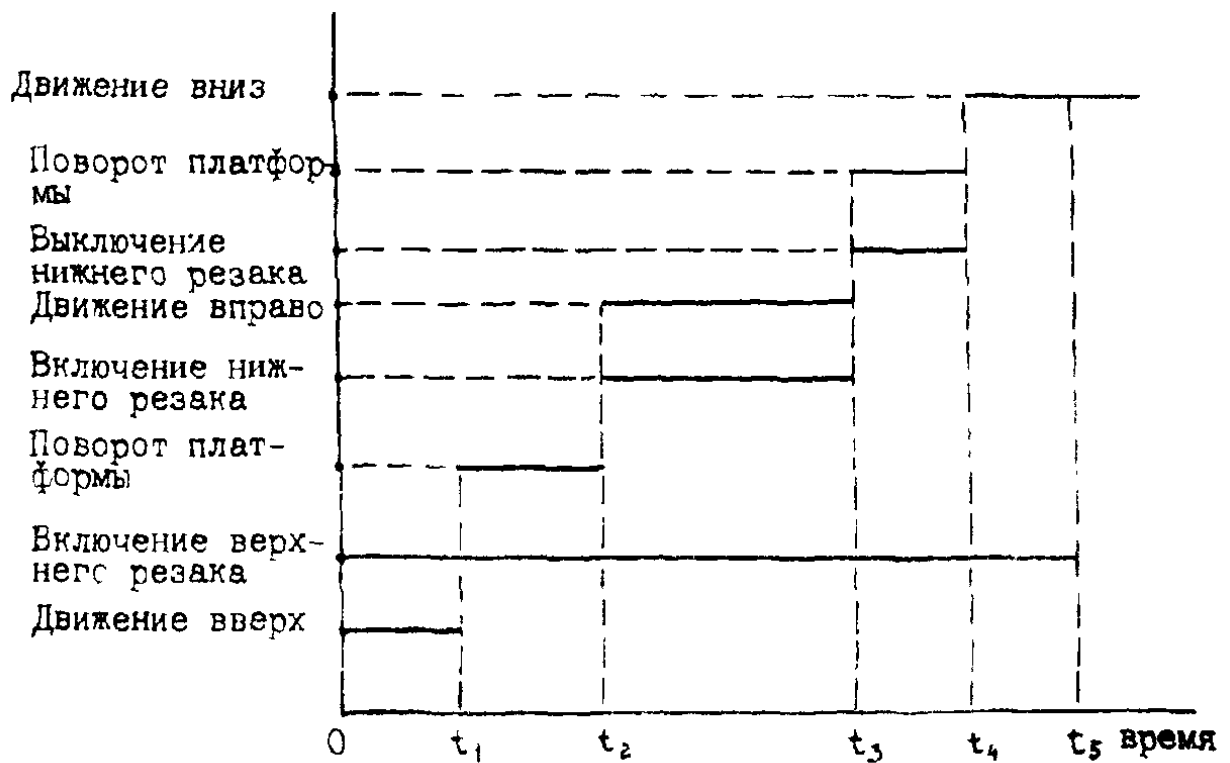


Рис. 8.24 Циклограмма выполнения операции

Она включает пять моментов переключения, реализуемых системой управления. Рассмотренная схема имеет преимущества перед схемой, приведенной на рис.8.23, в смысле быстродействия выполнения операции и простоты алгоритма ее выполнения, однако требует использования дополнительных конструктивных узлов в технологическом модуле и в системе приводов транспортного модуля. В связи с этим выбор определенной схемы должен производиться с учетом специфики выполнения задачи и накладываемых требований на ее выполнение.

Для определения надежности функционирования системы робота в целом и его отдельных электронных и пневматических узлов и элементов в условиях, приближенных к реальным по воздействию температуры, характеру поверхности перемещения и длительности периода работы были проведены его эксплуатационные испытания.

В целях защиты робота от теплового излучения, исходящего от нагретой поверхности перемещения, его корпус был закрыт обшивкой из теплоотражающей металлизированной кремнеземной ткани ТК-Н-ТОА. При этом защита выполнена в виде двух оболочек (рис. 8.25) одна из которых 1 закрывает внутреннюю платформу, а другая 2 - всю конструкцию в целом. Охлаждение конструкции робота под оболочками обеспечивалось за счет протока воздуха 3, выдуваемого из эжекторов

4 и распределителей 5 с выходом его через отверстия в обшивках, служащие для обеспечения свободного хода опор 6.

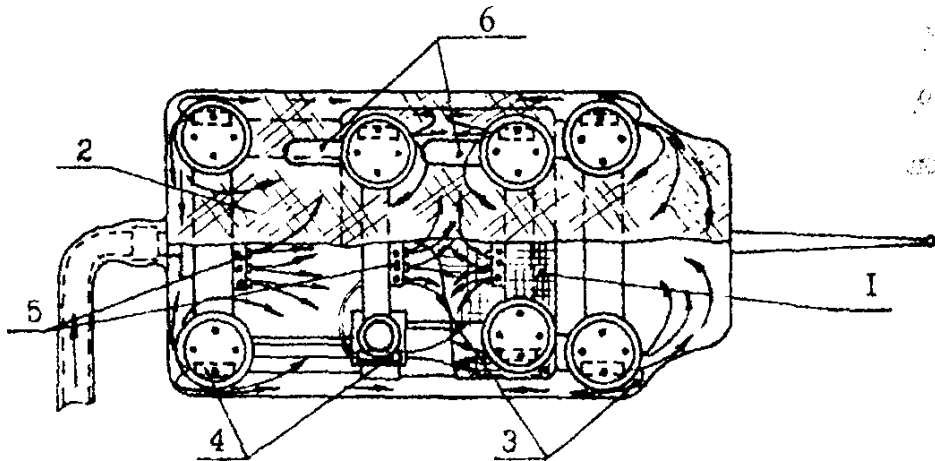


Рис. 8.25 Тепловая защита робота

При этом захваты и нижняя часть опор теплозащиты не имели и поэтому находились в непосредственном контакте с разогретой поверхностью. Нагрев и регулирование температуры осуществлялись с помощью форсунок, позволяющих создать температуру поверхности до 1000°C .

Для регистрации температуры на поверхности перемещения и под обшивкой робота применялся электронный автоматический потенциометр ЭПП-09М с диапазоном регистрации температуры ($0 - 1000$) $^{\circ}\text{C}$ с возможностью одновременного подключения десяти термопар и регистрацией данных на диаграммной бумаге в виде графиков изменения температуры от времени. В качестве датчиков температуры использовались термопары ТХА-0806.

График изменения температур во время испытаний приведен на рис. 8.26 а.

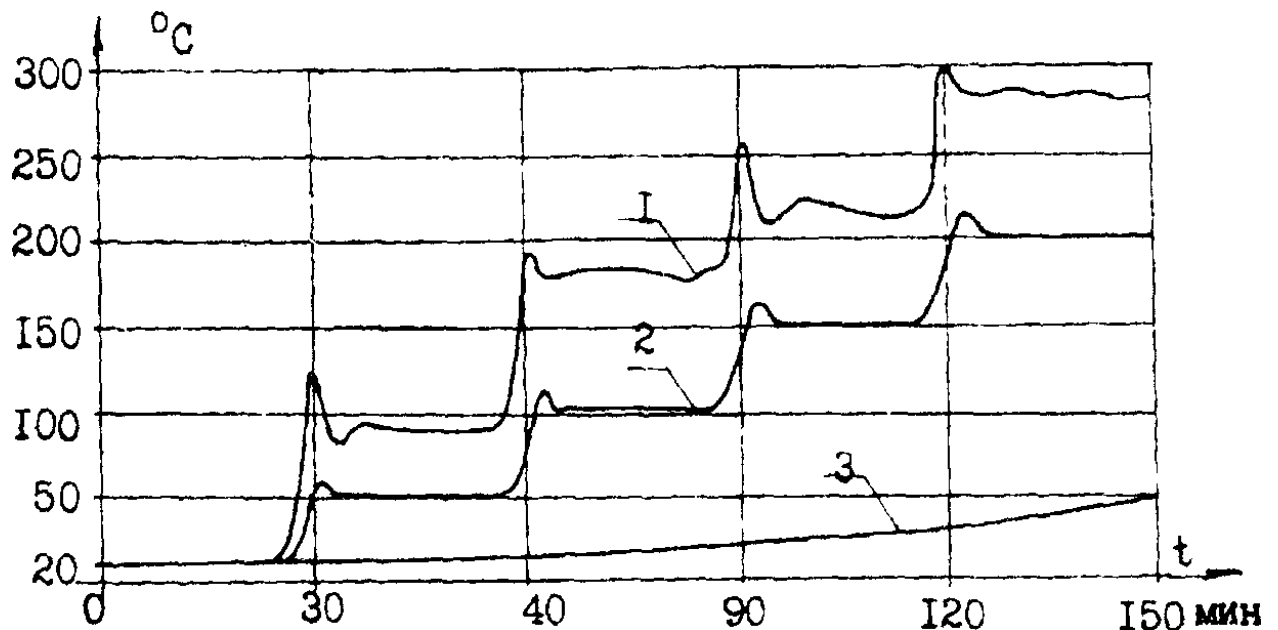


Рис. 8.26 а График изменения температур

Кривая 1 графика представляет процесс изменения температуры в печи, кривая 2 - процесс изменения температуры поверхности перемещения, кривая 3 - процесс изменения температуры внутри обшивки робота.

Выбросы температур на кривых 1 и 2 появляются в момент дополнительной подачи горючей смеси в форсунки для перехода на следующую температурную ступень согласно методике испытаний. Причем выбросы на кривой 2 появляются с некоторым запаздыванием относительно кривой 1. что объясняется инерционностью разогрева металлической поверхности. На кривой 3 эти выбросы не просматриваются. так как тепловая защита препятствует прохождению тепловых лучей внутрь робота.

Общий вид одного из вариантов пожарного ТРВП на резервуаре приведен на рис. 8.26 б.



Рис. 8.26 б Вид пожарного ТРВП

На фотографии запечатлен момент испытаний пожарного ТРВП со сдвоенными газовыми резаками.

Схемы, аналогичные рассмотренным, могут быть также использованы для проведения операций резки в других применениях.

3. Многоцелевой робот вертикального перемещения

Для того, чтобы обеспечить возможность использовать одну конструкцию ТРВП для выполнения различных технологических операций, был разработан многоцелевой робот. Схема этого ТРВП имеет схему с одним центральным приводом и двухступенчатую систему захватов, данную на рис. 8.27.

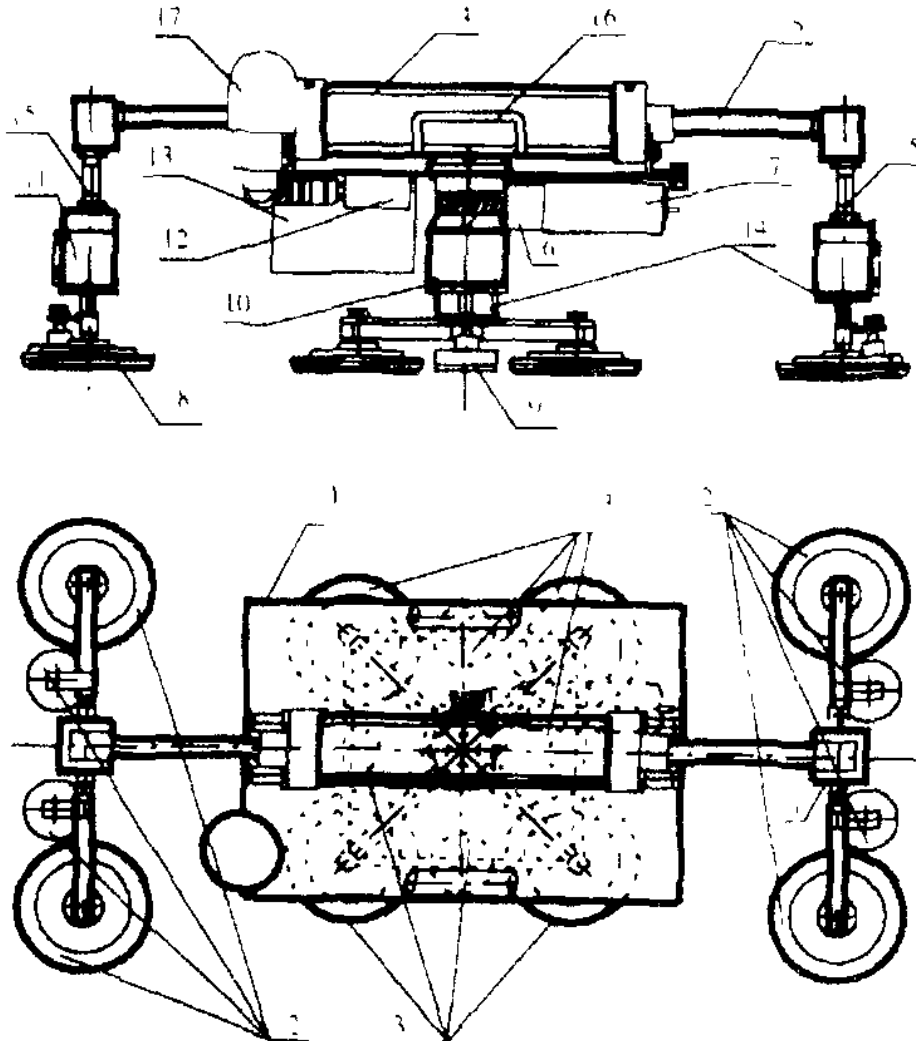


Рис. 8.27 Схема многоцелевого ТРВП [151]

1 - платформа. 2 - внешние недипуляторы, 3 - внутренние педиупуляторы, 4 - транспортный цилиндр, 5 - шток, 6 - узел поворота. 7 - электромотор. 8 - силовые ВЗ, 9 - уплотняющие ВЗ. 10 - внешние цилиндры ВЗ. 11 - внутренние цилиндры ВЗ. 12 - силовой эжектор, 13 - блок управления. 14 - силовые направляющие. 15 - узел настройки, 16 - ручки, 17 - видеокамера

Управление цифровых образовательных технологий

С помощью представленного ТРВП можно выполнять операции инспекции, покраски, сверления, монтажа дюбелей, очистки, шлифовки и другие. Для каждой операции используется свой сменный технологический модуль.

Основные технические характеристики многоцелевого робота с двухступенчатой системой захвата:

1. Полезная нагрузка	
➤ номинальная транспортная	100 кгс
- стационарная	250 кгс
2. Собственный вес	38 кгс
3. Максимальный шаг	300 мм
4. Диапазон скорости шага	(15 - 50) мм/с
5. Максимальная высота преодолеваемых препятствий	25 мм
6. Диапазон угла поворота	180 град
7. Скорость вращения	5 об/мин
8. Система захватов	двухступенчатая вакуумная
- количество силовых захватов	8
- количество уплотняющих захватов	8
- количество многокаскадных эжекторов	1
- количество автономных эжекторов	8
9. Габаритные размеры	
- длина	1120 мм
- ширина	560 мм
- высота	430 мм
10. Система питания	
- давление воздуха	(0,50 - 0,55) Мпа
- расход воздуха	228 л/мин
- напряжение	24 В (0,5 А); 36 В (5А)
11. Система управления	ручная и программная
12. Вид поверхности перемещения	неровности до 9 мм, кривизна радиусом до 6 м.

Допустимая кривизна поверхности перемещения регулируется с помощью настроечного узла, установленного в педипуляторах. Число и размеры захватов могут варьироваться в зависимости от свойств поверхности перемещения и окружающей среды.

Пневматический контур робота показан на рис. 8.28.

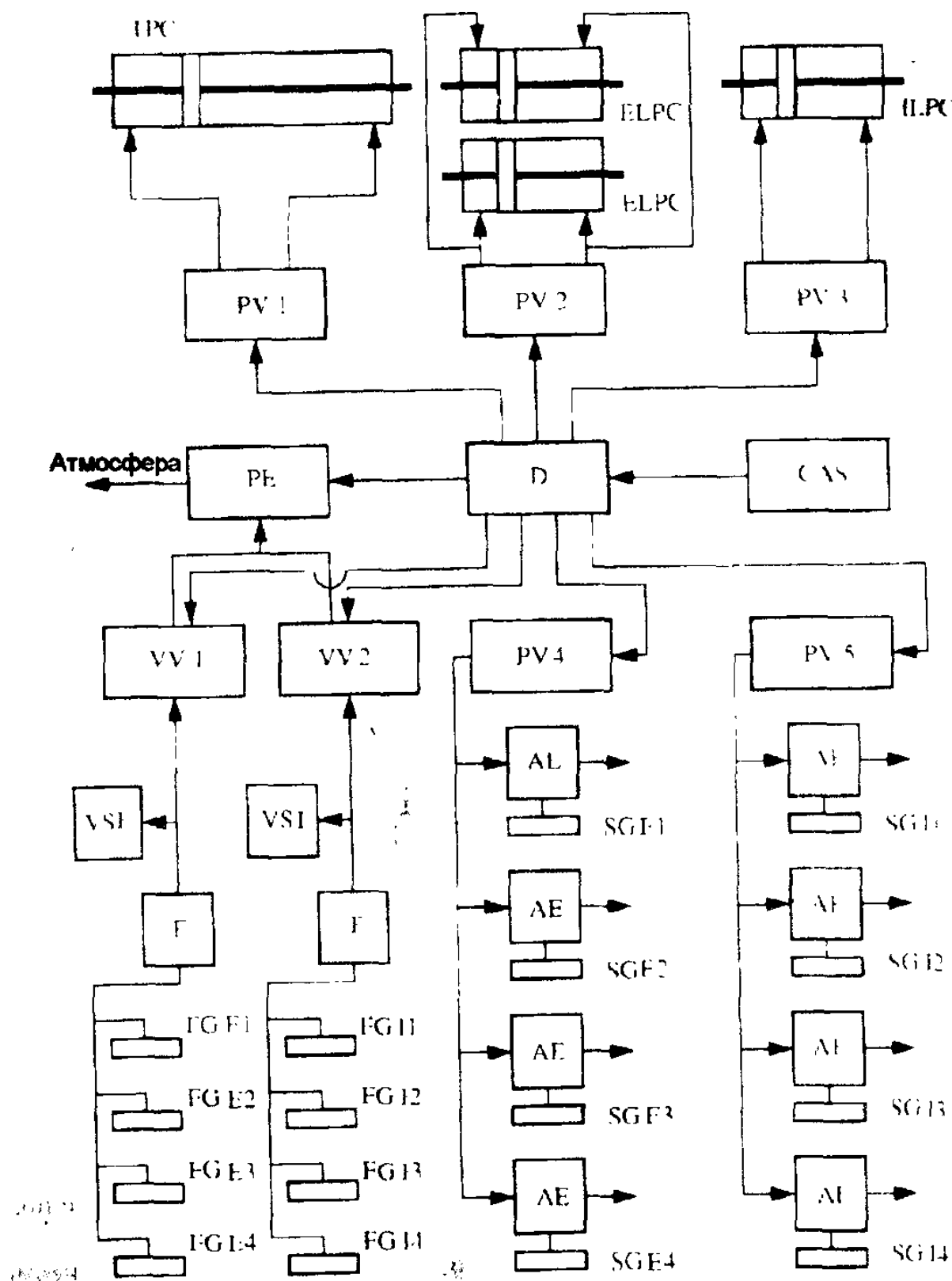


Рис. 8.28 Пневматический контур робота

На рис. 8.28 использованы следующие обозначения: CAS - источник сжатого воздуха, D - распределитель, VV - вакуумный клапан, PV - клапан давления, TPC - транспортный пневматический цилиндр, ELPC - внешний подъемный цилиндр, ILPC - внутренний подъемный цилиндр, FG - силовой ВЗ, SG - уплотняющий ВЗ, VS -

вакуумный датчик, РЕ - многокаскадный эжектор, АЕ - автономный эжектор, F - фильтр, Е - внешний, I - внутренний.

Все силовые ВЗ связаны с одним многокаскадным эжектором, а каждый уплотняющий ВЗ имеет свой автономный встроенный эжектор.

Компьютерный интерфейс реализует мониторинг состояния системы приводов и обеспечивает возможность корректировать и задавать программные движения робота. Мониторинг реализуется с помощью обратной связи в контуре управления от датчиков состояния системы приводов и окружающей среды. Наиболее универсальным датчиком состояния окружающей среды является видеокамера. С ее помощью реализуется также инспекция поверхности перемещения. Благодаря универсальности возможных направлений движения робота обеспечивается широкий набор объектов и видов инспекции.

С помощью рассмотренной универсальной конструкции ТРВП можно производить автоматическую покраску поверхностей большой площади, имея на борту необходимый запас краски. В этом случае отпадает необходимость использования высокомошных насосов для подачи краски в рабочую зону робота на высокие уровни.

Схема установки краскопульты на роботе приведена на рис. 8.29.

Краскопульт устанавливается в верхней части передних педипуляторов. Резервуар с краской размещается на платформе и соединяется с краскопультом с помощью гибких шлангов.

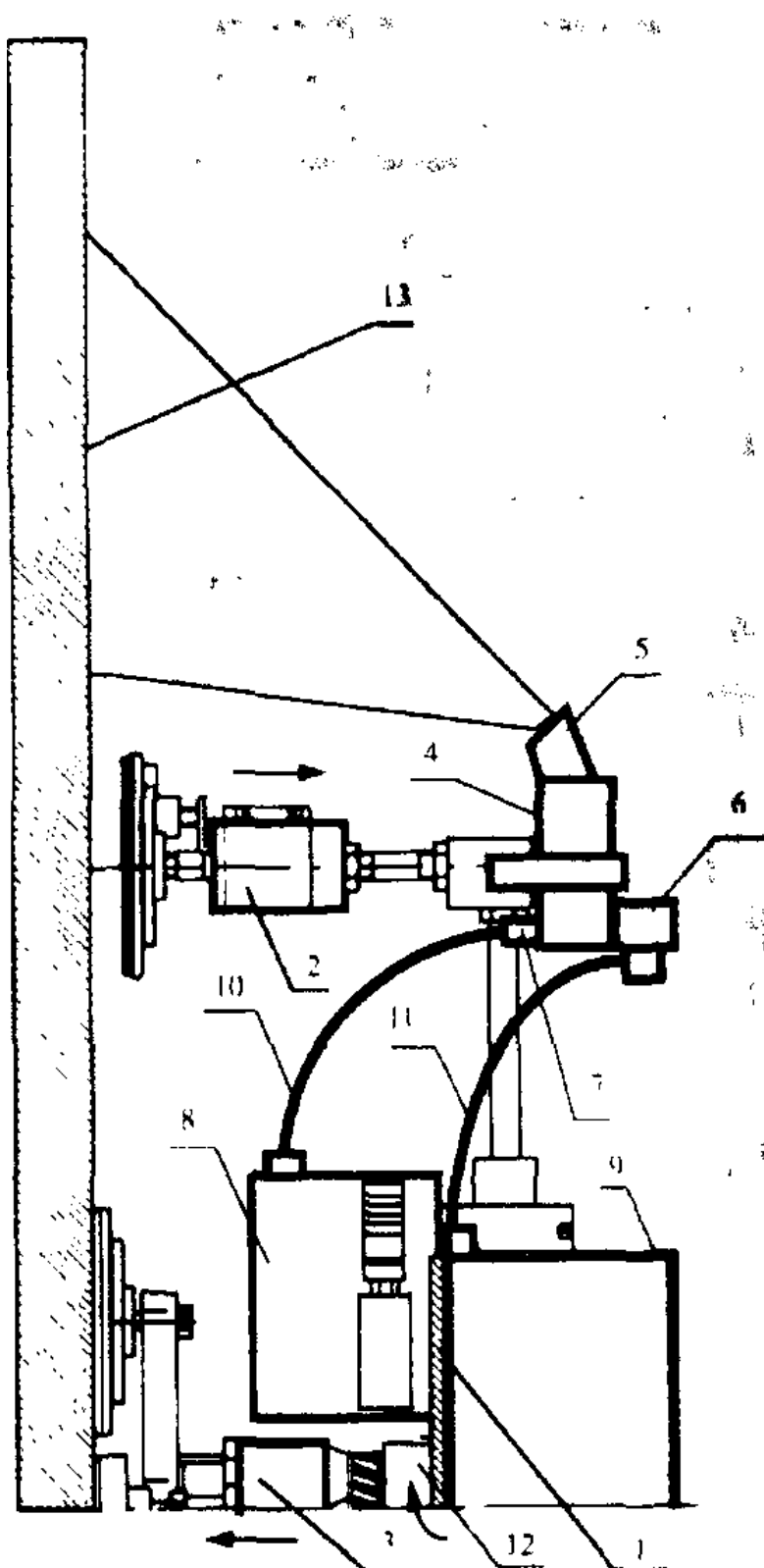


Рис. 8.29 Операция покраски

1 - платформа робота, 2 - внешний подъемный цилиндр, 3 - внутренний подъемный цилиндр, 4 - краскопульт, 5 - сопло, 6 - вход подачи краски, 7 - вход управления, 8 - блок управления подачей краски, 9 - резервуар с краской, 10 - пневматическая линия управления, 11 - линия подачи краски, 12 - узел вращения, 13 - окрашиваемый сектор обрабатываемой поверхности

Покраска осуществляется при повороте платформы робота относительно зафиксированных внутренних педипуляторов.

На рис. 8.30 дан вариант использования ТРВП для автоматического завинчивания винтов.

Операция автоматического завинчивания винтов производится с помощью установленного на платформе робота технологического блока, включающего привод подачи и вращательного движения, а также магазина винтов, осуществляющего последовательную автоматическую засылку винтов в рабочую зону.

Технологический процесс происходит при зафиксированных как внутренних, так и внешних педипуляторах для повышения жесткости конструкции во время операции.

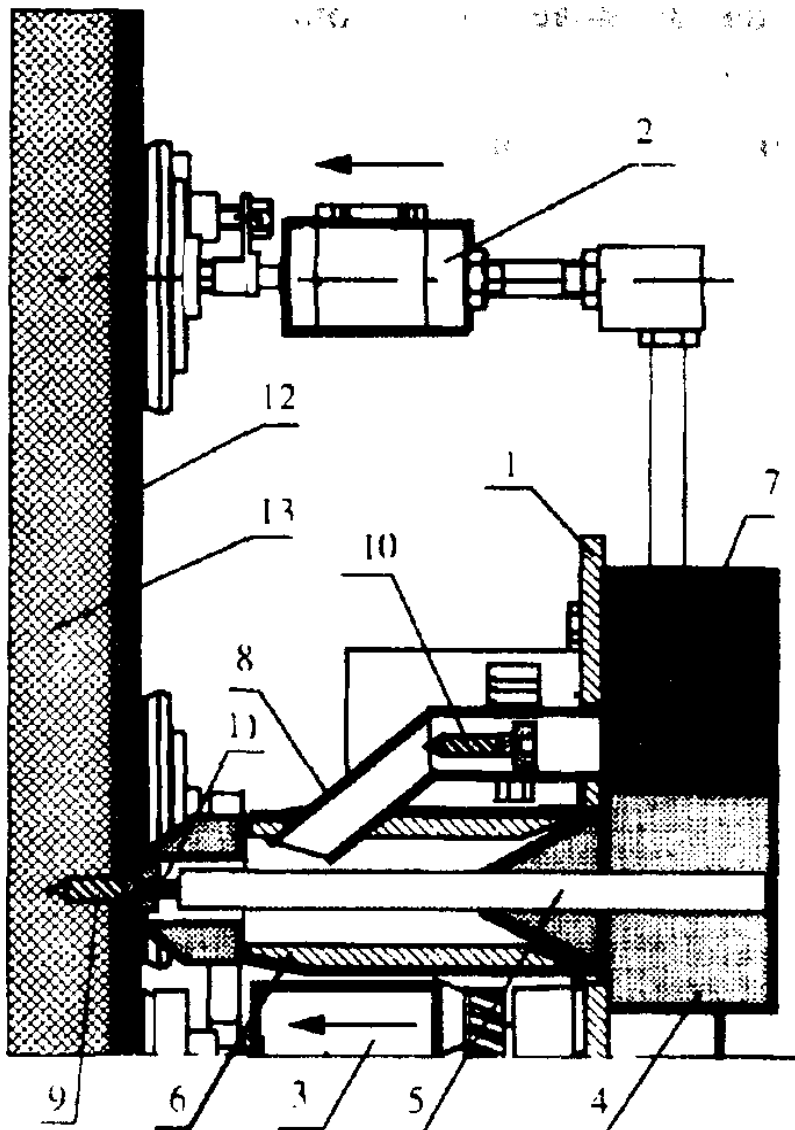


Рис. 8.30 Операция автоматического завинчивания винтов

1 - платформа, 2 - внешний подъемный цилиндр. 3 - внутренний подъемный цилиндр, 4 - привод вращения. 5 - шпindelь, 6 - корпус привода, 7 - магазин винтов, 8 - направляющие, 9 - рабочий винт. 10 - очередной винт, 11 - рабочий орган, 12 - поверхность перемещения, 13 - соединяемая поверхность

Технологический процесс очистки и шлифовки происходит, в отличие от рассмотренных операций, при зафиксированных внешних педипуляторах и свободных внутренних педипуляторах, что позволяет установленному на платформе технологическому инструменту совершать возвратно-поступательные движения посредством транспортного привода робота.

Схема технологического процесса очистки и шлифовки представлена на рис. 8.31.

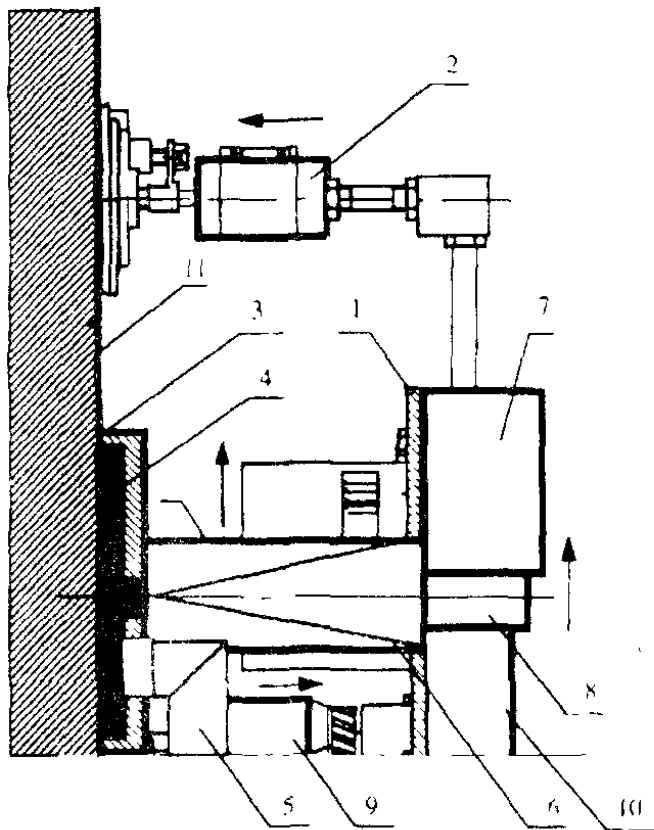


Рис. 8.31 а

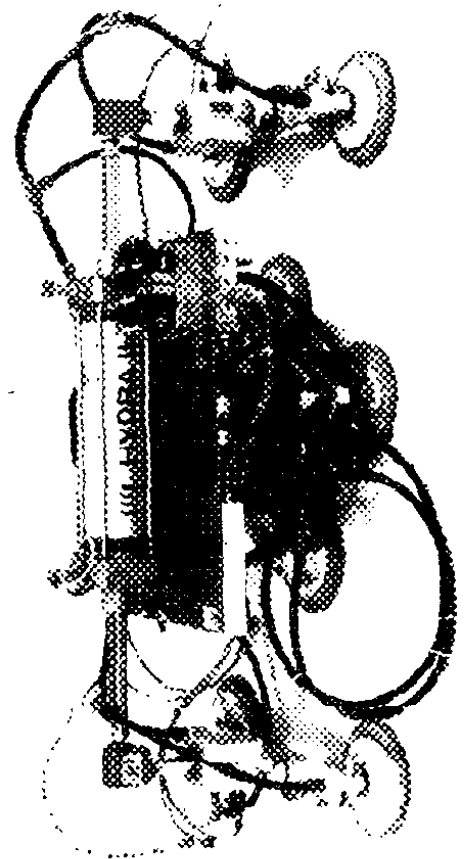


Рис. 8.31 б

Платформа 1 с опущенными внешними подъемными цилиндрами 2 и поднятыми внутренними подъемными цилиндрами 9 прижимает рабочий инструмент 4 с корпусом 3 к обрабатываемой поверхности. После этого задействуется привод 7, который через редуктор 8 и трансмиссию 6 осуществляет вращение инструмента.

Обрабатываемый сектор поверхности определяется шириной инструмента и длиной рабочего хода транспортного цилиндра 10 робота.

Количество циклов движения транспортного цилиндра с инструментом определяется требуемым качеством обработки поверхности. Загрязнения и абразивные частицы с поверхности удаляются из рабочей зоны посредством вакуумного вывода .

При выполнении монтажа дюбелей блок сверления и монтажа устанавливается с одной стороны платформы в соответствии со схемой, рассмотренной в п. 8.3. На рис. 8.31 б показан общий вид многоцелевого робота.

Лекция

Тема 3.2.5. Испытания и анализ функционирования роботов вертикального перемещения в различных технологических комплексах

ВОПРОСЫ

1. Специализированные роботы вертикального перемещения для покраски и инспекции.
2. Подводный робот вертикального перемещения для контактного дугового сверления и резки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Градецкий В.Г., Рачков М.Ю. Роботы вертикального перемещения. М.: Тип. МО РФ. 1997, 223 с. (с.201-212).

1. Специализированные роботы вертикального перемещения для покраски и инспекции

В отличие от многоцелевого ТРВП. специализированные ТРВП предназначены для выполнения одной или нескольких подобных технологических операций.

В результате учета особенностей заданного процесса удастся минимизировать габариты и вес системы приводов, что особенно важно в случае ТРВП.

На рис. 8.32 представлена конструкция специализированного ТРВП для покраски.

Конструкция имеет компактный вариант исполнения за счет совмещения транспортной и технологической систем приводов. Габаритные размеры робота составляют 250 мм х 370мм х 140мм, а вес - 6 кгс вместе с технологическим оборудованием.



Рис. 8.32 Специализированный ТРВП для покраски

В качестве технологического оборудования используется краскопульт с эжекторным насосом, что определяет малый вес технологического модуля. Краскопульт установлен в передней части ТРВП с возможностью регулирования угла распыления краски. Это позволяет задавать площадь закрашиваемого сектора и плотность покраски [146].

На рис. 8.33 и 8.34 даны фотографии конструкции специализированного ТРВП для задач инспекции (соответственно вид сверху и снизу).

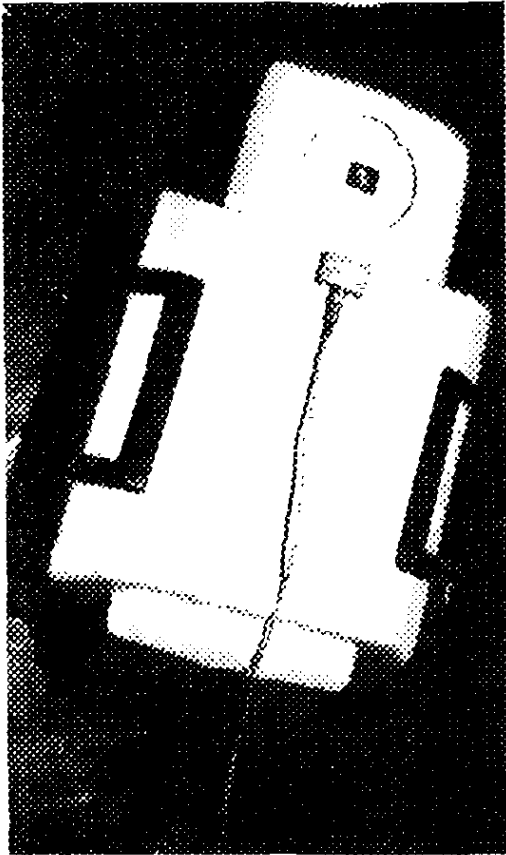


Рис. 8.33 Вид ТРВП сверху

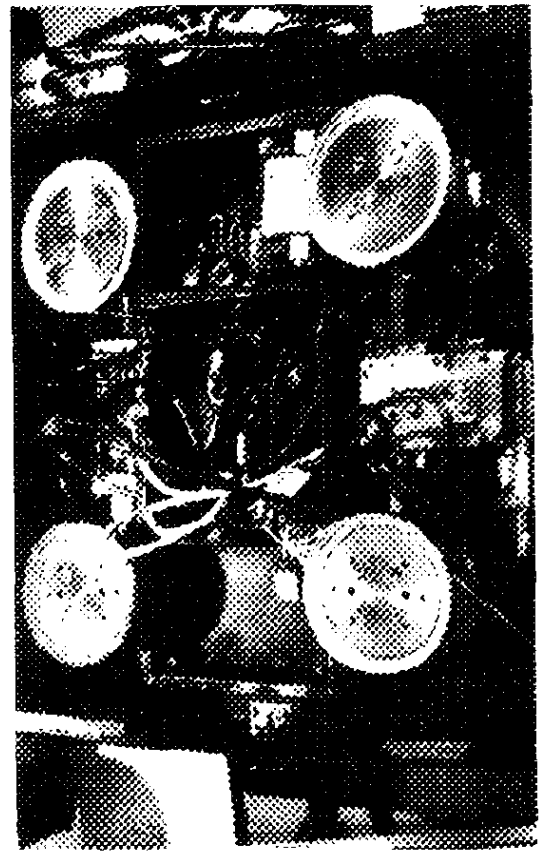


Рис. 8.34 Вид ТРВП снизу

Габаритные размеры робота составляют 360 мм x 1100мм x 250мм, а вес - 10 кгс вместе с технологическим оборудованием.

В качестве технологического оборудования используется ультразвуковой датчик, установленный в передней части на корпусе робота с возможностью поворота. Благодаря этому, кроме задач инспекции, ТРВП обладает способностью самонавигации по опорным базам, а также обхода препятствий.

В роботе использован комбинированный привод, обеспечивающий требуемую маневренность и диапазон рабочих скоростей.

2. Подводный робот вертикального перемещения для контактного дугового сверления и резки

В связи с необходимостью проведения работ по консервации и разборке атомных реакторов устаревших конструкций встает задача резки стальных конструкций в условиях радиоактивности. Специальная конструкция ТРВП, способная автоматизировать указанный процесс, показана на рис. 8.35.

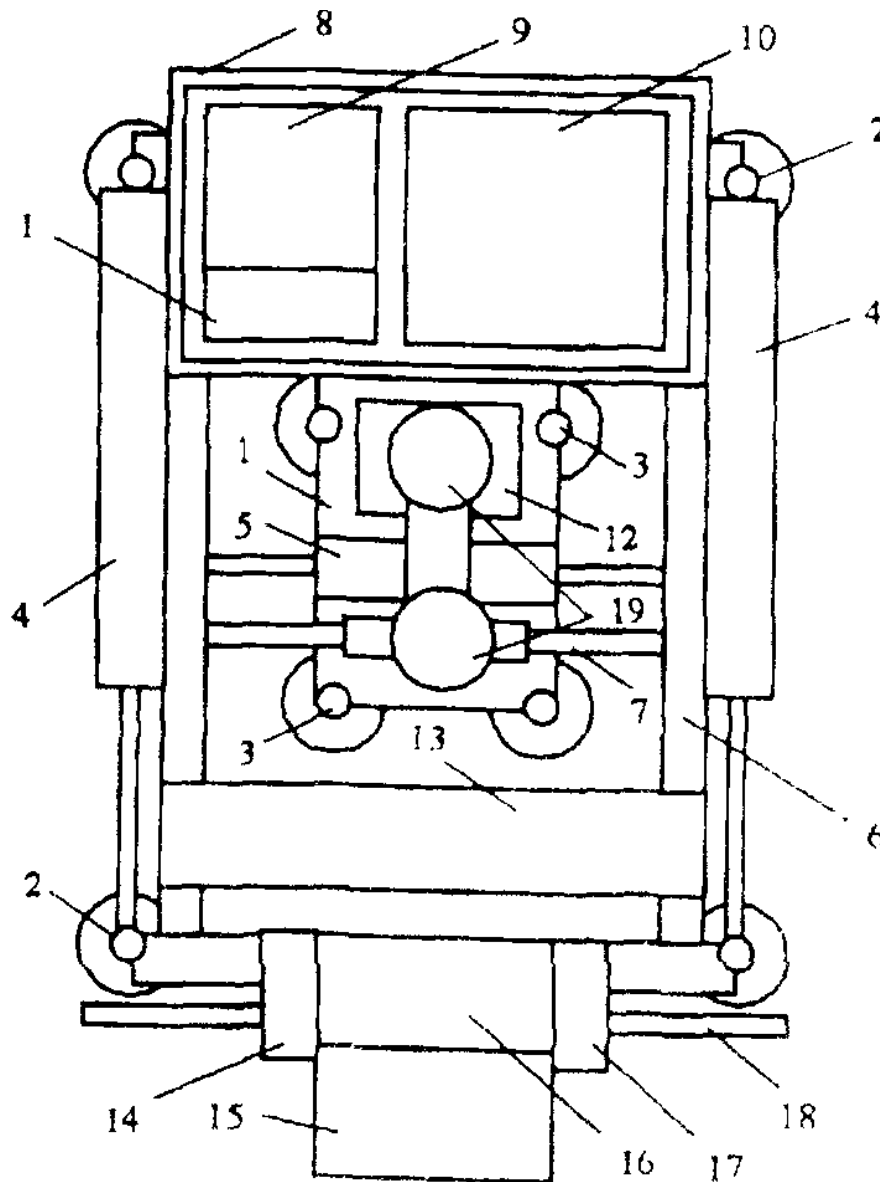


Рис. 8.35 Общая схема подводного ТРВП

Особенностью конструкции является помещение бортового компьютера и блока системы приводов робота в герметичный корпус, установленный на платформе. Выполнение транспортной системы цилиндров, обеспечивающих сканирование поверхности, а также реализацию диагонального движения робота, позволяет осуществлять желаемые траектории движения технологического оборудования.

Управление цифровых образовательных технологий

Для помещения робота на исходную рабочую позицию может быть использовано два способа. Первым способом является собственное движение робота из исходной позиции к месту проведения технологической операции. Этот вариант не требует использования дополнительного транспортного оборудования, однако время движения робота ограничено скоростью транспортной системы приводов. Второй вариант реализуется посредством внешнего манипулятора, который переносит робот из исходной позиции непосредственно в рабочую зону. В исходной позиции робот соединяется с манипулятором посредством внешней транспортной системы захватов. Таким образом робот транспортируется в рабочую зону непосредственно через толщу воды с относительно высокой скоростью. После фиксации робота в рабочей зоне транспортная система захватов отсоединяется от манипулятора и робот производит автономное технологическое движение.

Основные технические характери-

1. Несущая способность	15 кгс
2. Вес без технологического оборуду-	9 кгс
3. Максимальный шаг	80 мм
4. Диапазон транспортных скоро-	(0,6 - 3) м/мин
5. Приводная система	комбиниро-
6. Максимальная высота преодо-	
препятствий	40 мм
7. Система захватов	вакуумная
8. Технологическое оборудование	
- нес (максимальный)	10 кгс
- материал электрода	графит
- технологическая скорость	(0.01 - 6)
9. Габаритные размеры	
- длина	590 мм
- ширина	430 мм
- высота	220 мм
10. Питание	
- давление воздуха	0,6 МПа
- Напряжение на клапанах транс-	
системы приводов	24 В (0.5 А)
- напряжение на технологической	
приводов	44 В (2000 А)

Использование ВЗ с эжекторами под водой имеет ряд особенностей. Прежде всего разница давления между объемом захвата и внешним давлением зависит от глубины нахождения робота под водой. Чем глубже рабочая зона робота, тем лучше соединение его с поверхностью перемещения из-за увеличения давления воды на 9,8 кПа на метр. В то же время прямое использование пневматических эжекторов под водой требует специальных мер для сохранения их динамических

характеристик. Одной из таких мер является использование дополнительного газового объема в выходной линии эжектора, равной эффективному объему пневматических полостей ВЗ [156].

Вид ТРВП под водой показан на рис. 8.36.

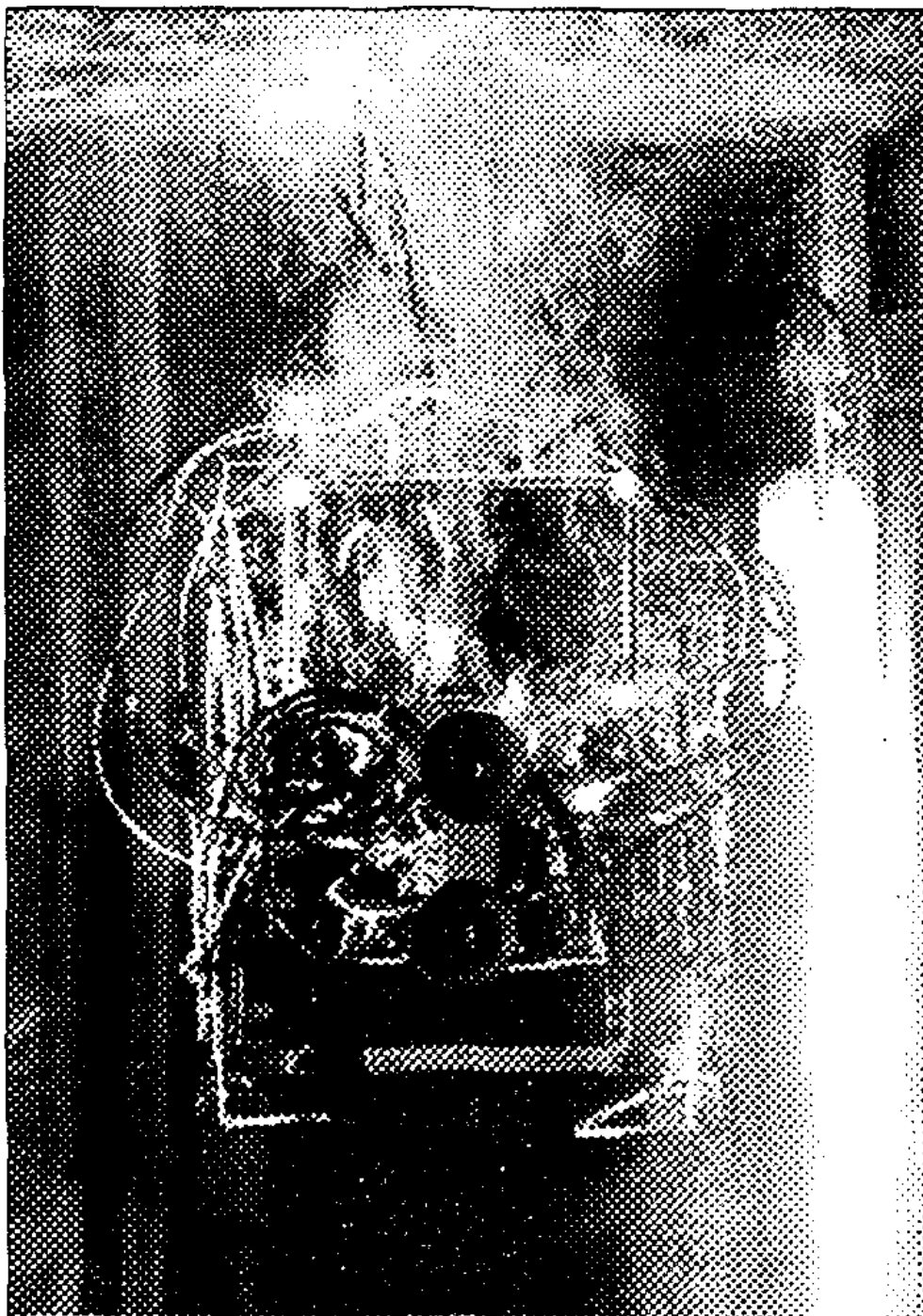


Рис. 8.36 Движение робота под водой

Диаметры захватов и их усилия под водой могут быть найдены с помощью диаграммы, приведенной на рис. 8.37. Захват диаметром 100 мм используется в

качестве базового варианта. Этот захват обеспечивает усилие удержания в 450 Н при уровне вакуума 60 % на уровне поверхности воды. Под водой сила удержания изменяется пропорционально до 900 Н на глубине 10 м. По диаграмме легко найти другие диаметры захватов и удерживающих усилий для различных возможных уровней вакуума.

Усилие захвата под водой, Н

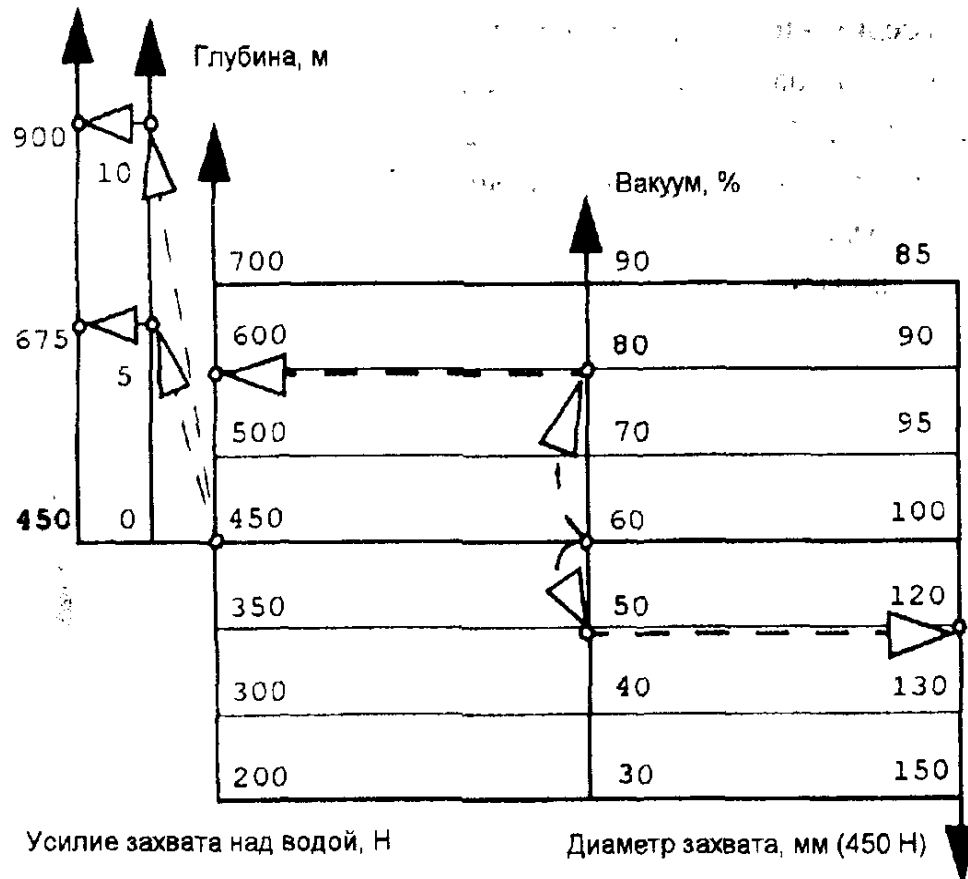


Рис. 8.37 Диаграмма расчета параметров подводного ТРВП

Силовая компенсация веса робота и технологического усилия производится за счет выталкивающей силы, действующей на робот во время транспортного и технологического движения под водой. Схема силовой компенсации представлена на рис. 8.38.

Выталкивающая сила автоматически образуется внутри корпуса бортовой системы управления посредством давления воздуха, поступающего в корпус с выходов электропневматических клапанов. В результате газовая среда внутри герметичного корпуса создает подъемную силу робота. Указанное давление служит также дополнительной мерой, обеспечивающей водонепроницаемость конструкции. Величина подъемной силы регулируется с помощью выхлопного клапана в линии соединения корпуса с атмосферой. Величина момента, создаваемого подъемной

силой, устанавливается с помощью настроечного кронштейна изменением его длины. Автоматическая адаптация величины подъемной силы для соответствующей компенсации технологического усилия достигается посредством обратной связи по усилию в контуре управления роботом.

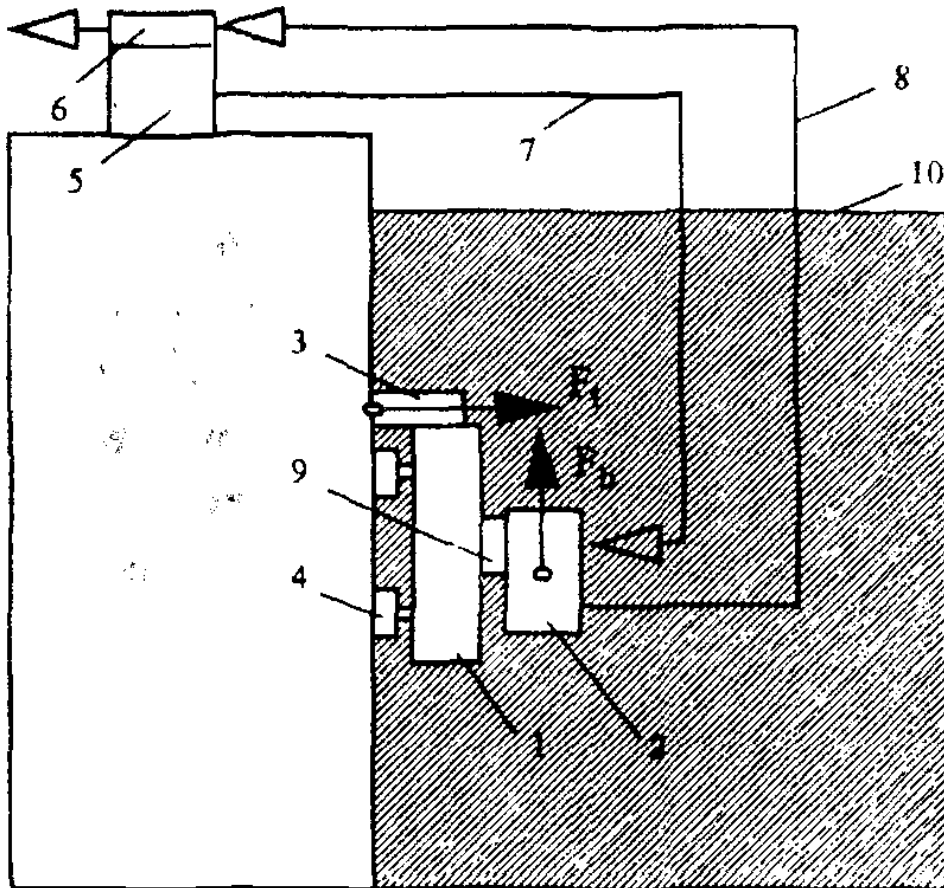


Рис. 8.38 Силовая компенсация подводного ТРВП

1 - ТРВП, 2 - герметичный корпус, 3 - технологический блок, 4 - захват. 5 - компрессор. 6 - выхлопной клапан, 7 - входная линия, 8 - выходная линия, 9 - настроечный кронштейн. 10 - уровень воды, F_t - технологическое усилие, F_b - выталкивающая сила

Важными требованиями к технологическому оборудованию для подводных ТРВП являются малый вес, компактность и надежность управления. Относительно небольшие технологические усилия также являются желаемыми. Этим свойствам соответствует технологическое оборудование по контактному дуговому сверлению и резке. Указанная технология может быть использована для всех видов металлов. Максимальная глубина обработки зависит только от геометрии электрода, а форма объекта практически не влияет на технологический процесс. Таким образом данная технология позволяет обрабатывать стальные компоненты сложных структур в конструкциях ядерных реакторов значительной толщины. С точки зрения радиации

подводная техника является предпочтительной для использования. Для реализации технологического процесса не требуется никаких компонент кроме воды и окружающая среда предохраняется от технологических загрязнений.

Схема системы приводов технологического оборудования показана на рис.2.39.

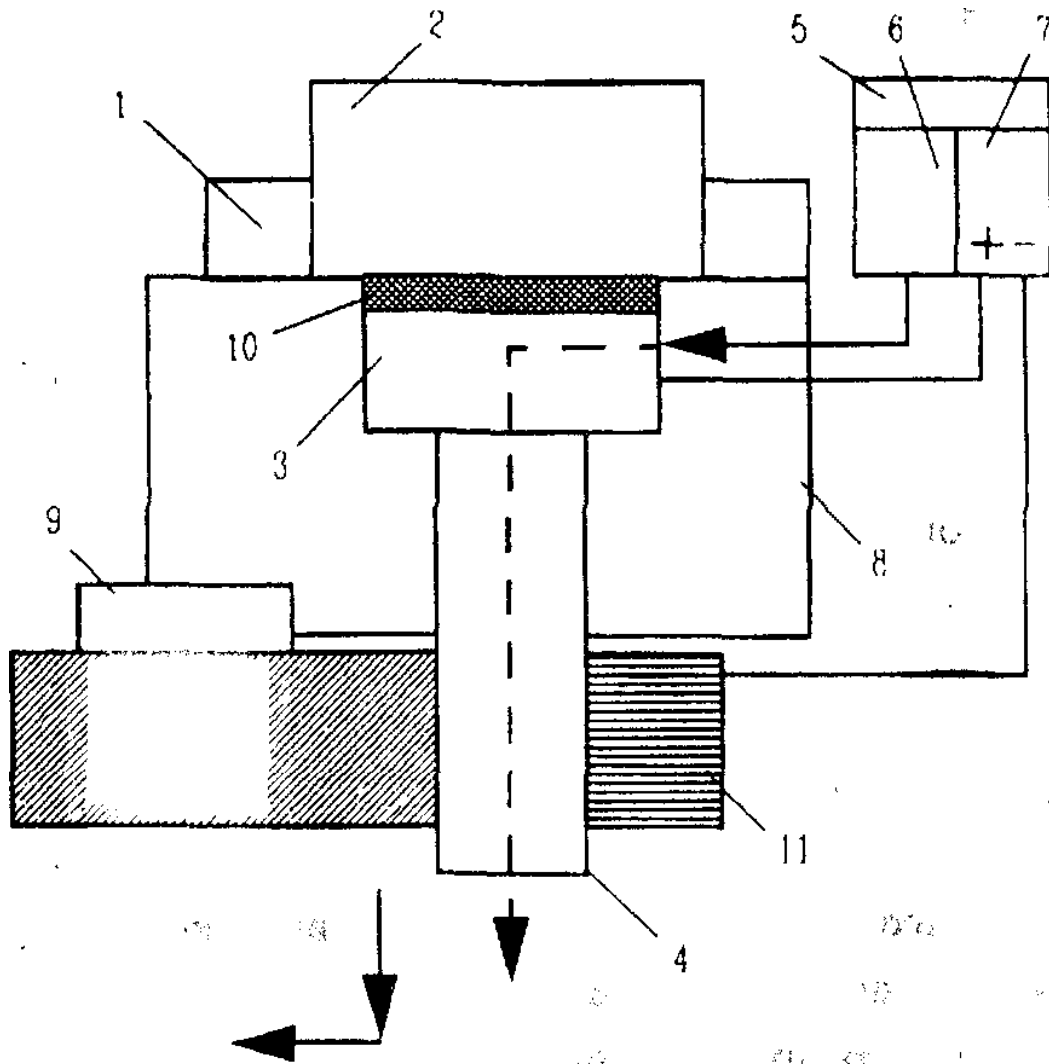


Рис. 8.39 Технологический привод подводного ТРВП

Технологический инструмент устанавливается на силовой раме робота в его передней части. Он состоит из технологического привода, электрода и системы охлаждения. Блок питания состоит из источника воды под давлением и силового источника напряжения. После того как РВП достигает рабочей зоны технологический привод подводит электрод к объекту с требуемой скоростью. Через площадь контакта между электродом и объектом начинает протекать ток в 2000 А. Материал площади контакта со стороны объекта испаряется из-за высокой концентрации

энергии на данном участке. В образовавшемся зазоре появляется дуга, которая выплавляет материал в области контакта. Расплавленный материал удаляется из рабочей зоны с помощью водяных струй, которые образуются с помощью каналов промывки, находящихся в электроде и соединенных с источником воды под давлением. Когда расстояние между электродом и объектом увеличивается, дуга разрывается. При продолжении движения электрода между ним и объектом образуется следующая дуга, что продолжает процесс сверления или резки объекта в зависимости от направления движения электрода.

Во время сверления внешние и внутренние педипуляторы фиксируются на объекте одновременно и находятся в нижней позиции. Во время резки зафиксированы только внутренние педипуляторы, а силовая рама с технологическим оборудованием совершает заданное движение по рабочей траектории вдоль объекта. Рабочая рама находится в нижней позиции, для того чтобы уменьшить момент от технологического усилия и защитить систему приводов и систему управления во время технологического процесса от термических воздействий посредством экрана, который отделяет технологическое оборудование от транспортного модуля.

Важным аспектом является очистка робота от радиационных загрязнений после выполнения технологических операций в реакторных цехах. Наиболее сложной частью робота в смысле его дезактивации являются пневматические соединения приводов. Для того, чтобы упростить деконтаминацию пневматических коммуникаций, могут быть использованы три различные схемы питания системы приводов.

Первая схема, приведенная на рис. 4.40, имеет центральное расположение блока управления приводами. Питающие коммуникации соединены с каждым приводом от центра платформы робота. Эта схема является наиболее компактной и недорогостоящей, однако требует максимального количества защитных оболочек, в которых проходят коммуникации.

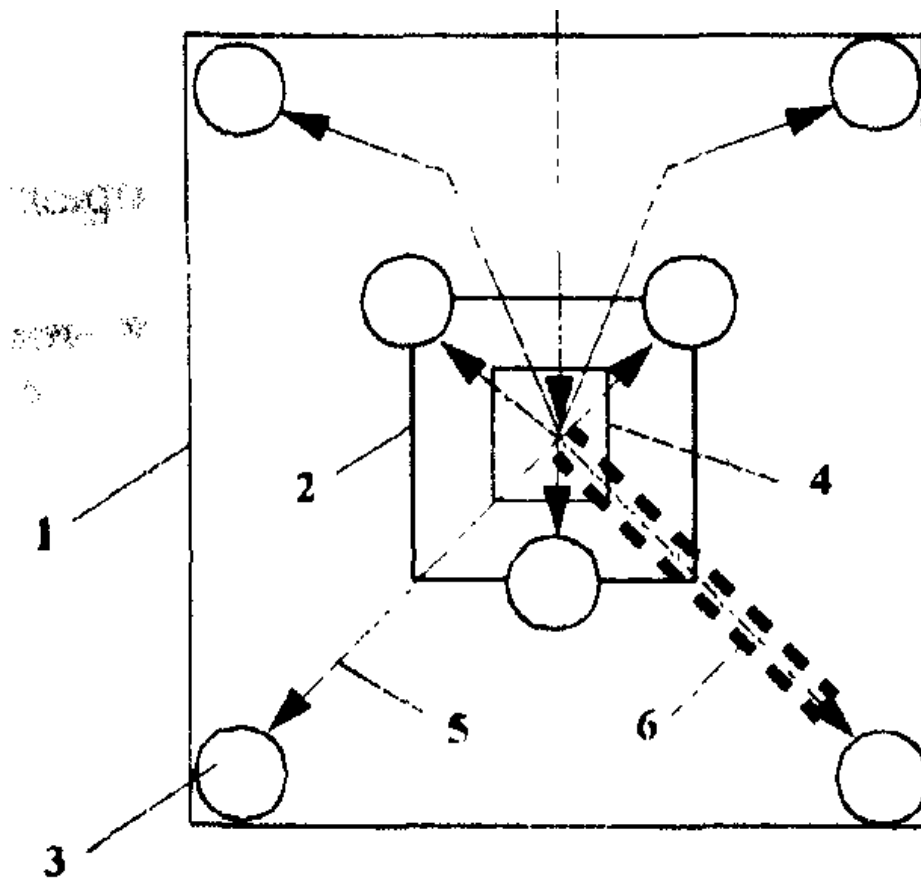


Рис. 8.40 Центральное расположение блока управления приводами
1- внешняя платформа, 2 - внутренняя платформа, 3 - приводной элемент,
4 - блок управления, 5 - коммуникации. 6 - защитная оболочка

Во второй схеме используется децентрализованная положения блока управления приводами (рис. 8.41). Каждый управляющий клапана находится рядом с соответствующим приводом. Это позволяет минимизировать количество защитных оболочек, но является более дорогостоящим.

Третья схема (Рис. 8.42) использует вместо защитных оболочек герметичский защитный корпус, который полностью закрывает как систему коммуникаций, так и систему приводов робота. Эта схема является наиболее простой в смысле осуществления дезактивации. К ограничениям данной схемы можно отнести наличие эластичной нижней части корпуса, которая деформируется во время движения внутренней платформы.

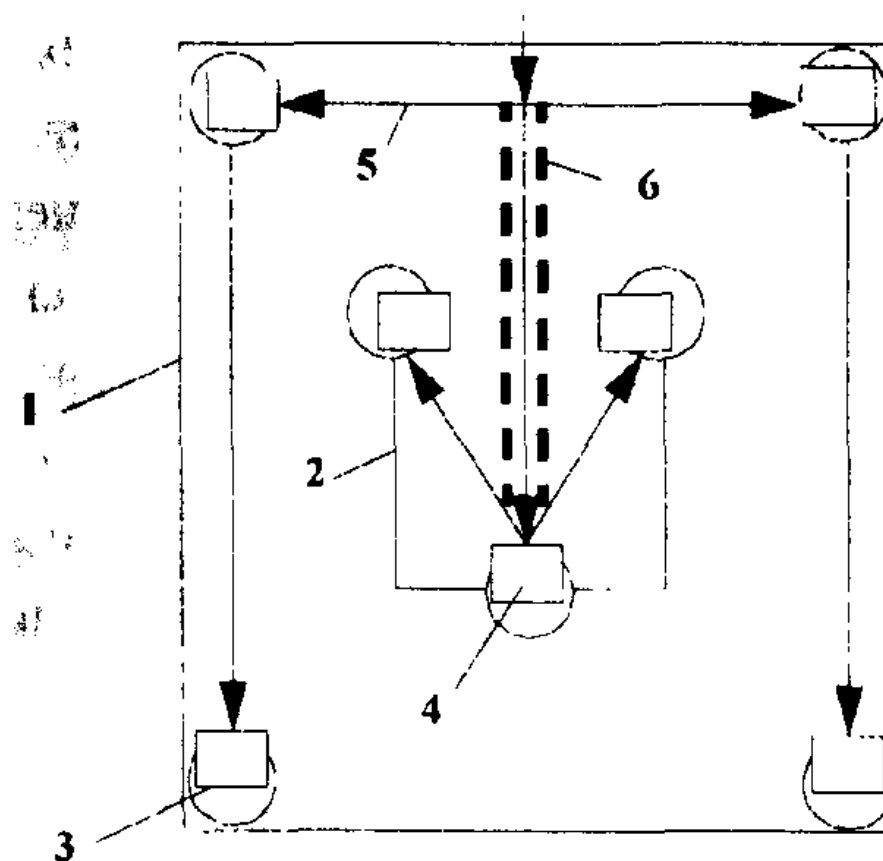


Рис. 8.41 Децентрализованное расположение блока управления приводами
1 - внешняя платформа, 2 - внутренняя платформа, 3 - приводной элемент, 4 - элемент блока управления, 5 - коммуникации, 6 - защитная оболочка

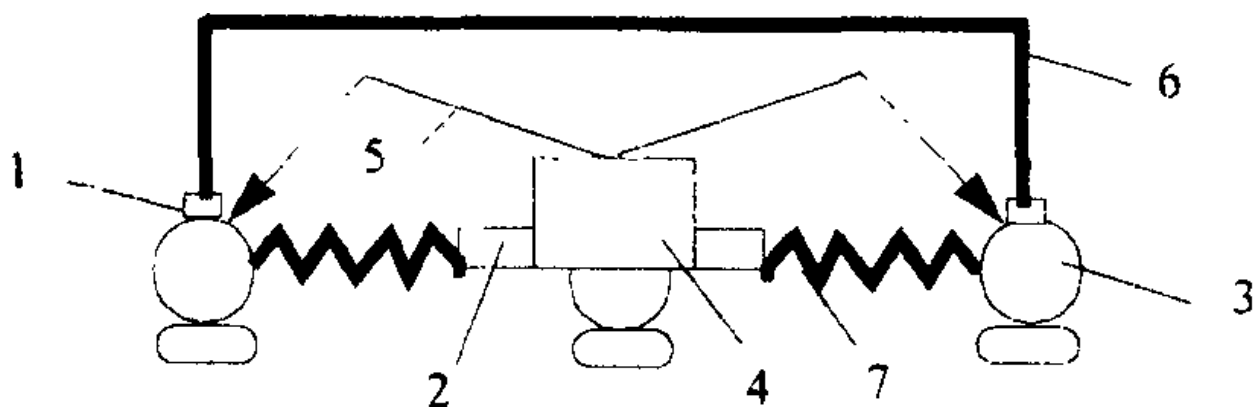


Рис. 8.42 Схема с герметическим корпусом
1 - внешняя платформа, 2 - внутренняя платформа, 3 - приводной элемент, 4 - блок управления, 5 - коммуникации, 6 - герметический защитный корпус, 7 - эластичная часть корпуса

Выбор оптимальной схемы зависит от условий эксплуатации робота и уровня радиационных загрязнений. Дезактивация осуществляется с помощью типовых методов, таких как обработка химическими растворами или электролитическая обработка.

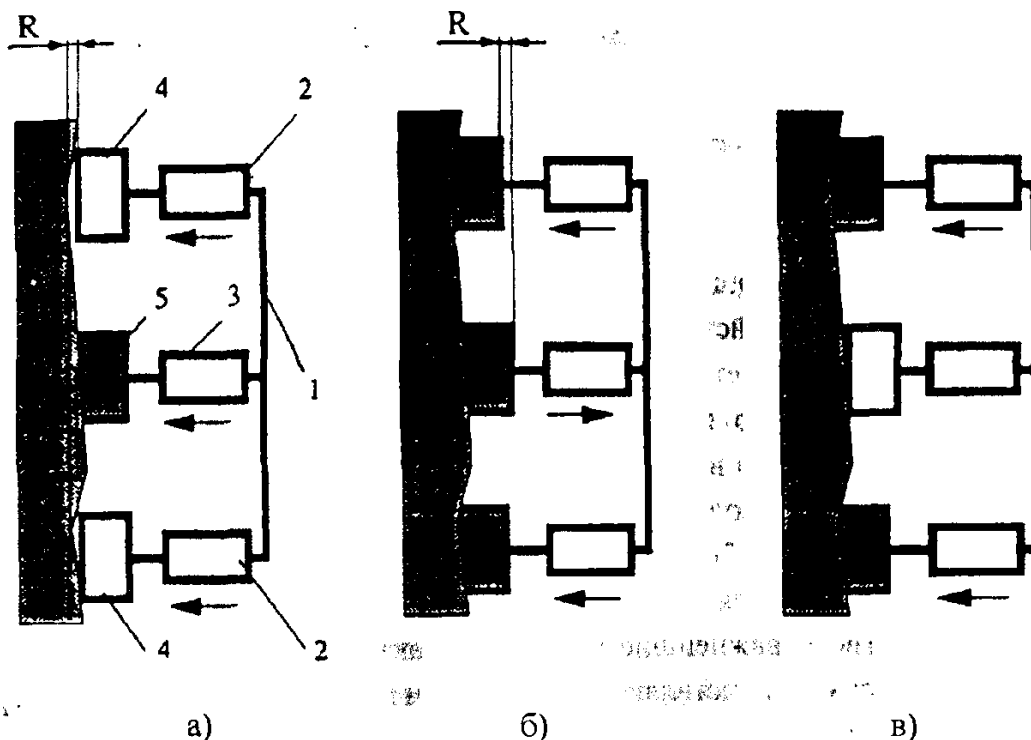


Рис. 8.43 Уплотняющий алгоритм походки робота

На рис. 8.43 а,б,в приведен алгоритм походки робота при необходимости уплотнения неровностей высотой R под захватами.

На первом этапе внешние 2 и внутренние 3 подъемные привода платформы 1 робота выдвинуты до контакта захватов 4 с поверхностью. При этом захваты 5 внутренних подъемных приводов зафиксированы на поверхности.

На втором этапе внутренние подъемные привода через платформу прижимают захваты внешних подъемных приводов к поверхности, уплотняя ее неровности. После этого захваты внешних подъемных приводов фиксируются на поверхности.

На третьем этапе захваты внутренних подъемных приводов соединяются с атмосферой, и робот готов к выполнению следующего шага.

Таким образом осуществляется самоуплотнение захватов при транспортном движении робота. Аналогичный алгоритм походки может быть использован при необходимости для управления приводами других рассмотренных ТРВП.

Лекция

Тема 3.3.1. Значение мобильных роботов повышенной проходимости

ВОПРОСЫ

1. Задачи, решаемые мобильными роботами повышенной проходимости.
2. Мобильные роботы для исследования поверхности Земли и других планет.
3. Мобильные роботы для выполнения технологических операций.
4. Мобильные роботы для экстремальных ситуаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Градецкий В.Г. и др. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука. 2001, 360 с. (5-26).

1. Задачи, решаемые мобильными роботами повышенной проходимости

В литературе по робототехнике и автоматизации даются различные определения понятия "робот", которые характеризуют этот класс управляемых систем с различных точек зрения [14,46, 76].

Не повторяя имеющиеся определения, обратим внимание на то, что основное назначение роботов состоит в эффективной замене человека при выполнении различных механических действий, осуществлении управления, принятии решений с улучшенными, по сравнению с человеком, возможностями.

Начиная с 40-х годов, когда появились первые системы практического применения, к которым можно применить современное определение "робот", и по настоящее время (начало XXI в.) робототехника прошла большой путь в развитии.

И сегодня ее по праву называют одним из тех направлений техники, которое будет определять потенциал страны в нынешнем столетии.

Помимо двух основных направлений робототехники - промышленной и специальной, связанной с работой в агрессивных и неорганизованных средах, где присутствие человека в рабочей зоне сопряжено с опасностью или риском для жизни, быстро развивается так называемая робототехника для нетрадиционных сфер применения - строительства, сельского хозяйства, сервиса, медицины. Причем медицинская робототехника, а также микроробототехника оформились как направления именно в конце XX в. в связи с большими успехами в области микросистемотехники .

В настоящее время исследования в области непромышленной робототехники координируются в рамках международной программы по перспективной робототехнике (International Advanced Robotics Program). В ней участвуют более 15 стран, в том числе и Россия.

И все же, несмотря на многочисленные примеры успешного применения роботов и робототехнических систем в перечисленных сферах человеческой деятельности, разработка роботов для экстремальных условий и ситуаций, агрессивных и неструктурированных (неорганизованных) сред остается одним из важнейших направлений робототехники и охватывает различные аспекты в области систем приводов, теоретической и прикладной механики, вычислительной техники, искусственного интеллекта, в других смежных областях знаний и практического применения.

К основным сферам применения таких роботов относятся:

- научные исследования труднодоступных участков земной поверхности, поверхности Луны и планет Солнечной системы;
- технологические работы на космических орбитальных станциях;
- ликвидация последствий техногенных аварий и катастроф;
- проведение профилактических и ремонтных работ на предприятиях и объектах, атомной, химической, нефтегазовой промышленности;
- выполнение строительных операций и обслуживание высотных зданий;
- ремонт морских и речных судов;
- "гуманитарное" разминирование (ликвидация минных полей после военных конфликтов);
- обезвреживание взрывоопасных предметов при антитеррористических операциях.

Для успешного выполнения перечисленных задач роботы должны обладать как мобильностью, так и способностью интерпретировать, планировать и выполнять полученное задание без вмешательства извне, используя бортовую вычислительную систему. Они должны достигать заданную цель в известной или неизвестной среде, избегая столкновений со стационарными препятствиями и подвижными объектами.

В дальнейшем будем называть мобильными роботами повышенной проходимости (МРПП) роботы с автоматическим или супервизорным управлением, предназначенные для движения как по горизонтальным поверхностям с преодолением препятствий, так и при необходимости для перемещений по сложным или произвольно ориентированным в пространстве поверхностям - наклонным, вертикальным, потолочным. Такие роботы должны обладать элементами искусственного интеллекта и возможностью принятия решений, что реализуется разви-



Рис. 1.1.1. Виды сухопутных мобильных роботов

тыми измерительно-информационными и управляющими системами. Переход с одной поверхности на другую МРПП производит после анализа ситуации и подачи соответствующих команд на систему приводов транспортно-механической системы.

К роботам повышенной проходимости относятся мобильные роботы горизонтального перемещения, способные преодолевать различные препятствия, и которые потенциально могут быть оснащены модулями вертикального перемещения, а также мобильные роботы, специально спроектированные для движения в сложных

условиях окружающей обстановки. Такие роботы должны быть оснащены захватными устройствами, обеспечивающими удержание на поверхности, по которой происходит перемещение.

Решения целого ряда задач, возникающих при движении по сложным поверхностям, например, обход препятствий, планирование траектории движения, принятие решений, движение в условиях неопределенности и ряд других, которые приводятся в данной работе, являются общими как для роботов горизонтального, вертикального перемещения, так и для МРГГО.

Поэтому, в дальнейшем изложении данной главы отметим области применения мобильных роботов с обобщающих позиций по тем направлениям, которые получили практическое использование, а также по перспективным направлениям, требующим своего дальнейшего развития.

В настоящее время в России и развитых странах мира разработаны десятки прототипов мобильных роботов, способных перемещаться по каким-либо специфическим поверхностям - по неровному грунту с препятствиями в виде уступов, неровностей, барьеров, по лестницам, трубам, вертикальным стенам, а также способных совершать переход с одной поверхности на другую и оснащенных специализированными устройствами для выполнения необходимых операций.

В монографии [46] выделяется четыре принципиально различных типа мобильных роботов: наземные (сухопутные), воздухоплавающие, водоплавающие и подземные. С учетом последних достижений классификацию наземных мобильных роботов можно представить следующим образом (рис. 1.1.1).

2. Мобильные роботы для исследования поверхности Земли и других планет

Первые мобильные роботы для исследования поверхностей Луны и планет солнечной системы начали разрабатываться более 30 лет назад. Примером успешного применения таких машин стали советские мобильные роботы Луноход-1 и Луноход-2. В настоящее время роботы-планетоходы разрабатываются во многих промышленно развитых странах. Такие роботы должны быть способны передвигаться по различным поверхностям со множеством препятствий (кратеры, камни), по сыпучим (песчаным) грунтам, уметь взбираться на уступы, преодолевать трещины. При этом для планетоходов дополнительным и очень важным требованием является минимальный вес из-за доставки летательным аппаратом. В качестве движителя могут использоваться колеса, гусеницы или ноги. Для увеличения проходимости в ряде последних разработок используется шагающий и колесношагающий тип

движения [140]. Испытания роботов проводят в районах каменистых и песчаных пустынь, т.е. в условиях, максимально имитирующих поверхности других планет.

Во ВНИИТРАНСМАШе (С.-Петербург, Россия) разработано шестиколесное шасси IARES-L сложной кинематики, которое имеет 19 степеней подвижности и 17 активных шарнирных звеньев [154]. Оно может двигаться по сложно ориентированным в пространстве поверхностям, используя колесно-шагающий принцип движения (рис. 1.2.1) и при этом нести полезную нагрузку до 70 кг. Собственный вес робота - 80 кг, максимальная скорость на труднопроходимых поверхностях - до 0,35 м/с, габаритные размеры - 1235 • 1200 • 720 мм.

В 1997 г. американский космический аппарат Pathfinder приземлился на поверхность Марса [205]. Помимо научной аппаратуры на его борту находился мини-атюрный мобильный

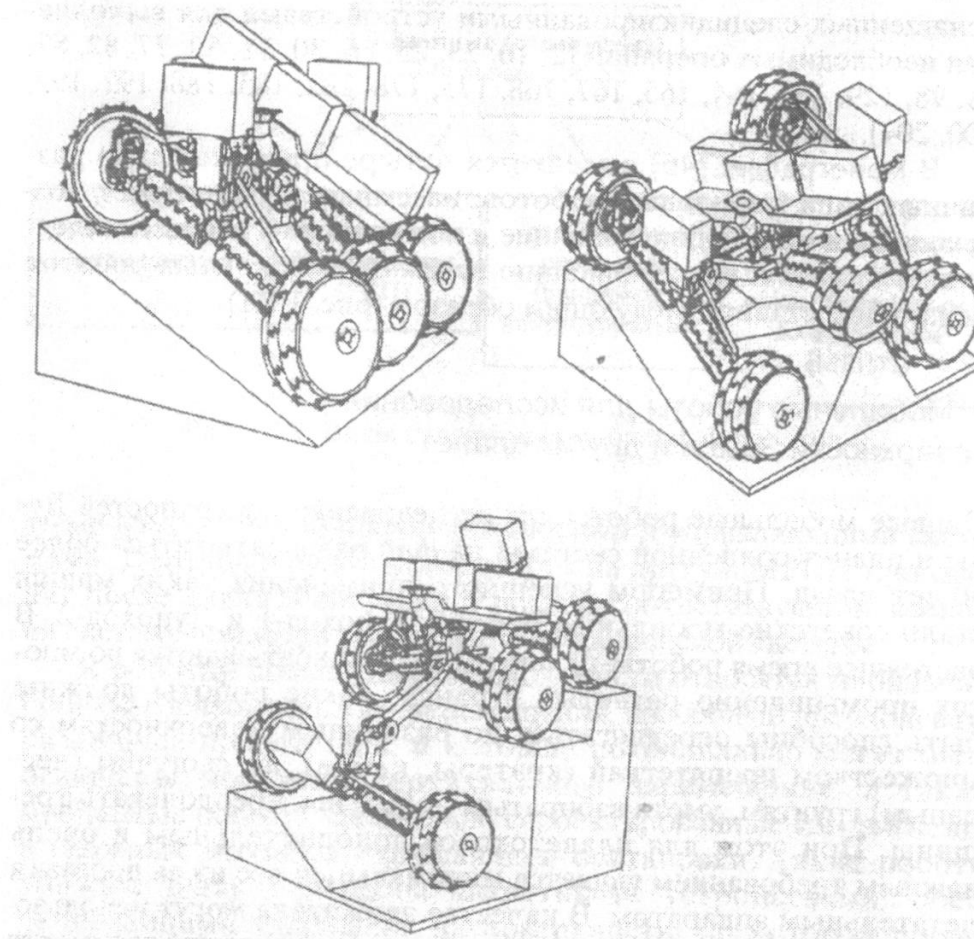


Рис. 1.2.1. Вид шестиколесного шасси IARES-L (ВНИИТРАНСМАШ, Россия) при преодолении различных препятствий

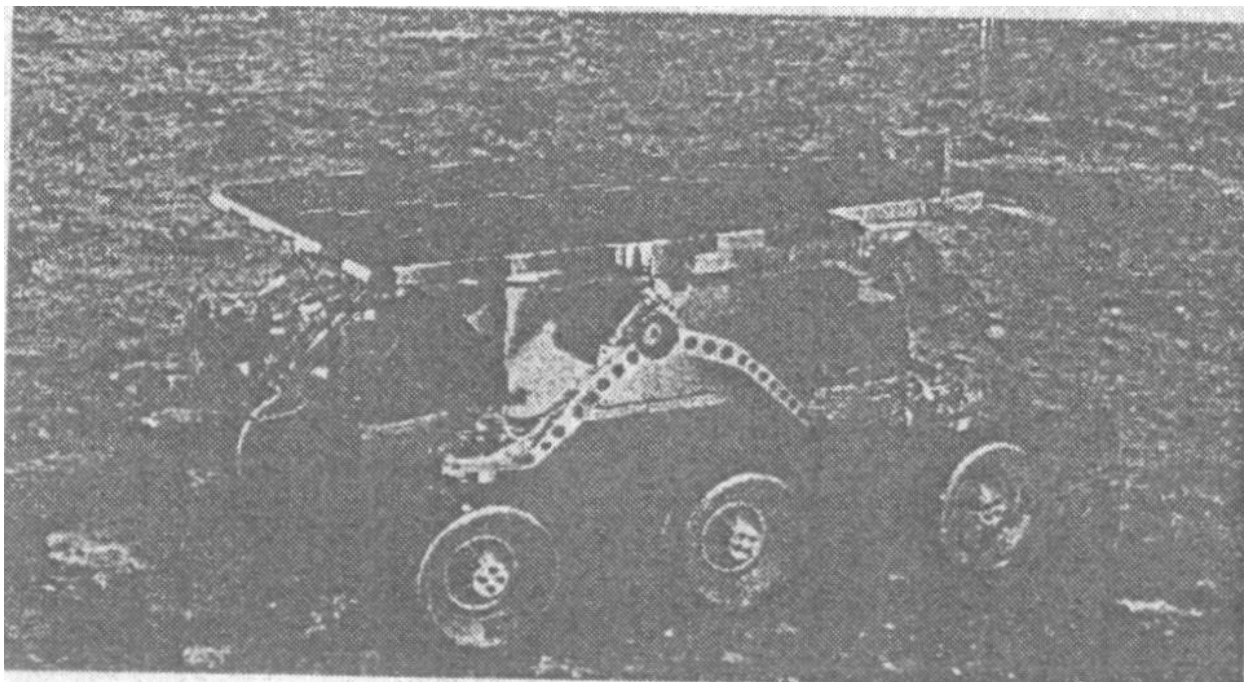


Рис. 1.2.2. Марсоход Sojourner (США)

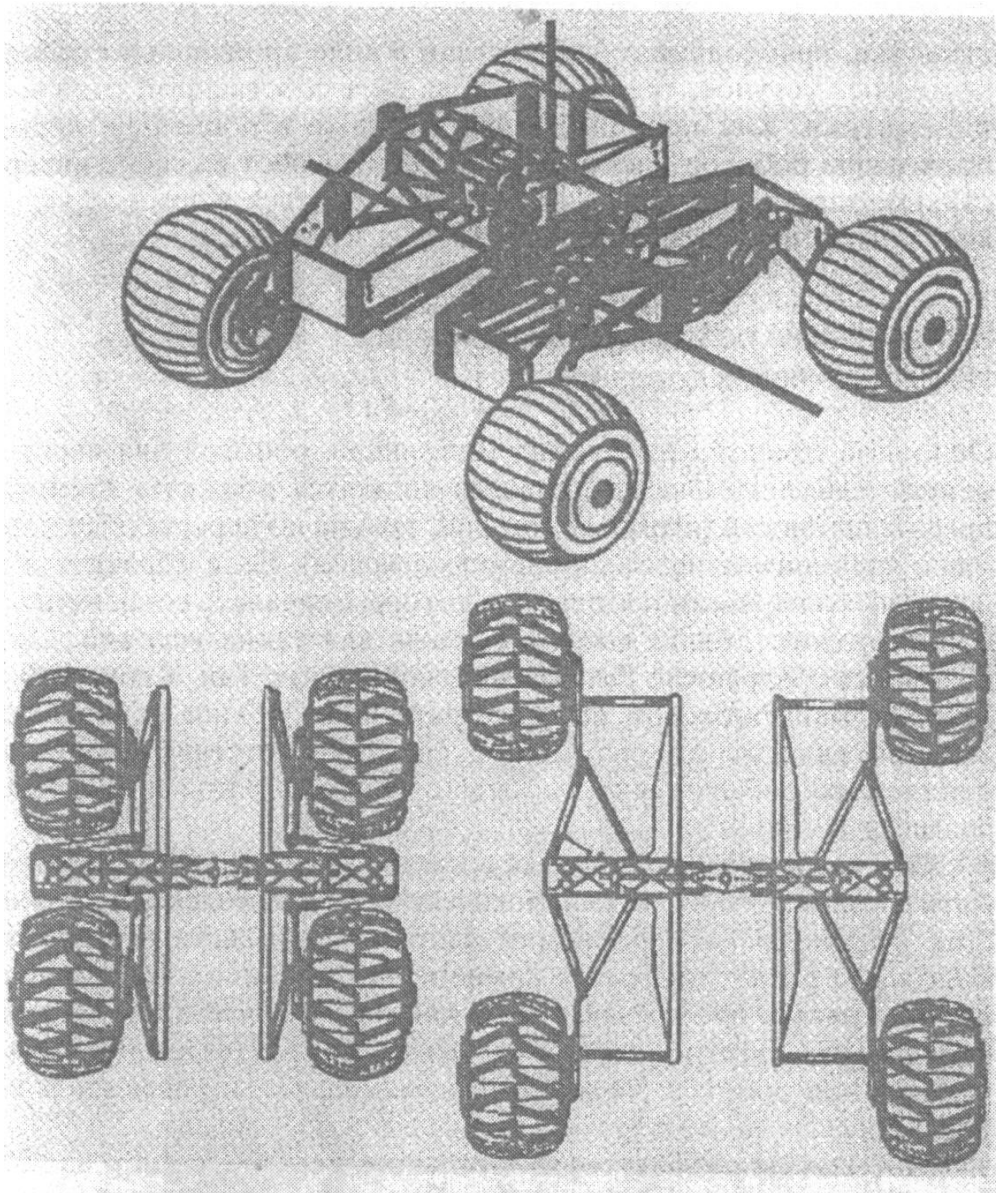


Рис. 1.2.3. Мобильный робот Nomad (США) с изменяемым шасси шестиколесный робот Sojourner (рис. 1.2.2). Его размеры: 68 • 48 • 28 см, общая масса - 16 кг. Робот адаптируется к профилю поверхности и может преодолевать препятствия в 2 раза больше диаметра колеса.

В Университете Carnegie Mellon (США) разработан четырехколесный прототип лунного мобильного робота Nomad с регулируемым шасси (рис. 1.2.3). Он имеет массу 725 кг, минимальные размеры: 1800 • 1800 • 2400 мм; может двигаться со скоростью до 0.5 м/с.

Общим для всех современных роботов-планетоходов является способность к перемещению в заранее неопределенной обстановке, преодолению препятствий в виде произвольно расположенных уступов, трещин и т.п. за счет собственной сложной кинематики. Как правило, разработанные в последнее время прототипы

роботов-планетоходов представляют из себя универсальное шасси, которое может использоваться в земных условиях для решения самых разнообразных задач.

3. Мобильные роботы для выполнения технологических операций

Основной сферой применения мобильных роботов для выполнения технологических операций являются объекты ядерной промышленности (атомные станции, заводы по переработке топлива, предприятия по захоронению отходов). Если обратиться к истории, то первыми роботами, с которых началась современная робототехника, были именно роботы для таких условий. Они появились сразу после Второй мировой войны. Так, в конце 40-х годов в Оак-Риджской лаборатории (США) были начаты исследовательские программы по созданию дистанционно управляемых роботов для работы с радиоактивными материалами.

Однако в настоящее время в связи с необходимостью автоматизации целого ряда технологических операций, представляющих определенный риск для здоровья и жизни человека, постоянно растет интерес к применению мобильных роботов в таких отраслях промышленности, как строительство, судостроение, химия, электроэнергетика. Ниже рассмотрены примеры применения роботов согласно классификации, приведенной на рис. 1.1.1.

Мобильные роботы горизонтального перемещения - наиболее многочисленная (по числу прототипов) группа роботов с различными типами движителей - колесными, гусеничными, шагающими, комбинированными. Конструкция их транспортно-механической системы позволяет им совершать движения по сложно ориентированным в пространстве поверхностям - уступам, лестницам и т.п., что расширяет возможности их применения.

Колесные роботы. На рис. 1.3.1(а, б) представлен шестиколесный робот HELIOS-V (Tokyo Institute of Technology, Япония), который способен со-

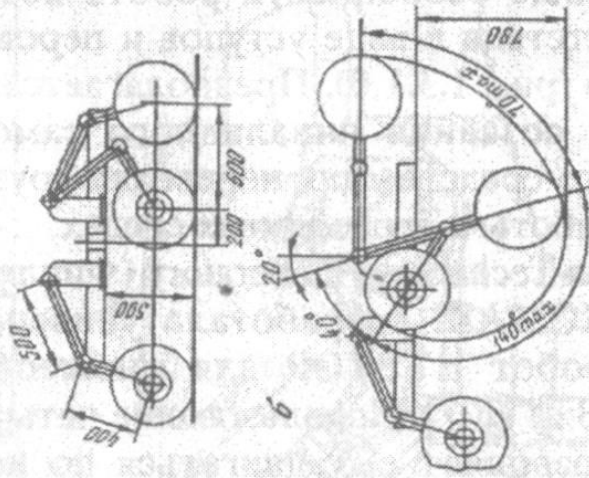
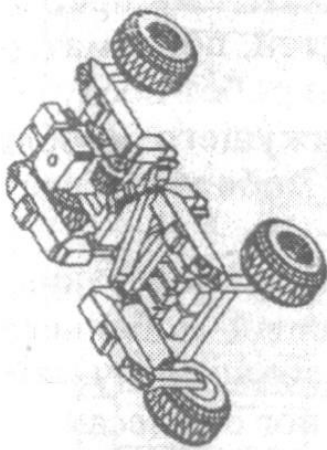


Рис. 1.3.1. Схема шестиколесной платформы HELIOS-V (Япония) (а) и виды преодолеваемых препятствий (б)

1 – шина высокого давления; 2 – шина низкого давления; 3 – звено; 4 – передаточная шестерня; 5 – винтовой механизм; 6 – зубчатое колесо

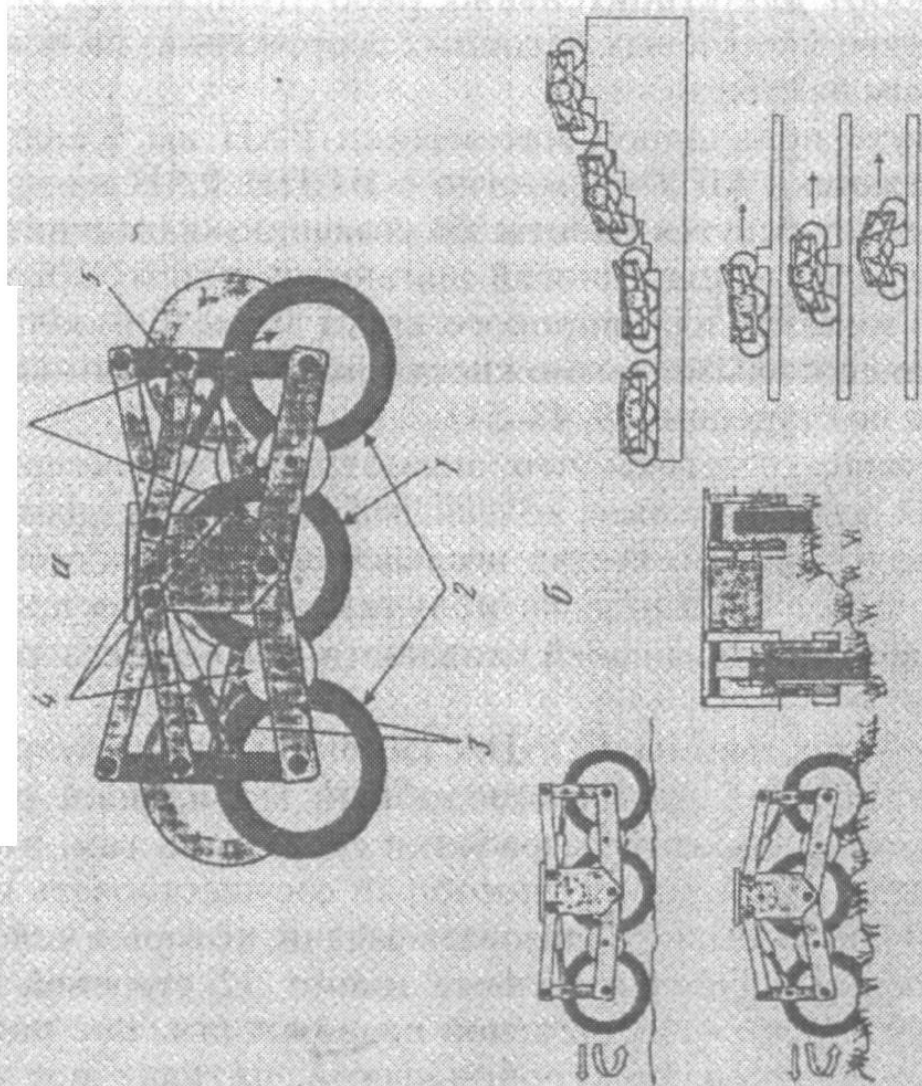


Рис. 1.3.2. Мобильная транспортная платформа НУВТОР и зоны досягаемости ног

вершать движения по сложным поверхностям [191]. Он имеет четыре шины с низким давлением и прорезями на поверхности и две шины с высоким давлением, создающие большую силу сцепления с гранями препятствий. Его габаритные размеры 808 • 580 • 419 мм, вес - 50 кг, полезная нагрузка - 50 кг, максимальная скорость - 4,36 км/час. Конструктивные особенности робота позволяют ему преодолевать препятствия в виде уступов и неровностей, подниматься по лестницам (рис. 1.3,1,б). Предполагается, что робот послужит основой для создания инвалидного самодвижущего кресла, транспортного средства для перевозки грузов, мобильной платформы для работы в агрессивных средах.

Automation Technology Laboratory (Финляндия) в кооперации с ВНИИТРАНС-МАШ разработала универсальный мобильный сервисный робот HYBTOR для множества технологических задач (рис. 1.3.2) [207]. Использование четырех ног с колесами на их концах позволяет ему двигаться по неструктурированным поверхностям с использованием трех режимов движения - колесного, шагающего, комбинированного (гибридного). При собственном весе робота 160 кг, полезная нагрузка составляет 60 кг.

Шагающие роботы. Специалисты Tokyo Institute of Technology (Япония) предлагают использовать четырехногий шагающий робот для строительных работ (например, строительство противооползневых бетонных сооружений) на поверхностях с крутым наклоном.

В Институте прикладной математики РАН им. Келдыша, Институте механики МГУ совместно с ИППИ РАН на протяжении многих лет ведутся работы по созданию шагающих машин. Ими разработан шестиногий шагающий робот, который может использоваться для широкого круга задач. Он обладает большими маневренными возможностями, в частности может перемещаться по ступеням [29,48-51].

В целом надо отметить, что несмотря на определенные преимущества по сравнению с колесными или гусеничными аппаратами и большое количество исследований в этой области, шагающие роботы пока еще не получили

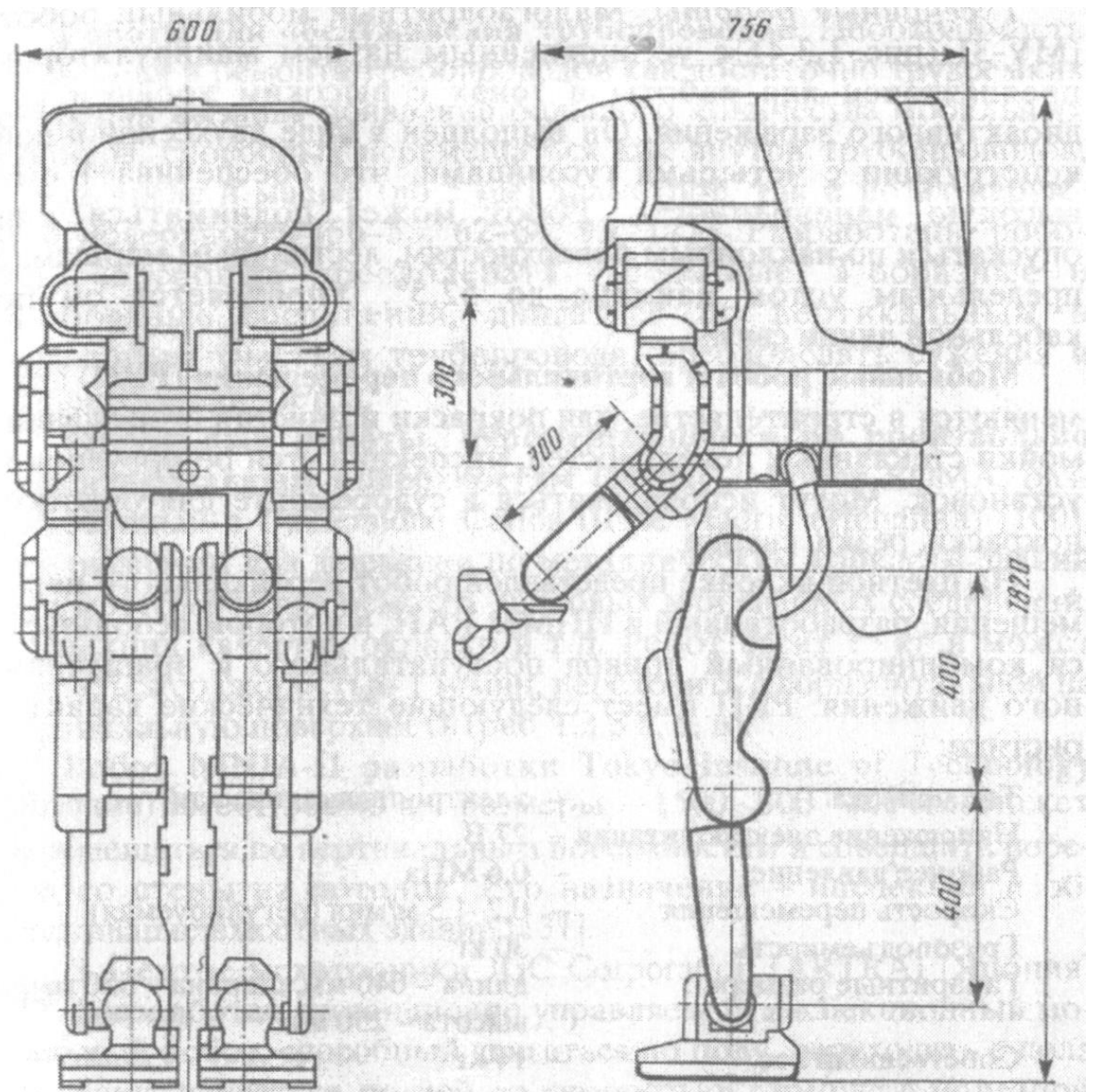


Рис. 1.3.3. Антропоморфный робот фирмы "HONDA"

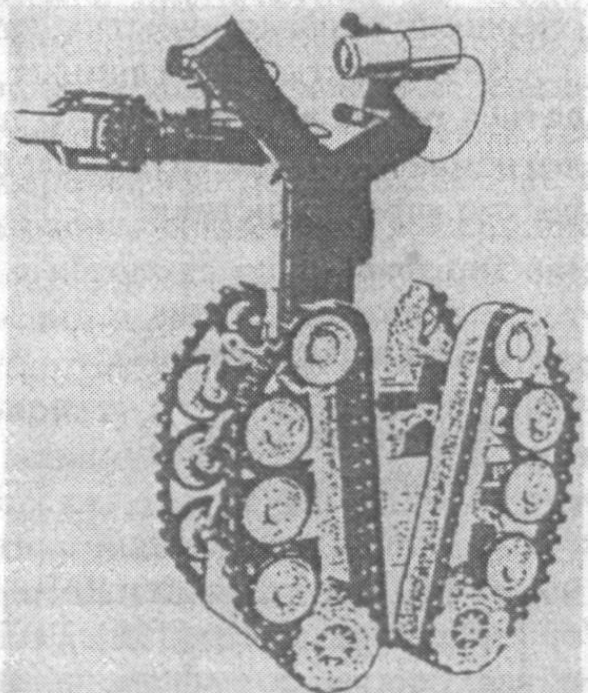


Рис. 1.3.4. Двухсекционный гусеничный робот MV-3

широкого практического применения из-за своей сложности как объекта управления.

Специалистами фирмы HONDA (Япония) сконструирован двуногий автономный человекоподобный мобильный робот (рис. 1.3.3) [125]. Цель этой разработки состояла в том, чтобы создать универсальный робот, способный сосуществовать и сотрудничать с человеком, и реализовать задачи, которые человек не может выполнить. Обе ноги робота имеют 12 степеней подвижности, а обе руки - 14 степеней подвижности. Вес робота 210 кг. Робот оснащен электроприводами, питание которых осуществляется от аккумуляторных батарей.

Гусеничные роботы. Малогабаритный мобильный робот (MV-3) (рис. 1.3.4) с установленным на нем манипулятором предназначен для работы в зонах с высоким уровнем радиоактивного заражения. Он выполнен в виде двухсекционной конструкции с четырьмя гусеницами, что обеспечивает ему высокую маневренность. Робот может подниматься или опускаться по наклонным поверхностям, лестничным маршам, с предельным углом наклона до $52,5^\circ$. Управляется он по кабельной линии связи.

Мобильные роботы вертикального перемещения (РВП) применяются в строительстве, для покраски и очистки стен зданий, мойки стеклянных поверхностей, инспекции стен резервуаров и установок. Могут использоваться в судоремонте для очистки, покраски, резки, сварки.

На цветной вклейке представлен робот вертикального перемещения, разработанный в ИПМех РАН, в котором используется комбинированный привод поступательного и вращательного движения. РВП имеет следующие технические характеристики:

- Тип привода - электропневматический
- Напряжение электропитания - 27 В
- Рабочее давление - 0,6 МПа
- Скорость перемещения - 0,2-1,5 м/мин (регулируемая)
- Грузоподъемность - 30 кг
- Габаритные размеры длина - 640 мм, ширина - 550 мм,
- высота - 250 мм
- Собственный вес - 14 кг

Робот предназначен для широкого круга технологических операций: окраски, очистки, газовой резки, сварки и т.п.

Для очистки стеклянных поверхностей может использоваться робот вертикального перемещения со "скользящим" уплотнением (см. цветную вклейку). Он имеет следующие технические характеристики:

- Тип привода - электромеханический
- Напряжение питания - 50 В (пост.)
- Скорость перемещения - 30 м/мин
- Грузоподъемность - 3 кг
- Габаритные размеры: диаметр 420 мм, высота -- 260 мм
- Собственный вес - 4,5 кг

Такое же назначение - очистка стен высотных зданий - имеет РВП, созданный в Robot Research Institute of Harbin, Institute of Technology (КНР) [198]. РВП может двигаться по стеклянным поверхностям, по кафельной плитке.

Роботы для обслуживания трубопроводов. Необходимость инспекции и ремонта трубопроводов как достаточно трудоемких операций вызвала появление большого количества мобильных роботов, способных перемещаться как внутри трубопроводов, в том числе и малых (до 5 мм) диаметров, так и ко их наружной поверхности [56-58, 62-64, 93, 172]. Разработаны роботы, способные преодолевать Г-образные, Т-образные и Х-образные соединения, двигаться по вертикальным и наклонным участкам трубопровода, преодолевать сужения и расширения диаметра.

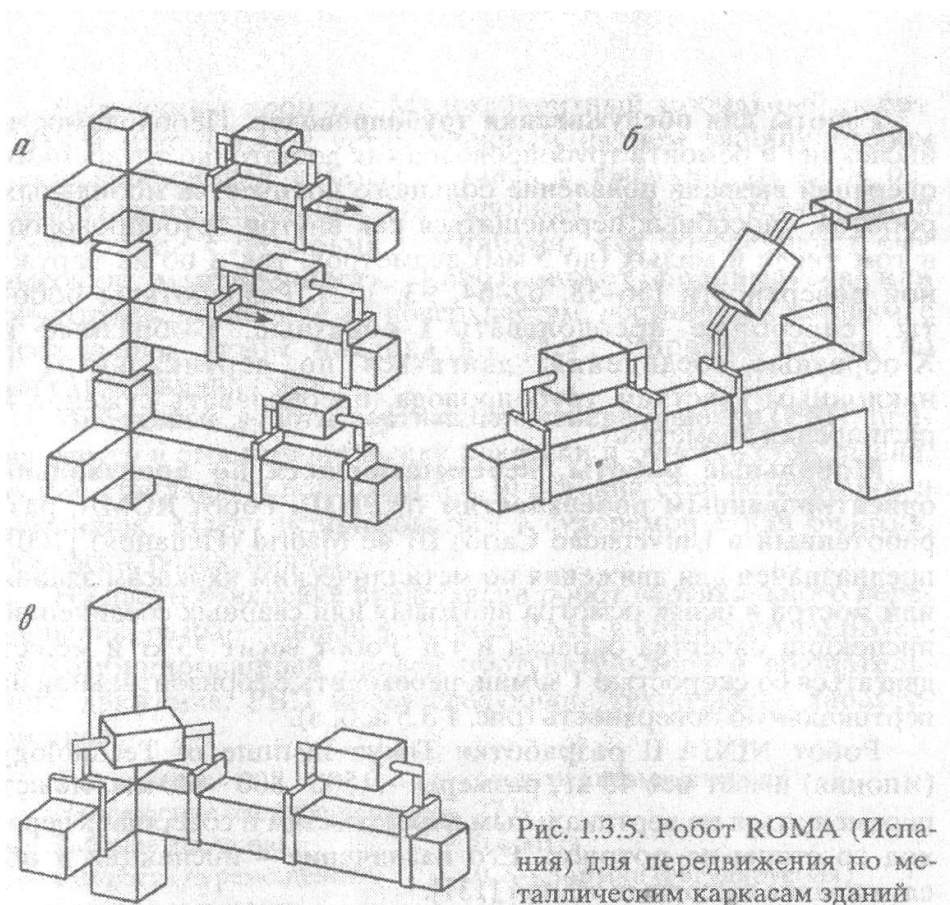
Мобильные роботы, перемещающиеся по произвольно ориентированным поверхностям (МРПП). Робот ROMA, разработанный в Universidad Carlos III de Madrid (Испания) [100], предназначен для движения по металлическим каркасам зданий или мостов в целях осмотра винтовых или сварных соединений, инспекции качества окраски и т.п. Робот весит 75 кг и может двигаться со скоростью 1 м/мин, переходить с горизонтальной на вертикальную поверхность (рис. 1.3.5 а, б, в).

Робот NINJA-II разработки Tokyo Institute of Technology (Япония) имеет вес 45 кг, размеры - 1500 • 800 • 400 мм, может перемещаться по вертикальным поверхностям и совершать переход со стены на потолок. Его назначение - инспекция и обслуживание высотных зданий [131].

В Центре мехатроники JGC Corporation (ARTRA) (Япония) [177] разработан дистанционно управляемый инспекционный мобильный робот, способный двигаться по полу, переходить с пола на стену, двигаться по ней со скоростью 2 км/час с полезной нагрузкой до 40 кг и преодолевать препятствие на стене. Транспортный

механизм состоит из пары захватных устройств в виде дисков, внутри которых создается вакуум, корпуса, имеющего две пары шарниров, с помощью которых осуществляется поворот дисков, складывание корпуса и приводных колес с большой тягой. Вертикальное и горизонтальное перемещение робота осуществляется с помощью ведущих колес, а удержание на вертикальной поверхности - с помощью вакуумных захватных устройств со "скользящим" уплотнением. Это транспортное средство может двигаться по лабиринту и преодолевать препятствия на стене. Робот оснащен манипулятором с 5 степенями подвижности грузоподъемностью 2 кг. Вес робота - 130 кг, размеры - 1700 • 700 • 920 мм. Робот предназначен для инспекций и ремонта резервуаров в атомной промышленности.

В России в НПО "Химтехника" в рамках проекта "Химробот" разрабатывалась робототехническая система, содержащая три модуля перемещения и два модуля ориентации, позволяющие ей перемещаться по сложным переходам поверхностей, находящихся под различными углами друг к другу, и нести необходимые устройства к датчики [13].



Фирмой CEIT (Centro de Estudios e Investigaciones Technicas de Guipuzcoa) и University of Navarra, San Sebastian (Испания) для выполнения различных операций,

таких, как инспекция, обслуживание и т.п. на объектах атомной энергетики разработан робот с пневматическими приводами (ROB1CEN Ш [84]. Робот имеет двух-платформенную схему и способен перемещаться по полу и взбираться на стену. Вес робота - 24 кг, размеры - 900 ■ 200 ■ 350 мм, полезная нагрузка - 30 кг (Для движения по полу), 10 кг (для движения по стене), максимальная скорость - 1,3 м/мин.

В университете Wichita (США) разработан робот ROSTAM-FV (Robotics System for Total Aircraft Maintenance) [83] для инспекции и обслуживания авиационной техники. Робот имеет две ноги с присосками диаметром 11,35 см, 4 степени подвижности. Имеется 4 двигателя постоянного тока: 3 двигателя вращательного и 1 двигатель поступательного движения. Робот может двигаться и переходить с горизонтальной плоскости на вертикальную, со стены на потолок. Вес робота - 4 кг, нагрузочная способность - 8 кг.

Для перемещения по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям в ИПМ РАН сконструировано робототехническое устройство, которое реализуется в виде четырехзвенной структуры, каждый элемент которой обладает двумя степенями подвижности (см. цветную вклейку).

Робот имеет следующие технические характеристики:

- Тип привода - электропневматический
- Напряжение питания - 27 В
- Рабочее давление - 0,6 МПа
- Грузоподъемность - 1,5 кг
- Скорость перемещения - 3 м/мин
- Габаритные размеры: длина - 1000 мм, ширина (диаметр 3У) - 240 мм
- Собственный вес - 10,5 кг.

Модель колесного робота для перемещения по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям представлена на цветной вклейке. В качестве полезной нагрузки используется манипулятор с тремя степенями подвижности, устанавливаемый на одной из платформ.

Его основные технические характеристики:

- Тип привода - электромеханический
- Напряжение питания - 220 В
- Габаритные размеры: длина - 800 мм, ширина - 400 мм,
- высота (в транспортном положении) - 270 мм
- Собственная масса - 22,5 кг

- Грузоподъемность- 5 кг
- Скорость перемещения - до 0,4 м/сек.

4. Мобильные роботы для экстремальных ситуаций

Основное назначение таких роботов – ликвидация последствий техногенных аварий и катастроф, проведение антитеррористических и противопожарных операций, "гуманитарное" разминирование.

Робототехнический комплекс (РТК) для дезактивации помещений (рис. 1.3.6) представляет собой систему из мобильного робота горизонтального перемещения и установленного на нем робота вертикального перемещения с пневмоприводами [21]. Присоединение РВП к вертикальной поверхности осуществляется в автоматическом режиме.

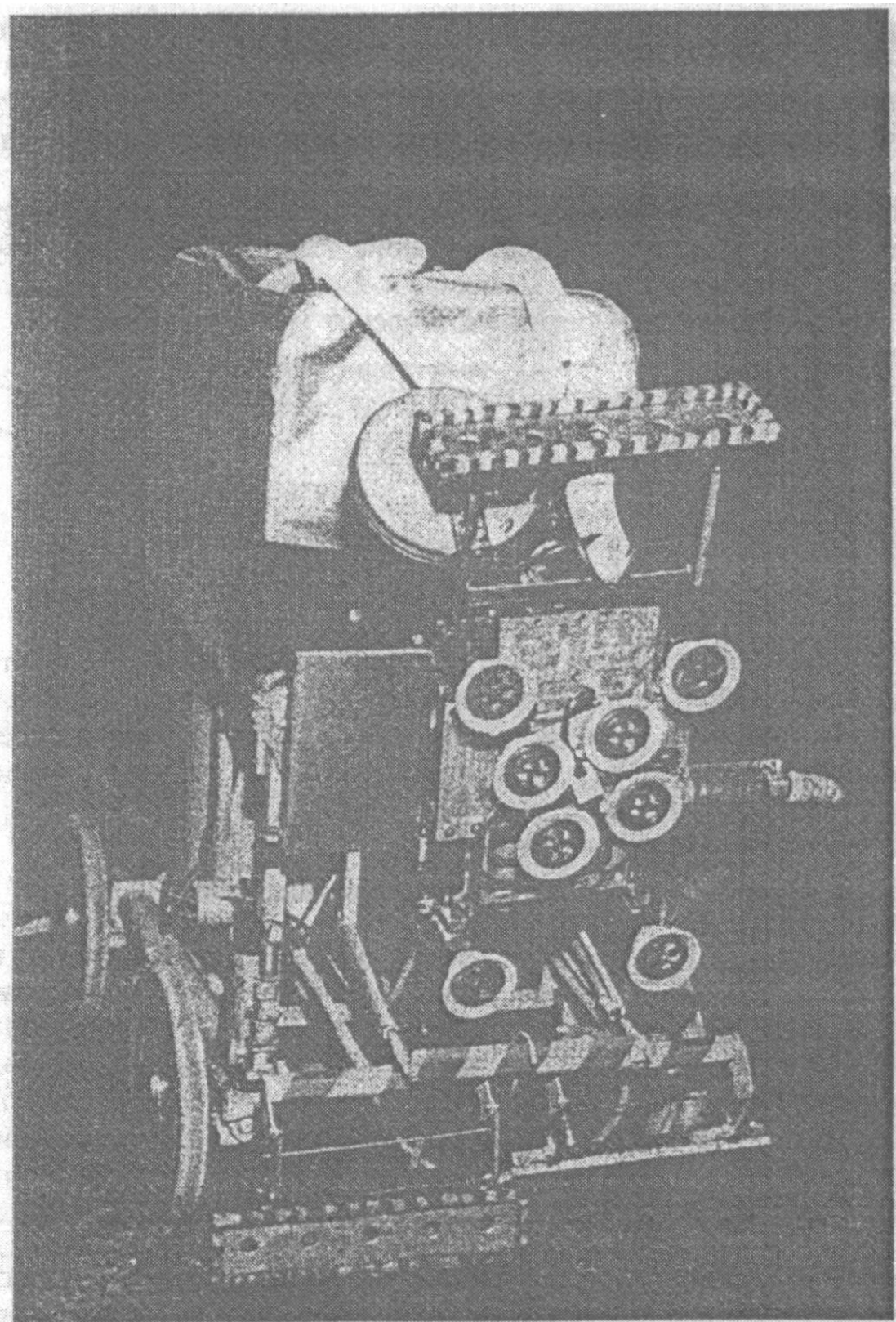


Рис. 1.3.6. Робототехнический комплекс для дезактивации помещений (Россия)

По аналогичной схеме выполнен РТК на базе РВП ROVICEN III (Испания) [182], в котором робот вертикального перемещения устанавливается на дистанционно управляемом гусеничном транспортном средстве.

Японские фирмы "Хитачи" и "Ниппон Газ Ко" разработали шагающий робот с двумя манипуляторами для проведения аварийных работ на объектах атомной энергетики.

Опытно-конструкторское бюро специальной робототехники МГТУ им. Н.Э. Баумана разработало ряд образцов мобильных робототехнических комплексов (МРК) для действия в экстремальных условиях [2]. Ликвидация радиационной аварии в Сарове (июнь 1997 г.) явилась примером успешного применения МРК-25 в условиях высокого интенсивного излучения.

В настоящее время в ряде стран мира ведутся работы по созданию робототехнических устройств для "гуманитарного" разминирования [130, 143]. Согласно данным ООН, на территории 65 стран мира установлено около 110 млн. незарегистрированных наземных мин. Вследствие минирования из хозяйственного оборота выведены обширные участки земли и ограничены природные ресурсы. На брошенных минных полях ежегодно гибнет до 10 тыс. человек и вдвое большее число людей получает тяжелые увечья. Особенно много жертв среди гражданского населения.

Industrial Automation Institute (Испания) разработал четырехногий шагающий робот RIMHO-2 [81], оснащенный металлическим детектором и дифференциальной глобальной позиционной системой для записи местонахождения обнаруженных мин.

Роботы повышенной проходимости находят применение в борьбе с пожарами. Токийский противопожарный департамент использует целый ряд мобильных роботов: наземный автономный; вертикального перемещения для тушения пожаров в многоэтажных зданиях; для борьбы с пожарами в туннелях и под землей.

Для ликвидации пожаров в наземных резервуарах с нефтепродуктами применяется тактический прием - вырезание "окна" в его стенке выше уровня горючего. Так как такая операция представляет серьезную опасность для людей, Институтом проблем механики РАН совместно с Научно-исследовательским институтом противопожарной обороны (ВНИИПО) разработан мобильный робот [26], способный перемещаться по вертикальной поверхности резервуаров и выполнять необходимые технологические операции по вырезке отверстий с помощью двух газовых резаков, установленных на бортовых манипуляторах (см. цветную вклейку).

Большое количество робототехнических устройств используется для работы с взрывоопасными предметами.

Мобильный робототехнический комплекс "Андрос марк 5" американской фирмы "Ремотек" предназначен для обезвреживания взрывных устройств и выполнения опасных задач. Он представляет из себя шестигусеничный дистанционно управляемый вездеход с установленным на нем манипулятором. За счет опускающихся и поднимающихся передних и задних дополнительных гусеничных движителей он может подниматься или опускаться по лестничным маршам, наклонным поверхностям,, преодолевать уступы высотой до 50 см.

Одним из перспективных направлений применения МРПП является выполнение диагностических и ремонтных работ облицовки бассейнов выдержки отработанного ядерного топлива на АЭС, средняя высота которых составляет 3 м и ширина 6 м. Для выполнения этих работ можно применить МРПП с двумя бортовыми манипуляторами или находящиеся под единым групповым управлением два или три робота. При выполнении простых ремонтных работ одним МРПП назначением одного бортового манипулятора является выполнение технической диагностики поверхности бассейна, назначением второго манипулятора служит производство технологических работ, например сварки дефектных мест.

Радиационная стойкость определяется применяемыми материалами при конструировании механической транспортной, измерительно-информационной, технологической и управляющей систем.

Более сложные технологические ремонтные операции могут производиться группой роботов, причем каждый робот ответствен за выполнение одной операции. Последовательность выполнения профилактических, диагностических или ремонтных операций определяется и планируется заранее и заносится в оперативную память системы управления. Например, последовательность выполнения ремонтных работ бассейнов выдержки может быть следующая:

- техническая диагностика, нахождение, идентификация и фиксация дефектных мест, занесение в память системы управления плана работ;
- очистка, фрезерование или шлифовка дефектной поверхности под сварку;
- выполнение сварочных работ;
- выполнение методом неразрушающего контроля качества произведенных технологических операций;
- при необходимости проведение отделочных операций.

Для обеспечения движения роботов по поверхностям из различных материалов (например, металла, плитки, штукатурки и др.) и шероховатости может быть

предложен адаптивный захват, компенсирующий протечки воздуха и автоматически регулирующий степень разряжения 122].

Лекция

Тема 3.3.2. Системы мобильных роботов повышенной проходимости

ВОПРОСЫ

1. Особенности систем управления мобильными роботами повышенной проходимости.
2. Транспортно-механические характеристики мобильных роботов повышенной проходимости.
3. Измерительно-информационные системы роботов, действующих в сложных условиях окружающей среды.
4. Технологическое оборудование и манипуляторы мобильных роботов повышенной проходимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Градецкий В.Г. и др. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука. 2001, 360 с. (26-96).

1. Особенности систем управления мобильными роботами повышенной проходимости

Проводя анализ развития систем управления мобильных роботов, перемещающихся по произвольно ориентированным поверхностям, можно выявить следующие характерные особенности.

Поскольку МРПП по большей части предназначены для работы в тяжелых и экстремальных условиях, то главное внимание уделялось системам дистанционного управления.

Для работы в экстремальных условиях, например с радиоактивными материалами, выполнялись дополнительная защита элементов конструкции робота от вредных воздействий, а также оснащение его определенными сенсорными устройствами, информация от которых использовалась системой управления для коррекции исполнительных воздействий в случае возникновения помех и непредвиденных ситуаций.

В середине 50-х годов появляются первые роботы, которые оснащались компьютером. Это позволяло вести работу в автоматическом режиме в реальном масштабе времени, а также "обучать" робота выполнять определенные операции в экстремальных условиях путем программирования и использования предварительного моделирования.

С 60-х годов начинается широкое применение сенсорных устройств для "осязания" роботов, что позволило им адаптироваться к не полностью определенной внешней среде.

С 70-х годов большое внимание уделяется использованию датчиков анализа внешней обстановки и методам управления с учетом ее изменений. Развитие этих направлений привело к созданию специализированных роботов для функционирования в экстремальных ситуациях. При этом существенно изменяется конструкция роботов: создаются специализированные функциональные мобильные аппараты, содержащие не только средства передвижения и манипулятор с рабочим органом, но и системы управления, передачи информации, ее обработки и оценки ситуаций.

В настоящее время широко ведутся разработки телеуправляемых дистанционных МРПП для выполнения исследований окружающей обстановки, доставки различного оборудования, охраны и выполнения необходимых операций в противопожарных и научных целях, а также для действия в экстремальных условиях и при предотвращении террористических ситуаций.

Системы управления этих роботов обладают элементами искусственного интеллекта, связаны с различными сенсорными устройствами, используют быстродействующие микропроцессоры. Связь с роботами осуществляется как по радиоканалам, так и с помощью других сигналов, например голосовых или видео. В системах управления используется предварительное обучение. Они могут действовать как в дневное, так и в ночное время, в условиях химического или других видов поражений в реальном масштабе времени.

Управление цифровых образовательных технологий

Основные исследования, направленные на создание современных систем управления МРПП, включают:

- применение машинного интеллекта (способность к логичным рассуждениям и самообучению в случае непредвиденных ситуаций);
- эффективность и быстрота вычислений и принятия решений - разработка нейросетевых компьютеров, алгоритмов, мультипроцессорных систем, СБИС (сверхбольшие интеграционные схемы);
- учет особенностей механики и динамики движений гибко формируемых манипуляционных операций и перемещений роботов;
- широкое использование и обработка информации от датчиков и сенсоров при анализе окружающей обстановки и разрешении ситуаций;
- развитие дистанционных систем для выполнения автоматических операций с максимальной эффективностью и устойчивостью к постепенному ухудшению характеристик аппаратуры;
- человеко-машинное взаимодействие;
- интеграция системы в целом и уменьшение размеров аппаратуры;
- развитие вычислительных систем (по планированию, логике, решению задач, нейросетям, обработке сенсорной информации, распределенному управлению);
- применение новых механических и управляемых структур.

При разработке системы управления наибольшие трудности связаны с *выбором критериев оптимальности*. Желательно получить такие управляющие воздействия, которые максимально учитывали бы возможности конструкции робота для выбора наиболее рационального решения при перемещении в рабочем пространстве.

В данном случае большие возможности для планирования и оптимизации управляющих воздействий имеют системы графического моделирования. С помощью развитых баз данных можно проверить и наглядно представить на экране дисплея расположение робота, другого оборудования, различных объектов и их изменения при различных ситуациях для расчета и выбора оптимальной траектории. При этом система моделирования может содержать блоки представления конструкции робота и окружающего пространства, описания заданий, преобразования координат, проверки ограничений, графического представления, а также алгоритмическое и программное обеспечение для расчета и оптимизации управляющих параметров.

Математическое моделирование кинематики. Исследование нелинейных характеристик кинематики важно как на стадии планирования движений робота, так и для стадии выполнения запрограммированных действий. Здесь могут быть использованы методы решения прямой кинематической задачи, а также численные процедуры решения обратной кинематической задачи.

Описание и представление рабочего пространства. Анализ возможных положений и ориентаций мобильного робота помогает не только оценить его функциональные характеристики, но и позволяет оценить управляющие воздействия с учетом ограничительных критериев механической части и окружающего рабочего пространства.

Анализ динамики. Вопросы создания и выбора динамических моделей дают возможность разработчикам систем управления представить поведение системы в различных режимах. При этом можно выделить три типа управления.

Неадаптивное управление. Обычно применяется для отслеживания заданных движений, когда условия работы остаются постоянными. Имеются различные алгоритмы неадаптивного управления. Обычно это - упреждающее программное управление в сочетании с локальными ПИД-регуляторами, которые устраняют в контуре обратной связи отклонения от номинальной траектории. В целях уменьшения взаимовлияния степеней подвижности выполняется разделение динамической модели всего робота на модели механической части и привода.

Основной недостаток неадаптивного управления - требование точного знания и использование сложной динамики системы.

Адаптивное управление. К этому типу управления целесообразно переходить в экстремальных ситуациях. С этой целью применяются самонастраивающиеся регуляторы:

- на основе моделей с переменными во времени параметрами, в которых моменты инерции и силы взаимовлияния оцениваются и компенсируются в реальном масштабе времени;
- на основе моделей с постоянными, но заранее неизвестными параметрами, которые оцениваются с использованием априорных знаний о динамике системы и обеспечивают устойчивое управление.

Робастное управление. Чрезвычайно важно, чтобы системы управления обладали робастностью - нечувствительностью к небольшим возмущениям и неточностям моделей, что наиболее важно при наличии изменяющихся ситуаций и из-за неидеальности конструкции мобильного робота, неполного знания приводов, массы

нагрузки, коэффициентов трения, параметров рабочего пространства, а также вычислительных погрешностей. Для достижения робастности обычно вводят в процедуры управления данные о допустимых пределах подобных ошибок.

Языки программирования. Обычно для облегчения аналитического программирования управляющих воздействий роботов используются специализированные языки на базе языков высокого уровня (например, BASIC, C++). С языками программирования полезно сочетание пакетов графического моделирования трехмерных объектов и траекторий движения.

Системы измерения характеристик робота в реальном масштабе времени. Эти системы создаются для оценки основных параметров роботов, а также определения ошибок отслеживания траектории, погрешностей по скорости и ускорению и для оценки рабочего пространства с целью управления при движении.

Синтез систем оучувствления. Оучувствление в сочетании с высоким уровнем технического интеллекта обеспечивает более активное и точное управление при взаимодействии мобильного робота с экстремальной средой. Оучувствленный робот обладает адаптацией к изменяющимся условиям, кроме того, в этом случае снижаются требования к точности управления по сравнению с режимами перемещения по жестко заданной программе.

Система управления МРПП должна взаимодействовать со следующими основными блоками:

- транспортным модулем;
- манипулятором или другими исполнительными органами;
- блоком оучувствления (датчики анализа рабочей среды и контроля параметров робота);
- блоком программного обеспечения (алгоритмы, программы);
- интерфейсами связи;
- базой данных;
- вычислительной системой.

Развитая система управления МРПП имеет иерархическую структуру и позволяет управлять роботом в неорганизованных и сложных условиях (на вертикальных «поверхностях, в агрессивных средах, космосе, под водой и т.д.).

В целях обеспечения автономии система управления транспортного модуля должна иметь на борту источник питания.

Для того чтобы перемещаться в произвольном направлении, робот должен иметь систему навигации и соответствующие датчики.

Управление цифровых образовательных технологий

Система управления обеспечивает функции передвижения транспортного модуля и рабочие режимы остальных рабочих блоков: манипулятора, датчиков, бортового компьютера и т.д.

Система управления, снабженная джойстиком или подобным устройством (например, перчаткой управления), позволяет формировать движения робота в супервизорном режиме.

Система управления с применением экспертных систем для анализа поступающей сенсорной информации позволяет формировать и принимать решения в условиях неопределенности.

Развитая система управления МРПП должна интерпретировать, планировать и выполнять полученное задание без вмешательства извне, используя бортовую вычислительную систему. При этом робот должен управляться таким образом в известной или неизвестной среде, чтобы избежать столкновений со стационарными препятствиями или подвижными объектами. Для этого система управления должна взаимодействовать с "моделью мира", которая может быть использована при последующих перемещениях в этой же зоне. Использование только априорной модели мира или специальных навигационных маркеров не обеспечивает гибкости управления в незнакомой среде. Таким образом, для автономной навигации и управления требуется взаимодействие системы управления с системами восприятия окружающей среды, обработки сенсорной информации в реальном времени и определения собственного положения.

Рассмотрим типовые функции развитой системы управления мобильного робота, предназначенного для выполнения работы внутри помещений больших зданий на примере робота МОВОР-ГП, разработанного в США в Оак-Риджской национальной лаборатории. Мобильный робот может выполнять очистку полов, открывать двери, переходить с этажа на этаж, преодолевать определенные препятствия.

Система управления робота снабжена аккумуляторами со средствами подзарядки и аварийного питания, которые обеспечивают функционирование робота.

Локомоционная подсистема управления включает три вычислительных модуля: первый управляет приводом ведущего колеса, второй - приводом руля, а третий выдает им текущие задания, обеспечивая отслеживание нужной траектории.

В приводах двигателей используются экономичные усилители с широтно-импульсной модуляцией. Управление изменением положения или скорости произво-

дится с постоянным ускорением, рассчитываемым соответствующим вычислительным модулем, который, кроме того, контролирует температурный режим и ток двигателей и усилителей.

Робот MOBOT-III оснащен многоуровневой системой, используемой для навигации и обнаружения препятствий, состоящей из четырех лазерных дальнометров и ультразвуковых сканеров. Каждый сенсор имеет свой микропроцессор, обрабатывающий данные измерений.

Задачи, вычислительной части сенсорного модуля состоят в построении геометрического описания сцены и формировании признаков, определяющих ориентацию и положение фрагмента сцены.

Грубое обнаружение препятствий производится комбинированными модулями с УЗ и ИК сенсорами, управляемыми от отдельного микропроцессора, который также осуществляет предварительную обработку данных и связь с процессором верхнего уровня.

Робот оснащен также тактильным бампером, по сигналам которого в результате столкновения с препятствием осуществляется немедленная остановка. Имеются датчик наклона корпуса и ряд датчиков определения состояния внешней среды (гигрометр, шумометр, датчик освещенности и др.) и внутреннего состояния самого робота (энергопотребления, температуры различных узлов и т.п.).

Подсистема связи с человеком-оператором содержит пульт пользователя, обеспечивающий удобный режим общения с применением средств машинной графики: меню, окон, программных ключей и т.п., а также устройство ввода-вывода речевой информации.

Управляющая подсистема робота использует два способа организации информационных потоков - вертикальный и горизонтальный. Команды передаются по вертикальной иерархической структуре (дереву управления), высшим уровнем которой является уровень задания в целом, а ниже последовательно идут уровни планирования и контроля исполнения задания, навигации, "лоцманский" (обхода локальных препятствий), отслеживания траектории, управления приводами ведущего колеса и руля, локомоционный (вместе с аппаратурой обеспечения безопасности). Обработка сенсорной информации осуществляется согласно горизонтальной схеме (Дереву данных), где вначале происходит предварительная обработка данных в каждом из параллельно работающих отдельных сенсорных модулей, а затем анализируется объединенная мультисенсорная информация в блоке компо-

новки и, наконец, строится геометрическая модель среды в блоке картографирования. В дальнейшем обработка ведется совместно с блоком топографической модели.

Для реализации описанных принципов системы управления применена двухуровневая распределенная вычислительная архитектура, в которой множество процессорных модулей обмениваются информацией по общей шине. Каждый такой функциональный модуль реализован в виде отдельной платы с двумя микропроцессорами и локальными запоминающими устройствами.

Поскольку модули обработки сенсорной информации работают по статическим циклам, в горизонтальной структуре организован синхронный поток данных, причем времена для каждого модуля определяются заранее на стадии проектирования системы. Поток команд организован асинхронно, и времена выполнения зависят от конкретного задания, текущих условий в среде и состояния системы.

На нижнем уровне распределенной вычислительной подсистемы находятся интерфейсы связи с аппаратурой робота и чело века-оператора.

В целом система работает в реальном масштабе времени. Кроме требования работы в реальном времени, к системе управления предъявляются требования бортового исполнения, высокой надежности, робастности, удобства обслуживания, модульности, возможности расширения.

Таким образом, в системе управления роботом МОВОТ-III интегрированы все основные функциональные подсистемы, обеспечивающие практическое выполнение рабочих режимов МРПП. Особенность системы в том, что при управлении сенсорная информация используется не только для обнаружения локальных препятствий, но и для построения геометрической модели рабочей среды. Сравнивая воспринимаемую сцену своего местопребывания с уже построенной моделью, можно эффективно управлять роботом в условиях изменения ситуаций и когда ориентация и относительные положения препятствий и робота известны приблизительно.

2. Транспортно-механические системы МРПП

Особенности транспортно-механических систем МРПП. Как отмечалось ранее, основным назначением МРПП является выполнение различных операций на произвольно ориентированных в пространстве поверхностях. При необходимости робот должен осуществлять переход с поверхности на поверхность в автоматическом режиме. Исходя из этого, транспортно-механическая система МРПП должна удовлетворять следующим основным требованиям:

Управление цифровых образовательных технологий

- обеспечивать надежность удержания на вертикальных, наклонных поверхностях и потолках и в том числе в момент перехода с одной поверхности на другую;
- обеспечить возможность перемещения по поверхностям из различных материалов, при этом качество поверхности может быть различно;
- обеспечить возможность перехода с поверхности на поверхность, расположенные по отношению друг к другу под углом не менее 270° ;
- останавливаться на расстоянии, необходимом для перехода с поверхности на поверхность, и ориентировать корпус и захватные устройства для осуществления перехода;
- обеспечить максимально возможное значение отношения "полезная нагрузка/собственный вес";
- обеспечить широкий диапазон изменения скорости движения;
- обеспечить высокую маневренность;
- обеспечить легкую управляемость, т.е. возможность управления при использовании простых устройств и алгоритмов управления.

Транспортно-механические системы современных мобильных робототехнических комплексов, способных перемещаться по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям, могут быть комбинированными, многомодульными, одномодульными (рис. 2.2.1).

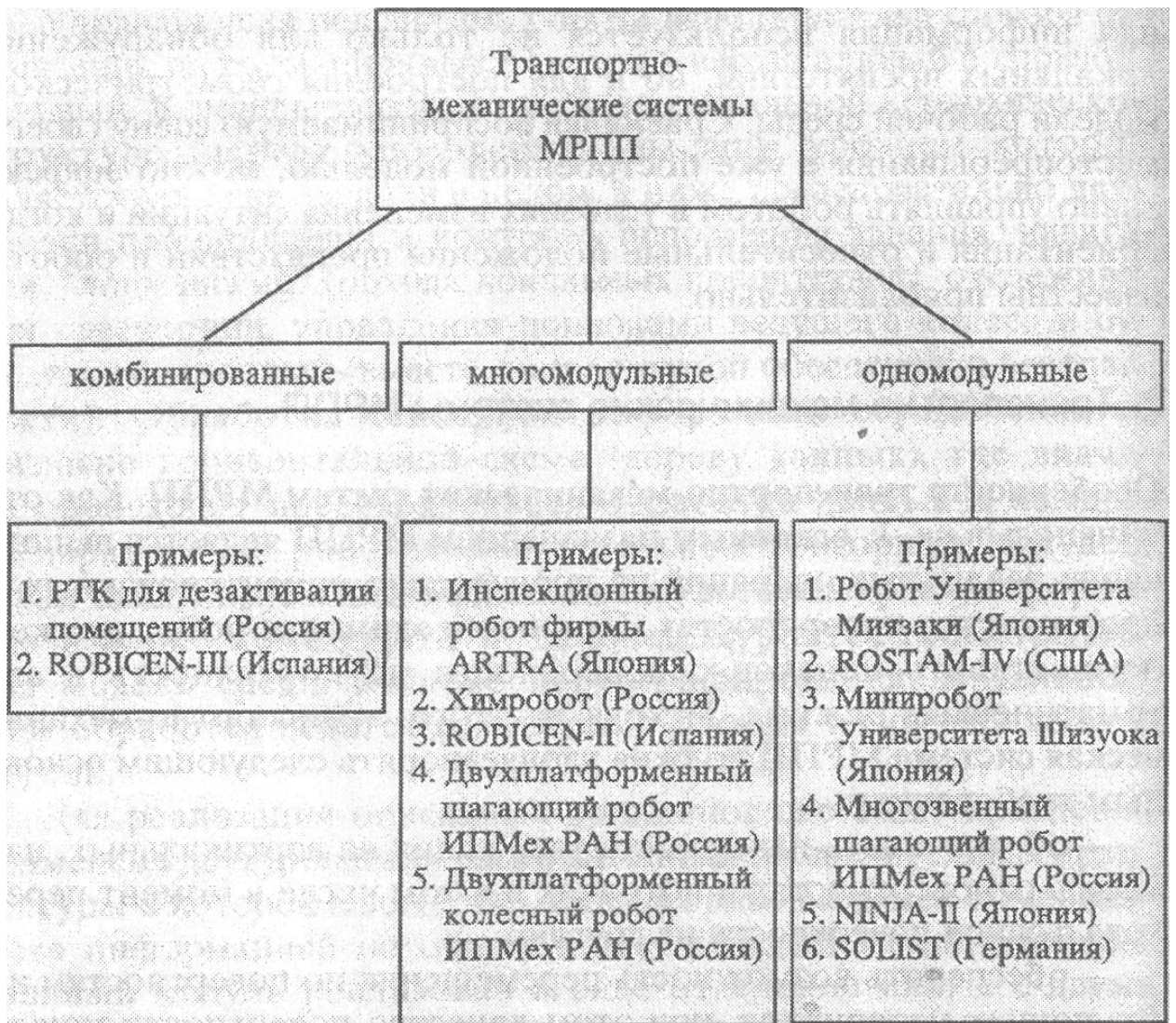


Рис. 2.2.1. Виды транспортно-механических систем МРПП

Комбинированные мобильные робототехнические комплексы представляют собой, как правило, два (или более) мобильных робота, один - для перемещения по горизонтальной поверхности, другой - по вертикальной. Особенностью таких систем является то, что каждый робот используется для движения только по одному типу поверхности (горизонтальной, вертикальной) и при этом он не перемещается по другой поверхности, т.е. происходит расстыковка системы. Другая особенность системы заключается в наличии устройства сопряжения модулей горизонтального перемещения с модулем вертикального перемещения. Это устройство обеспечивает установку робота на вертикальной поверхности и его съем после выполнения операций. Подобные системы обладают рядом преимуществ. Например, имеется возможность установить источники питания РВП и технологическое оборудование на роботе горизонтального перемещения и тем самым избавить транспортный модуль РВП от дополнительной нагрузки и повысить его маневренность.

Многомодульные - это такие мобильные роботы, которые состоят из двух и более транспортных модулей, соединенных между собой управляемыми шарнирами. При этом вся система перемещается по всем поверхностям.

Одномодульные - это двуногие или многоногие системы с большим числом степеней подвижности, что позволяет им перемещаться по сложно ориентированным в пространстве поверхностям.

Методы и средства удержания МРПП на вертикальных и наклонных поверхностях. Для движения по вертикальным и наклонным поверхностям, а также потолкам используются специальные захватные устройства (ЗУ): механические; вакуумные; магнитные; с использованием реологических жидкостей и др.

ЗУ должны отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать надежное сцепление с поверхностью;
- обладать достаточной нагрузочной способностью для получения максимальной грузоподъемности;
- адаптироваться к виду и качеству поверхности;
- легко управлять усилием прижима;
- для ряда моделей иметь возможность работать в экстремальных условиях (радиация, высокая температура).

Робот будет удерживаться на вертикальной поверхности, если выполняется соотношение

$$F \geq M \cdot \left(\cos \alpha + \frac{1}{\mu} \cdot \sin \alpha \right), \quad (2.2.1)$$

где F – общая удерживающая сила; M – вес робота; μ – коэффициент трения; α – угол наклона поверхности.

Механические ЗУ используются главным образом для передвижения по специальным поверхностям (трубы, лестницы и т.п.) [22, 93].

Магнитные ЗУ применяются редко из-за жестких требований к типу материала поверхности перемещения (ферромагнитные материалы) и ее качеству. Наличие шероховатостей, окраски, ржавчины делает невозможным удержание или снижает силу удержания робота на поверхности. Однако известны РВП, в которых используются магнитные ЗУ [127, 185, 187].

ЗУ с применением реологических жидкостей для удержания на вертикальных поверхностях практически не известны.

Реологические жидкости -это магнито- и электроактивированные реологические структуры веществ, меняющих свои механические свойства в зависимости от амплитуды, длительности и частоты внешнего воздействия электрической, тепловой, магнитной или иной природы.

Для робототехники эти жидкости интересны тем, что под воздействием внешних магнитных или электрических полей жидкости с адекватными присадками становятся твердыми телами. Наиболее перспективно применение реологических жидкостей для миниатюрных мобильных роботов .

В работах [164, 165] рассматривается конструкция РВП, у которого для удержания на вертикальной поверхности и перемещения по ней используются воздушные винты.

В настоящее время наибольшее распространение получили вакуумные ЗУ (ВЗУ) как наиболее универсальные, позволяющие удерживать МРПП на поверхностях из различных материалов с различной шероховатостью.

Средства создания вакуума. Для создания вакуума могут и пользоваться вакуумные насосы, эжекторные системы, вентиляторы.

Теоретически усилие отрыва вакуумного ЗУ вычисляется по формуле

$$F = S_{\text{зу}}(P_{\text{атм}} - P_{\text{зу}}) \quad (2.2.2)$$

где $S_{\text{зу}}$ – эффективная площадь захватного устройства; $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление; $P_{\text{зу}}$ – давление внутри полости вакуумного ЗУ.

Вакуумные насосы. Для создания вакуума используются механические и немеханические вакуумные насосы. К механическим относятся поршневые, жидкостно-кольцевые, плунжерные, пластинчато-роторные и двухроторные (низкого и среднего вакуума), турбомолекулярные (высокого вакуума).

Насосы низкого вакуума создают предельное остаточное давление порядка $10^2 \dots 10^4$ Па, насосы среднего вакуума - $100 \dots 0,1$ Па, высокого вакуума - $10^{-7} \dots 10^{-9}$ Па и менее [65].

Большинство вакуумных насосов и агрегатов имеют достаточно большие габариты и вес и поэтому их применение для МРПП и РВП возможно только в стационарных условиях (например, при проведении лабораторных исследований). Более перспективно применение вакуумных насосов небольших габаритов, которые могут устанавливаться непосредственно на борту , МРПП или РВП.

Основная проблема, которая возникает при использовании вакуумного насоса, - это как отключить ЗУ от вакуумной магистрали в случае попадания его,

например на трещину. Предлагаются различные технические решения, в частности в конструкции РВП, разработанного в Исследовательском центре Nirron Koei Corporation [198], имеются две опоры, на каждый из которых находится по шесть присосок. Каждая из присосок связана через клапан с камерой, соединенной с вакуумным насосом. Специальный бегунок, вращающийся со скоростью 1 об/сек, соединяет последовательно в каждый момент времени присоску с вакуумным насосом. При этом остаточное давление составляет величину не ниже 6×10^4 Па. Грузоподъемность робота равна 1,5 кг при собственном весе 8 кг.

Эжекторы. Преимуществом ЗУ с эжектором являются малые габариты и вес, возможность использования на каждом ЗУ, что, как уже говорилось, повышает надежность удержания робота на поверхности. Ряд фирм выпускает эжектора серийно.

Исследования, проведенные в ряде работ [22, 31, 39, 83], показали, что максимальное усилие отрыва ВЗУ возникает при давлении питания эжектора в диапазоне 0,4-0,5 МПа. Это связано с особенностями рабочих характеристик эжектора. Работу ВЗУ во время переходных процессов определяют динамические характеристики. Переходный процесс вакуумирования ВЗУ характеризуется временем выхода давления на заданную величину вакуума в полости захвата при непосредственной связи с ним эжектора. Уровень вакуума величиной 0,05 МПа при дросселе диаметром 0,2 мм для объемов от 10 до 30 см³ достигается за время порядка 8 с, а для диаметра 1,2 мм - за время порядка 2 с. При принятии решения об использовании ЗУ с эжектором необходимо учитывать расход воздуха, который ограничивается производительностью компрессора.

На рис. 2.2.2 (а, б, в) представлены характеристики зависимости расхода воздуха (а), величины вакуума (б), производительности всасывания (в) от рабочего давления для эжектора, применяемого в ВЗУ роботов вертикального перемещения.

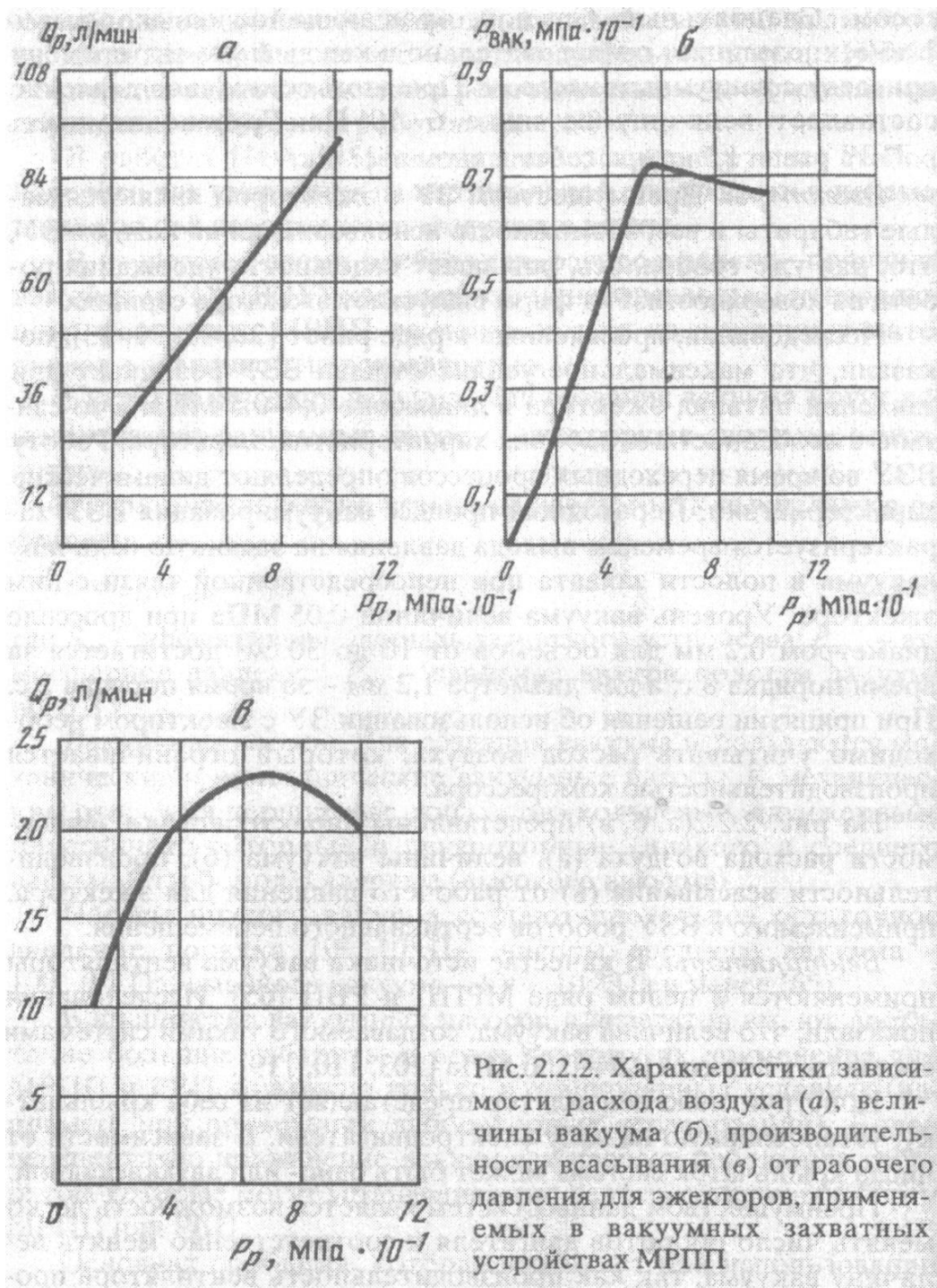
Вентиляторы. В качестве источника вакуума вентиляторы применяются в целом ряде МРПП и РВП [65]. Исследования показали, что величина вакуума, создаваемого такими системами составляет порядка 0,04-0,06 МПа [1.03, 110, 119].

Конструктивно вентилятор представляет из себя крыльчатку, установленную на валу электродвигателя. В зависимости от числа крыльчаток Система может быть одно- или двухкаскадной.

Преимуществом данных систем является возможность легко менять число оборотов двигателя и соответственно менять величину вакуума, так как производи-

тельность вентилятора пропорциональна скорости вращения. Другое преимущество заключается в возможности использования двигателя постоянного тока в вентиляторе, что создает предпосылки для создания автономного МРПП.

Способы и системы движения по произвольно ориентированным поверхностям. Для движения по произвольно ориенти-



рованным поверхностям используются следующие основные типы мобильных аппаратов: колесные, гусеничные, шагающие. Значительно реже используется комбинация этих типов. Шагающие типы мобильных аппаратов можно разделить на аппараты с продольно-шаговым способом движения, на двуногие или двухпорные

аппараты, реализующие походку типа "движение циркуля", и многоногие (например, типа "паук"). Из рассмотренных схем только схемы "паук" или "цикуль" могут быть трансформированы для перехода с поверхности на поверхность.

Гусеничный тип мобильного аппарата может быть двух видов: в первом случае ЗУ встраиваются непосредственно в гусеницу (рис. 2.2.3) [46], во втором случае захватные устройства фиксируются относительно гусеницы, а гусеничный механизм служит для организации поступательных движений (рис. 2.2.4) [180]. Гусеничный тип мобильного аппарата может использоваться для перехода с поверхности на поверхность [194], однако данный механизм имеет достаточно сложную схему и его реализация вызывает затруднения.

МРПП с колесным типом мобильного аппарата осуществляет поступательное и вращательное движение с помощью колес. При этом ЗУ (одно или несколько) удерживают робот на поверхности.

Для перехода с одной поверхности на другую необходимо, чтобы в этот момент МРПП удерживался на поверхности с помощью одной группы ЗУ, в то время как другая группа ЗУ перемещается и закрепляется на новой поверхности (табл. 2.2.1).

Двухмодульные шагающие МРПП. Для движения по пересекающимся или близко расположенным поверхностям (например, по маршруту пол-стена-потолок) может быть предложена схема мобильного двухмодульного робота со складывающимися платформами.

Наиболее простой вариант такого робота (рис. 2.2.5) состоит из основной транспортной платформы 1 и дополнительной платформы 2, которые связаны между собой с помощью узла поворота 3 [115].

Основная транспортная платформа 1 содержит пневматические цилиндры 4 поступательного движения, ВЗУ с пневматическими приводами подъема и опускания 6, узел поворота 5 с пневматическим механизмом подъема и опускания ВЗУ 7. Принцип перемещения основной транспортной платформы 1 заключается в следующем: при сцеплении ВЗУ платформы 7 с поверхностью свободные ВЗУ 6 перемещаются вперед на один шаг. После фиксации ВЗУ 6 и освобождении ВЗУ платформы 7 производится подтягивание платформы 1 на один шаг вперед с помощью пневмоцилиндров 4. Далее опускается платформа 7, ВЗУ фиксируются, затем поднимаются и цикл движений повторяется. Изменение направления движения осуществляется с помощью узла поворота 5.

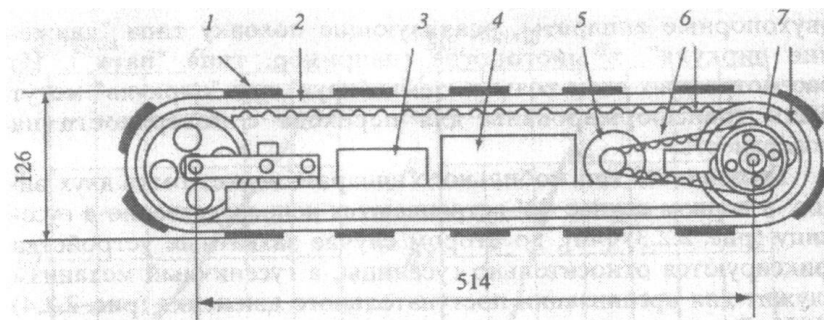


Рис. 2.2.3. Схема робота вертикального перемещения (Япония) с вакуумными захватными устройствами

1 – ВЗУ; 2 – гусеница с ВЗУ; 3 – фильтр; 4 – генератор вакуума;
5 – электродвигатель; 6 – зубчатый ремень; 7 – шкив

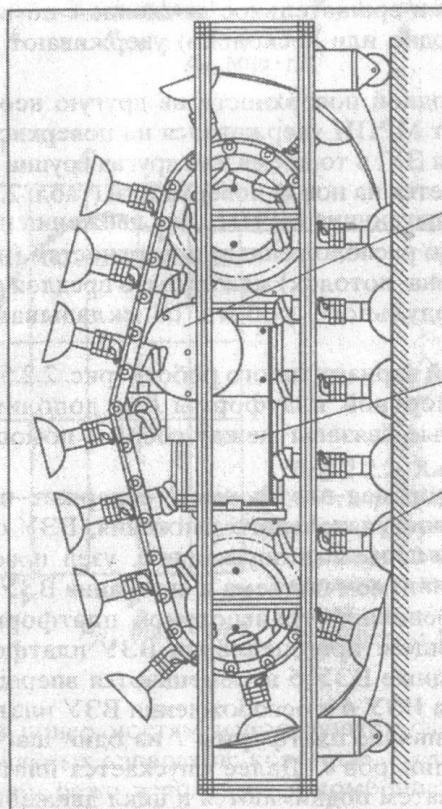
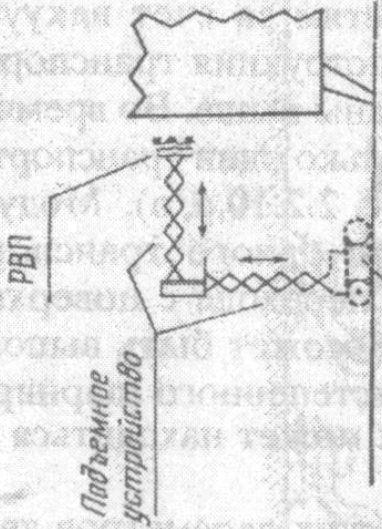
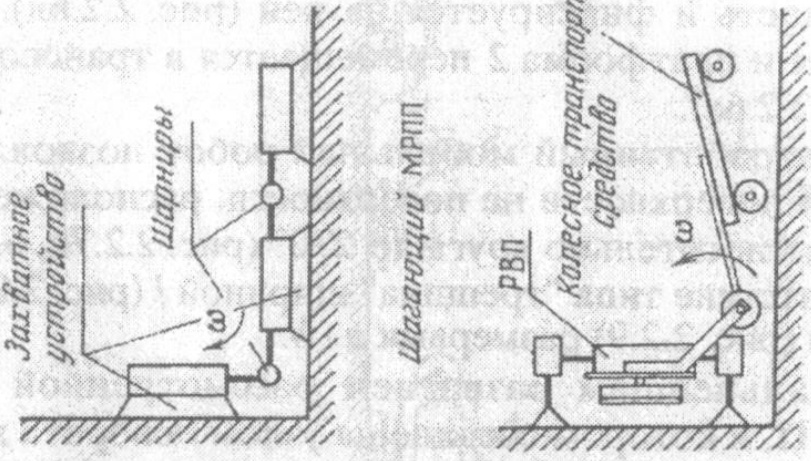
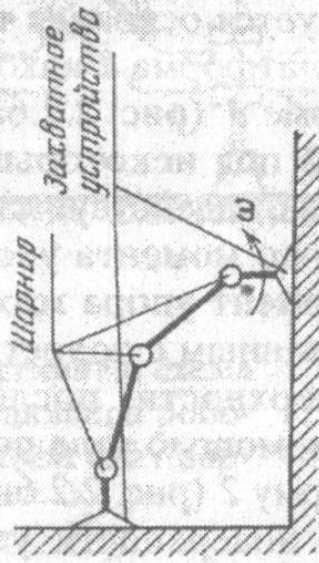
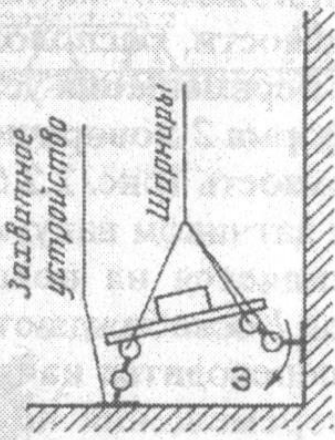


Рис. 2.2.4. Робот вертикального перемещения MAX-V (Германия)

Таблица 2.2.1

Методы перехода с одной поверхности на другую для трех групп МРПП

Комбинированные МРПП	Мультимодульные МРПП	Мономодульные МРПП
МРПП ROVISEN-III (Испания)  Подъемное устройство рвп Гусеничное транспортное средство	МРПП со скользящим уплотнением  Загвапное устройство Шарниры Шагающий МРПП рвп Колесное транспортное средство	Многозвеноый двузатарный МРПП  Шарнир Загвапное устройство ω Четырехзвеноый МРПП („паук“)  Загвапное устройство Шарниры ε

Дополнительная платформа 2 содержит только узел поворота 8 с механизмом подъема и опускания ВЗУ 9. Устройство функционирует следующим образом (рис. 2.2.6): при перемещении по поверхности задействуется основная транспортная платформа 1, а дополнительная платформа 2 находится в транспортном положении на платформе 1 (рис. 2.2.6а). При подходе к поверхности, расположенной под некоторым углом к поверхности перемещения устройства, задействуется узел поворота 3 и платформа 2 поворачивается до момента упора ВЗУ 9 в новую поверхность (рис. 2.2.6, б). Момент упора может быть зафиксирован датчиком вакуума, связанным с полостью ВЗУ 9, которое закрепляется на новой поверхности, после чего ВЗУ платформы 1 освобождаются. С помощью узла поворота 3 платформа 1 переводится на платформу 2 (рис. 2.2.6, в). Для осуществления перемещения по новой поверхности узел поворота 8 дополнительной платформы разворачивает обе платформы узлом поворота 3 по ходу движения (рис. 2.2.6, г). После этого платформа 1 с помощью узла поворота 3 переводится на новую поверхность и фиксируется на ней (рис. 2.2.6, д). ВЗУ 9 освобождается и платформа 2 перемещается в транспортное положение (рис. 2.2.6, е).

Разработанный мобильный робот позволяет: переходить с одной поверхности на поверхности, расположенные под углами друг относительно друга до 270° (рис. 2.2.7 а, б, в); преодолевать препятствие типа "трещина" шириной l (рис. 2.2.8); преодолевать уступ (рис. 2.2.9) размерами $a * b$.

Дальнейшим развитием рассмотренной схемы является МРПП, в котором соединены узлом поворота два шагающих робота вертикального перемещения (рис. 2.2.10). Транспортные модули 1 и 2 обеспечивают движение по вертикальным и горизонтальным поверхностям за счет вакуумных захватных устройств. Подробная конструкция транспортного модуля и принцип его движения описаны выше. Во время движения по поверхности задействуется только один транспортный модуль, а второй находится на нем (рис. 2.2.10, а, в). Модуль вращения предназначен для поворота одного транспортного модуля относительно другого при переходе с поверхности на поверхность (рис. 2.2.10, б). Модуль 3 может быть выполнен в виде как одностепенного, так и двухстепенного шарнира, максимальное значение угла поворота может находиться в пределах: $270 < \alpha < 360^\circ$.

Расчет геометрических параметров двухмодульного шагающего МРПП. При проектировании робота со складывающимися платформами необходимо правильно определить положение

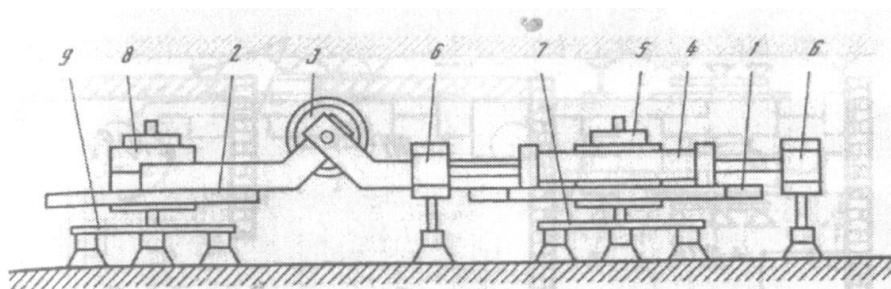


Рис. 2.2.5. Конструктивная схема двухмодульного шагающего робота с одной транспортной платформой

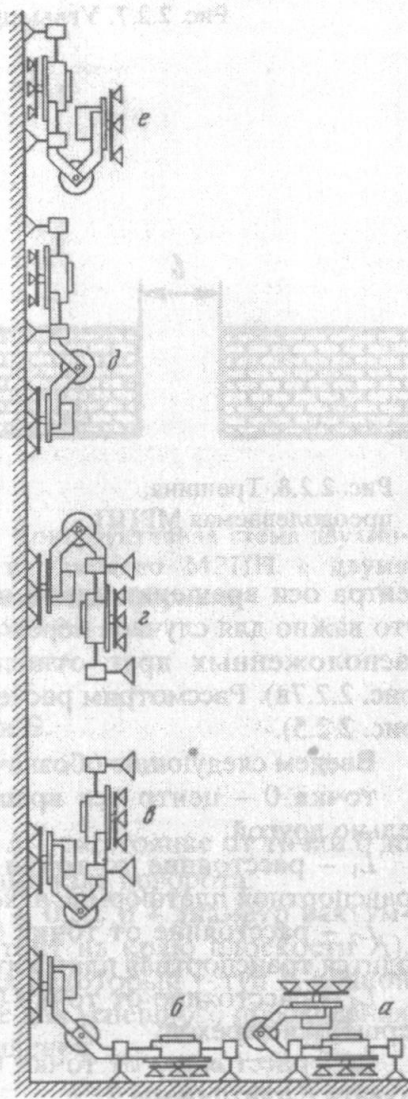


Рис. 2.2.6. Стадии перехода МРПП с одной поверхности на другую

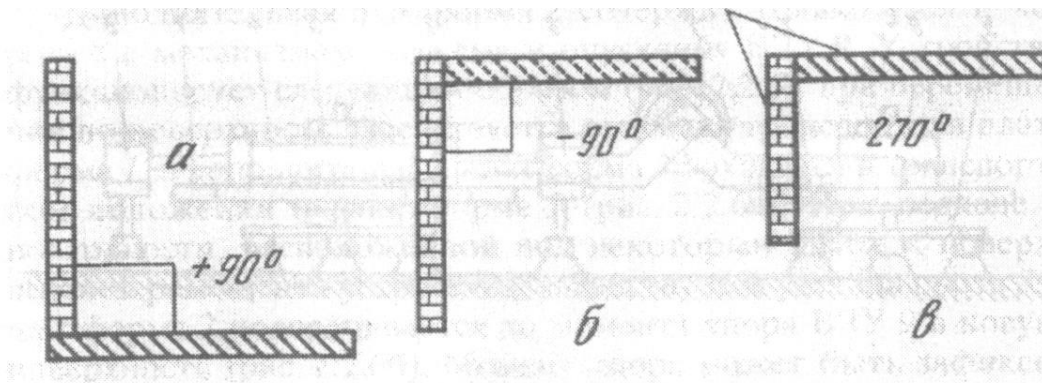


Рис. 2.2.7. Углы, преодолеваемые МРПП

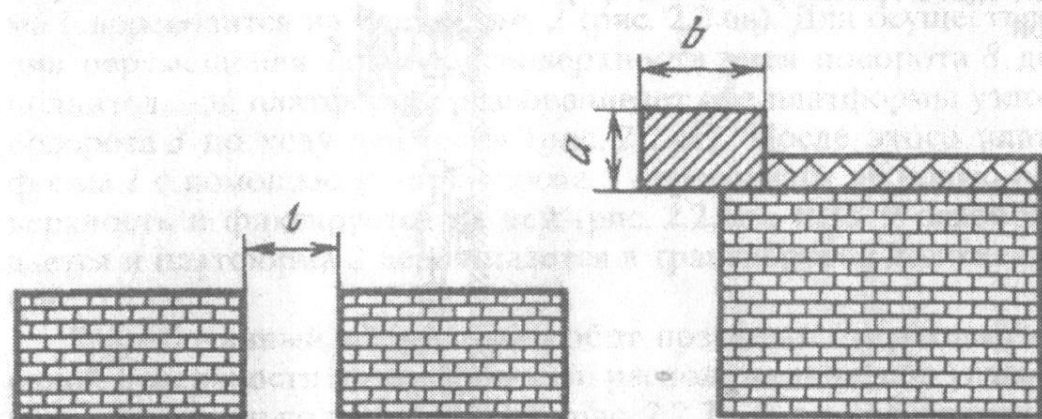


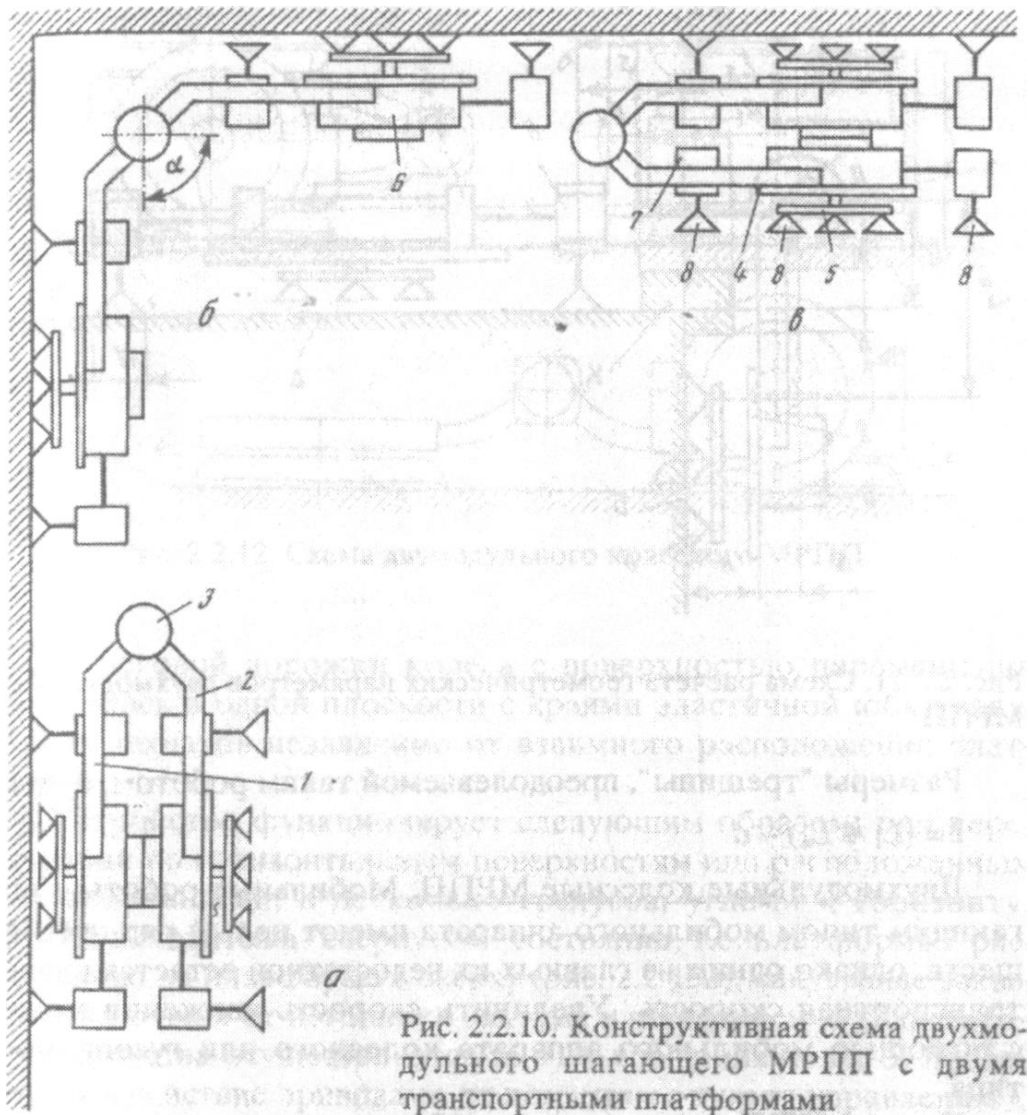
Рис. 2.2.8. Трещина, преодолеваемая МРПП

Рис. 2.2.9. Уступ, преодолеваемый МРПП

центра оси вращения одной платформы относительно другой. Это важно для случаев перехода с поверхности на поверхность, расположенных друг относительно друга под углом 270° (рис. 2.2.7в). Рассмотрим расчет параметров на примере схемы 1 (рис. 2.2.5).

Введем следующие обозначения (рис. 2.2.11):

- точка 0 - центр оси вращения одной платформы относительно другой;
- L_1 - расстояние от точки 0 до центра вакуумного захвата транспортной платформы, находящегося в крайнем положении;
- L_2 - расстояние от точки 0 до плоскости А, на которой находится транспортная платформа;
- L_3 - расстояние от точки 0 до плоскости Б, на которую совершается переход;
- L_4 - расстояние от точки 0 до центра крайнего вакуумного захвата 8 платформы 2.



Тогда имеем: $L_1 = L_3 + S$; где S - расстояние от края плоскости Б.

Так как $L_3 = h + \Delta$,

где h - высота платформы робота; Δ - расстояние от точки 0 до платформы, определяемое габаритами узла поворота.

В частном случае расстояние $S = 0,5d$ - диаметр вакуумного захвата (если платформа 1 стоит на краю плоскости А). Если на краю плоскостей находится некоторый уступ К длиной $a_1 + a_2$ и высотой b , то в этом случае для успешного преодоления уступа должны соблюдаться соотношения:

$h > a_1$; $S \geq a_2 + 0,5d$; $L_4 - \Delta > b$.

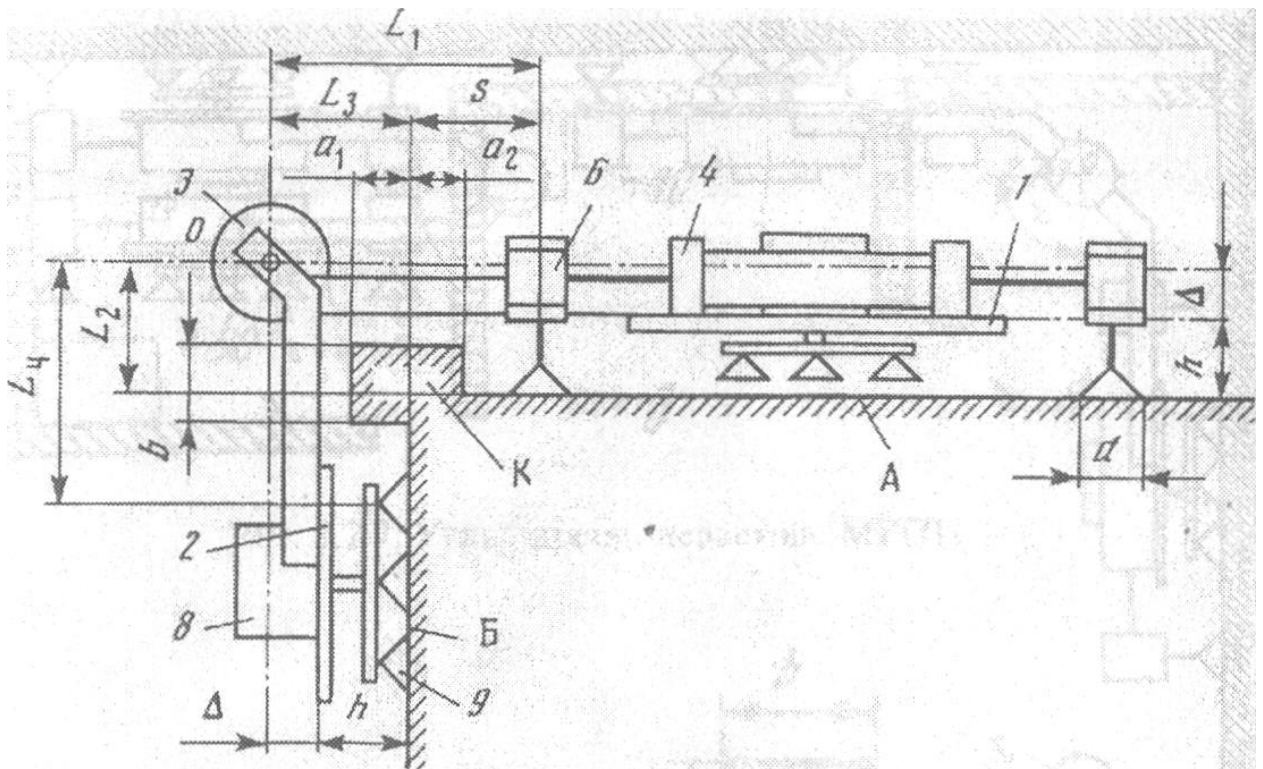


Рис. 2.2.11. Схема расчета геометрических параметров двухмодульного МРПП

Размеры "трещины", преодолеваемой таким роботом, будут:

$$l = (L_1 + L_4) - d.$$

Двухмодульные колесные МРПП. Мобильные роботы с шагающим типом мобильного аппарата имеют целый ряд преимуществ, однако одним из главных их недостатков остается низкая транспортная скорость. Увеличить скорость движения можно с помощью мобильного аппарата колесного или гусеничного типа.

Такой МРПП содержит две снабженные вакуумными захватами связанные между собой подвижным соединением платформы, одна из которых снабжена средством перемещения, которое выполнено в виде двух колес, расположенных на одной оси с независимыми приводами, а вакуумные захваты размещены между колесами (рис. 2.2.12) [103, 115].

МРПП содержит первую основную платформу 1 и вторую дополнительную платформу 2, которые соединены шарниром 3. Каждая из платформ снабжена вакуумным захватом со "скользящим" уплотнением 4, соединенным с источником вакуума. Основная платформа снабжена двумя колесами 5, установленными на одной оси вращения. Каждое колесо имеет индивидуальный привод, при этом размер колес выбран таким, чтобы точка кон-

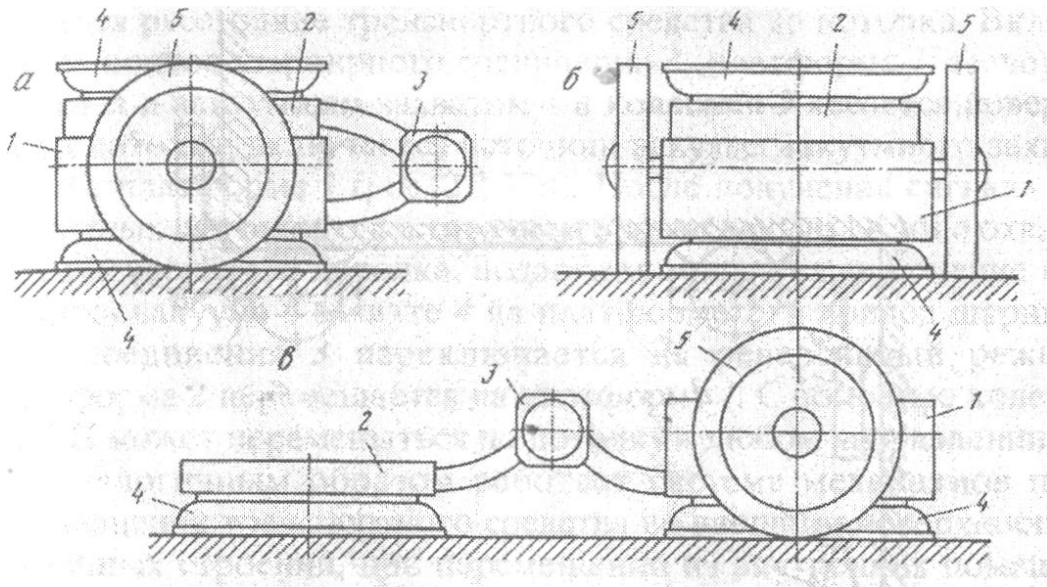


Рис. 2.2,12. Схема двухмодульного колесного МРПП

такта беговой дорожки колеса с поверхностью перемещения находилась в одной плоскости с краями эластичной юбки вакуумных захватов независимо от взаимного расположения платформ.

Устройство функционирует следующим образом: при перемещении по горизонтальным поверхностям или расположенным под небольшими, в несколько градусов, углами к горизонту. МРПП находится в "свернутом" состоянии, т.е. платформа 2 расположена на платформе 1 сверху (рис. 2.2.13а), вакуумные захваты отключены от источника вакуума и перемещение транспортного средства осуществляется за счет вращения колес 5. проводимых в действие приводами по командам с пульта управления.

Для перехода МРПП с одной поверхности на другую е углами от 0 до 90°, например с пола на одну из стен, МРПП подходит к стене на определенное расстояние, определяемое габаритами взаимодействующих систем и механизмов (рис. 2.2.13б), и по команде с пульта управления или от датчика включается привод шарнирного соединения J, и платформа 2 перемещается до ее касания вакуумным захватом 4 вертикальной поверхности. После касания включается источник вакуума. Если на пульт управления поступают сигналы от датчиков о достаточном уровне вакуума в зоне охвата поверхности вакуумным захватом, привод шарнирного соединения 3 переключается в реверсивный режим, платформа 1 перемещается на платформу 2 (рис. 2.2.13в). При этом колеса 5 беговыми дорожками контактируют уже с вертикальной поверхностью. После подачи управляющего сигнала на привод колес транспортное средство будет пере-

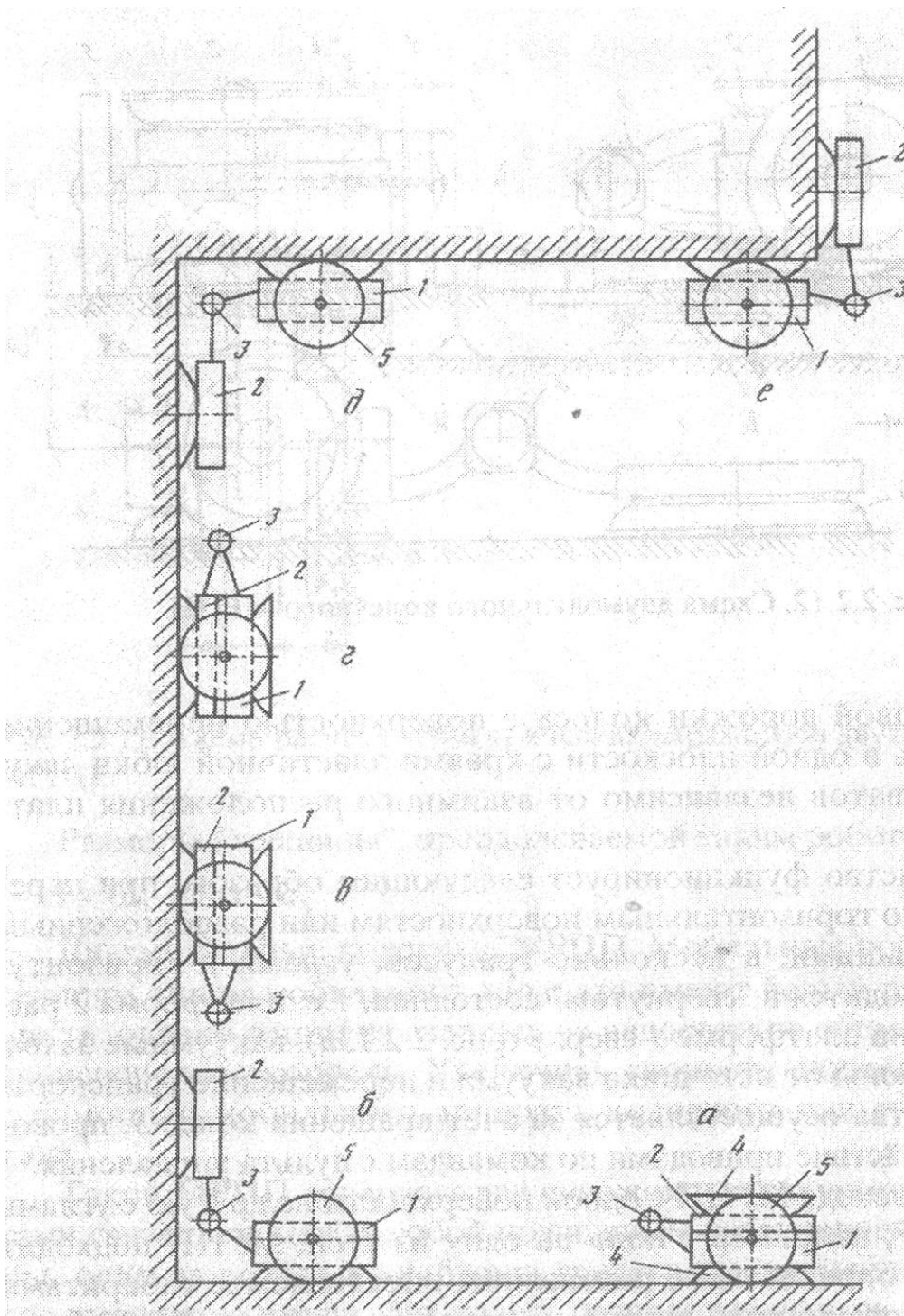


Рис. 2.2.13. Принцип перемещения колесного МРПП по произвольно ориентированным поверхностям

мещаться по вертикальной стене, удерживаясь на ней вакуумным захватом 4.

При подходе к потолку транспортное средство останавливается. Подается команда на одновременное включение индивидуальных приводов колес 5, одно колесо начинает вращаться, в одну сторону, другое - в противоположную. Транспортное средство разворачивается вокруг оси вакуумного захвата 4 на 180° (рис. 2.2.13г).

С помощью датчиков расстояния корректируется расстояние транспортного средства до потолка. Включается привод шарнирного соединения 3, платформа 1 разворачивается и вакуумным захватом 4 и колесами 5 касается поверхности потолка; включается источник вакуума вакуумного захвата 4 на платформе 1 (рис. 2.2.13d). После получения сигнала от вакуумных датчиков о достаточном уровне вакуума в зоне охвата части поверхности потолка, подается команда на включение источника вакуума в захвате 4 на платформе 2, и привод шарнирного соединения 3 переключается на реверсивный режим. Платформа 2 перемещается на платформу 1. С помощью колес 5 МРПП может перемещаться по потолку в любом направлении.

Аналогичным образом работает система механизмов при перемещении транспортного средства по внешним поверхностям различных строений, при перемещении из внутренних помещений здания наружу, например с потолка через проем в стене на внешнюю часть здания (рис. 2.2.13, е).

На рис. 2.2.14 представлена схема расположения системы механизмов транспортного средства при переходе на поверхность, расположенную по отношению к исходной на 360° . Это может быть, например, преодоление забора, переход с внешней части здания через окно во внутреннюю, на стену. В рассматриваемом случае связь платформы 2 с платформой 1 выполнена в виде двухзвенного шарнира 3-3, каждое из звеньев которого имеет индивидуальный привод.

Многозвенные роботы. Для передвижения по сложноориентированным в пространстве поверхностям может быть предложено мобильное робототехническое устройство одномодульного типа. Его конструкция реализуется в виде многозвенной структуры, каждый элемент которой обладает двумя степенями подвижности. Соединение таких элементов друг с другом обеспечивает всей конструкции повышенную маневренность [106, 90].

Схема многозвенного мобильного робота (рис. 2.2.15), состоит из трех средних полузвеньев 2,3, 4 и двух крайних полузвеньев 1,5, на концах которых находятся ВЗУ 6,7.

Полузвенья, соединенные между собой узлами полушестерен 8,9,10,11 образуют звенья А, В, С, D, каждое из которых обладает двумя степенями подвижности [113]. Средние полузвенья 2, 3, 4 содержат два, а концевые полузвенья 1,5 - один электродвигатель постоянного тока. Каждый двигатель полузвена через редуктор соединен с полушестерней соседнего полузвена. В узлах полушестерен

установлены датчики угла поворота. Максимальный угол поворота одного полузвена относительно другого 2α составляет примерно 140° , что обусловлено конструктивными причинами.

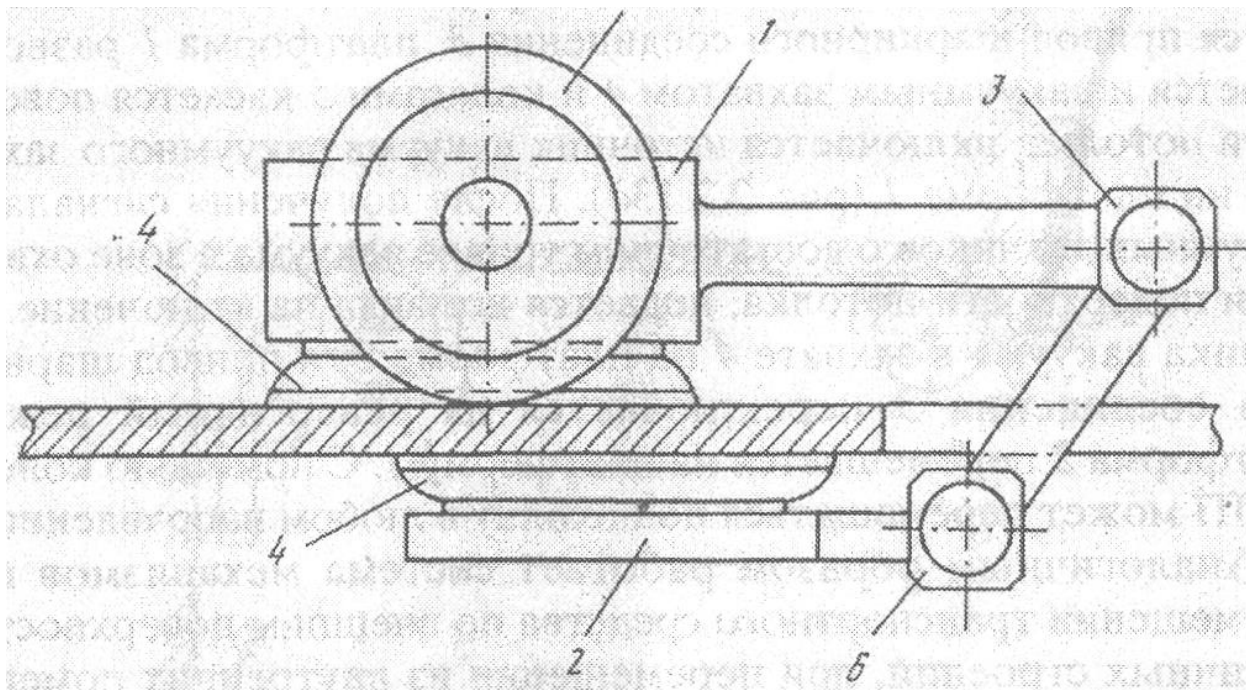


Рис. 2.2.14: Схема расположения систем механизмов транспортного средства при переходе на поверхность, расположенную по отношению к исходной на 360°

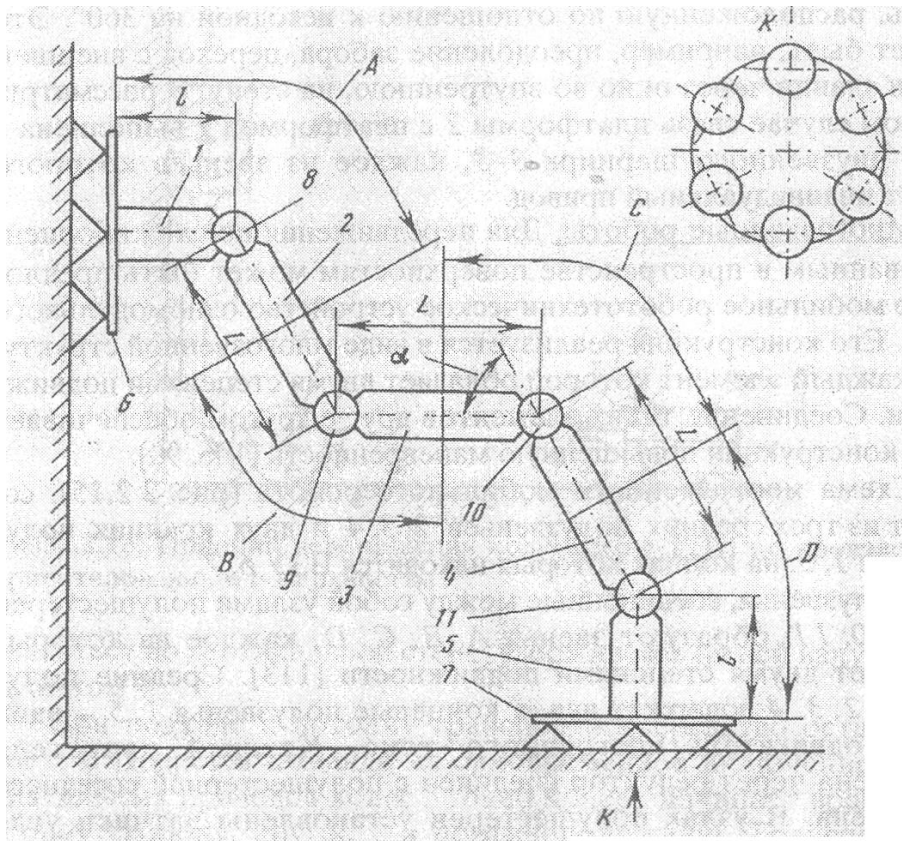


Рис. 2.2.15. Схема многозвенового шагающего робота (МШР)

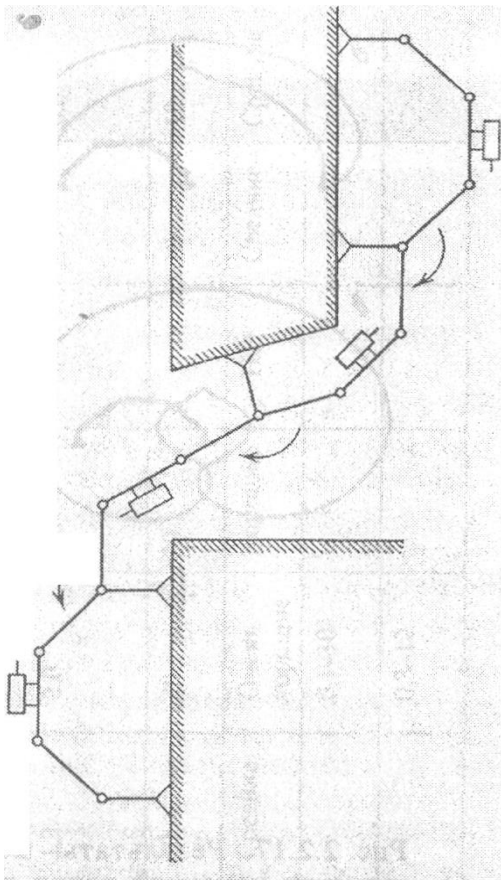


Рис. 2.2.16. Схема передвижения МШР по произвольно ориентированным поверхностям

Принцип движения многозвенного МРПП состоит в следующем. При перемещении по плоскости ВЗУ 6 и 7 за счет перемещения полузвеньев поочередно перемещаются в направлении движения. Во время перемещения одного ВЗУ другое фиксируется на поверхности за счет создания вакуума в его полости, прилегающей к этой поверхности. В перемещаемом ВЗУ в это время вакуум отсутствует. При подходе перемещаемого и соответственно ориентированного ВЗУ к поверхности создается вакуум в его полости, за счет чего он фиксируется на поверхности. Другое ВЗУ после этого расцепляется с поверхностью и перемещается в пространстве за счет поворота полузвеньев конструкции. Реализованы четыре вида походок робота. Первые две относятся к плоским движениям: походка типа "поворот через голову" и походка типа "движение гусеницы". Другие две походки осуществляются с выходом из плоскости: антропоморфная (человекоподобная походка) и как ее частный случай - походка типа "движение циркуля". На рис. 2.2.16 показана схема передвижения такого робота по поверхностям, произвольно ориентированным по отношению друг к другу. При этом принцип движения робота аналогичен описанному выше.

Основными конструктивными параметрами, влияющими на возможности многозвенного робота (см. рис. 2.2.15), являются:

- длины полузвеньев l и L , определяющие полную длину робота;
- массы полузвеньев m и M , определяющие полную массу робота;
- величина угла 2α , определяющая маневренные возможности робота, и размеры зоны достижимости;
- скорость перемещения полузвеньев $\omega_{зв}$;
- максимально допустимая величина статического момента сил сопротивления на выходных валах редукторов полузвеньев M_c , характеризующая нагрузочные возможности робота.

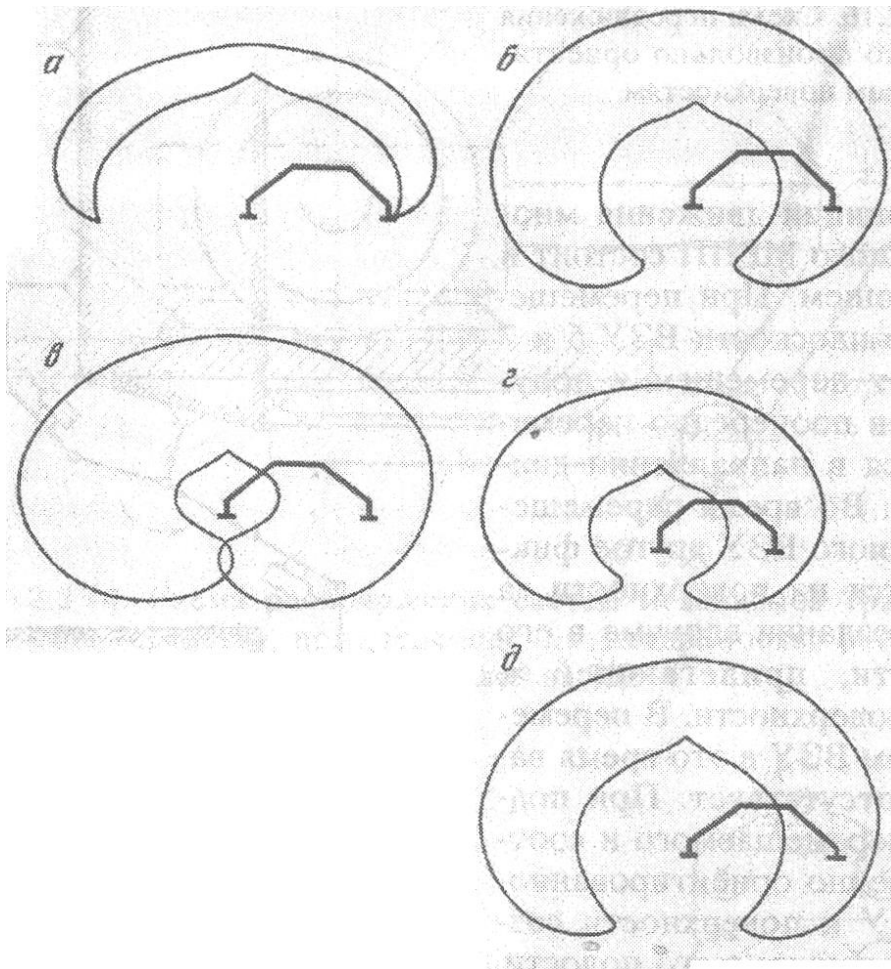


Рис. 2.2.17. Результаты моделирования зоны достижимости конечной точки стопы МШР при различных длинах звеньев и углах

а – при $l = 2/3L$ и $2\alpha = 90^\circ$; б – при $l = 2/3L$ и $2\alpha = 140^\circ$;
 в – при $l = 2/3L$ и $2\alpha = 170^\circ$; г – при $2\alpha = 140^\circ$ и $l = L$;
 д – при $2\alpha = 140^\circ$ и $l = 1/4L$

Также при проектировании следует учитывать стоимость изготовления робота.

Длины полувзвеньев l и L , их масса m и M , величина момента Mi зависят от рационально спроектированных редукторов полувзвеньев. Рациональное значение величины стационарной скорости вращения полу звена $\omega_{зв}$ должна составлять примерно 0,013-0,016 рад/с.

Таблица 2.2.2

Основные параметры роботов с различными транспортными системами

Транспортная система		Двухплатформенный		Гусеничный	Скользящее уплотнение	Многозвенный		Четырехзвенный (паук)	
Основные параметры (усредненные данные)	Тип захвата	вакуумный	магнитный	вакуумный	вакуумный	вакуумный	магнитный	вакуумный	магнитный
Потребляемая мощность, кВт		1,5	2,5	1,8	0,3	1,0	2,0	1,8	1,2
Отношение	полезная нагрузка	2,2	0,8	1,3	2,0	1,0		0,8	0,6
	собственный вес								
Максимальная предельная нагрузка, кг		100	20	30	20	10		10	10
Возможности автономного управления		* Средние	Нет	Средние	Очень хорошие	Хорошие	Нет	Средние	Средние
Вибрационные нагрузки	Диапазон частот, Гц	0,5-20			0,1-10				
	Ускорения, м/с ²	0,3-10			0,3-12				

Для статического режима работы справедливо выражение:

$$N_{дв}\eta_p = k_{зап} M_c \omega_{зв}, \quad (2.2.3)$$

где $N_{дв}$ - мощность двигателя; $k_{зап}$ - коэффициент запаса, учитывающий необходимость преодоления динамических нагрузок в момент разгона.

Из этого выражения можно определить максимально допустимую величину статического момента сил сопротивления на выходном валу редукторов полузвеньев:

$$M_c = N_{дв} \eta_p / k_{зап} \omega_{зв}. \quad (2.2.4)$$

На рис. 2.2.17 представлены результаты цифрового моделирования зоны достижимости конечной точки стопы многозвеного робота для различных значений угла 2α в случае, когда длина крайних полузвеньев $l = 2/3L$ - длины средних полузвеньев. Изменение конфигурации зоны достижимости с увеличением угла 2α позволяет совершать переходы на поверхности расположенные по отношению друг к другу свыше 270° в случае, если значение угла 2α приближается к 180° .

Основные параметры роботов с различными транспортными системами представлены в табл. 2.2.2.

3. Измерительно-информационные системы роботов, действующих в сложных условиях окружающей среды

Назначение измерительно-информационных систем. Значение измерительно-информационных систем (ИИС) роботов, действующих в экстремальных или сложных условиях окружающей среды для выполнения поставленных задач, несоизмеримо возрастает по сравнению с традиционными промышленными роботами [2, 21, 26, 84, 125, 132, 143, 140] и связи с необходимостью детектирования информации о критических параметрах среды или о внезапном изменении окружающей обстановки, что может внести существенные коррективы в алгоритмы управления и в конфигурацию самих роботов.

В связи с этим ИИС подобных роботов должны воспринимать и передавать в систему управления информацию в реальном времени о состоянии транспортной и технологической систем самих роботов, о навигационных параметрах, имеющих или прогнозируемых данных об окружающей среде или о внезапно возникающих критических ситуациях. Таким образом, ИИС должны представлять информацию о внешней среде и о внутреннем состоянии роботов.

Поскольку в задачи ИИС входит преобразование физических характеристик окружающей среды, в том числе взаимодействующих в ней объектов, в информационные сигналы, влияющие на формирование управляющих алгоритмов при выполнении поставленных задач. Измеряемыми параметрами могут быть: механические, геометрические, температурные, оптические, акустические, электрические, магнитные, радиационные, рентгеновские, гравитационные и другие, характеризующие окружающую среду и возникающие в ней непредсказуемые ситуации.

Анализируя возможные ситуации и решаемые задачи, можно выделить следующие особенности ИИС:

- необходимость сохранения основных характеристик по точности, быстродействию, надежности и живучести при возможной загазованности, запыленности, повышенной температуре, радиоактивности и других свойствах окружающей среды и возникающих критических ситуациях;
- достоверность и надежность передаваемой информации в динамическом режиме, связанном с маневрами робота и механическим движением объектов;
- минимально возможные веса и габариты преобразователей, усилителей, источников питания, входящих в состав датчиков;
- соответствие используемых методов измерения возможным критическим характеристикам окружающей среды;
- помехоустойчивость и безотказность информационного соединения с системой управления по уровням сигналов, методу преобразования, логическим связям, роду энергии, типу интерфейса;
- сочетание функций преобразования и первичной обработки измерительной информации локальными системами для интеграции в иерархические системы управления;
- рациональный выбор системы измеряемых параметров, удовлетворяющий требованиям полноты информационного обеспечения и минимально возможного количества датчиков, упрощающих конструкцию ИИС.

Основными измеряемыми параметрами, характеризующими внутреннее состояние мобильных роботов, считаются линейные и угловые перемещения приводов и исполнительных органов, скорости и ускорения движения, а дополнительными параметрами могут быть проскальзывания, зазоры, перекосы, наличие внутренних дефектов, ориентация положения центра масс транспортной системы или технологического инструмента. Информация о внутреннем состоянии роботов

необходима для Улучшения их динамических характеристик и диагностирования механизмов.

Включение датчиков положения, скорости или ускорения в контуры обратных связей системы управления способствует обеспечению плавности хода, повышению точности и маневренности движения в процессе выполнения технологических задач.

Прогнозирование ресурса и создание блокировок от возникновения аварийных ситуаций с помощью датчиков направлено на повышение надежности и долговечности роботов.

Общая схема ИИС (рис. 2.3.1) предусматривает наличие внутреннего микропроцессора обработки измерительной информации.

Физический метод бесконтактного измерения параметра первичным преобразователем информационной системы может быть различным: электрический; оптический с помощью телекамер или лазерного дальномера; акустический; ультразвуковой; пневматический; электромагнитный; тепловой; радиационный; химический и др. Механический метод измерения с помощью щупов относится к контактным методам. В ряде случаев наибольший эффект обеспечивает комплексное применение различных методов преобразования.

Существенное значение имеют объемные трехмерные телевизионные, а также когерентно-оптические лазерные, голографические или волоконно-оптические системы.

В состав ИИС входят микропроцессоры со встроенным программным обеспечением для первичной обработки больших объемов воспринимаемой и подлежащей обработке информации, что позволяет производить машинный анализ изображений и выдавать информацию в обобщенном концентрированном виде в систему управления или непосредственно оператору.

Посредством ИИС могут формироваться базы знаний о внешнем мире. Достоверная информация способствует принятию решений системой управления роботом в процессе его движения и необходимости совершения маневра. Датчики измерения в дальней зоне применяются для навигации роботов, идентификации объектов и обхода препятствий, если требуется оценить расстояние до неподвижных или движущихся препятствий или каких-либо объектов или определить местоположение и форму препятствия.

Классификация бесконтактных датчиков ИСС для измерения расстояний с использованием различных физических методов измерения дает представление о

многообразии различных методов (рис. 2.3.2). В то же время необходимо отметить, что измерять расстояния в дальней зоне мобильного робота можно в основном оптическими, акустическими и электромагнитными радиоволновыми ИИС; измерять расстояния в ближней зоне

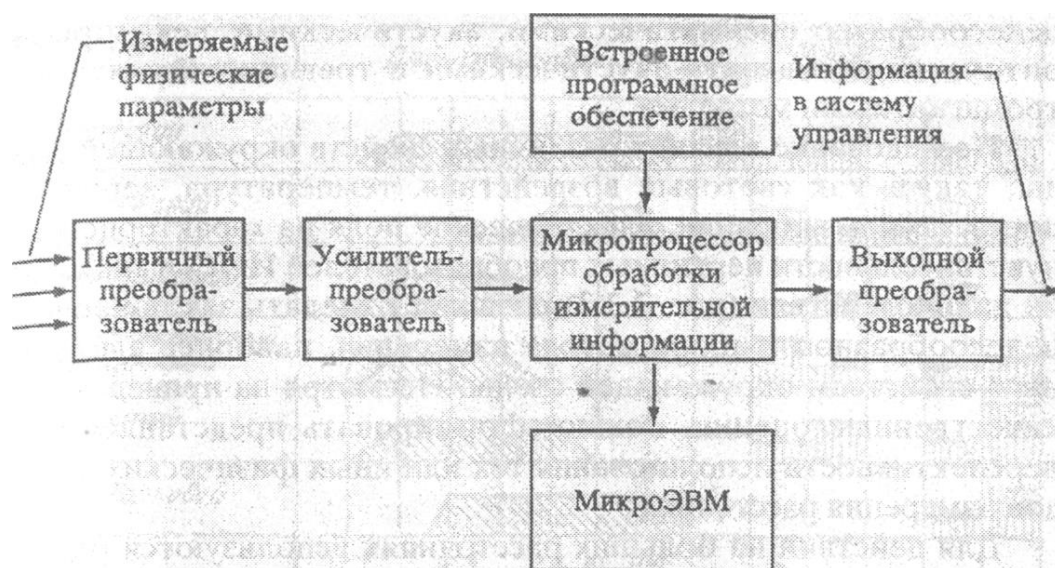


Рис. 2.3.1. Общая схема измерительно-информационной системы



Рис. 2.3.2. Классификация первичных преобразователей ИИС

целесообразно пневматическими, акустическими, некоторыми оптическими, магнито-акустическими и традиционными электромагнитными методами.

Исследование влияния различных свойств окружающей среды таких, как световые воздействия, температура, запыленность, шумы, вибрации, электрические поля на характеристики чувствительности первичных преобразователей ИИС, а также на их дальноедействие (рис. 2.3.3) позволяет сделать заключение о целесообразном выборе метода измерения, наиболее адекватного свойствам окружающей среды. Несмотря на приведенные качественные оценки, можно сформировать представление о перспективности использования тех или иных физических методов измерения расстояний.

Для действий на больших расстояниях используются радиолокаторы и лазерные дальномеры. Наиболее информативны ИИС технического зрения. Однако

они обладают в то же время такими недостатками, как незащищенность от световых помех и требуют эталонной освещенности для точных измерений.

Сравнительные характеристики датчиков, используемых в ИИС МРПП, приведены в табл. 2.3.1.

Значительно менее информативны, но более неприхотливы к изменению внешних условий и более надежны ультразвуковые и пневматические датчики. Поэтому в дальнейшем изложении в качестве примеров рассмотрим несколько подробнее ИИС технического зрения как наиболее информативные и пневматические, простые и надежные.

Оценки восприятия информации о внешней среде ИИС мобильного робота. Объем информации о внешней среде мобильного робота в процессе его движения, оснащенного системой датчиков - измерительно-информационной системой, должен удовлетворять определенным требованиям, важнейшими из которых можно считать:

- достоверность и адекватность по отношению к измеряемым параметрам;
- оптимальность (в смысле количества измеренной и переданной информации);
- отсутствие избыточности информации для осуществления программы движения транспортной системы и бортового манипулятора.

Избыточная информация способствует уменьшению быстродействия, усложнению алгоритмов обработки и ухудшению помехозащищенности.

Выбор информационных оценок и оптимального количества информации от датчиков о чувствлении, адекватной достижению роботом цели,

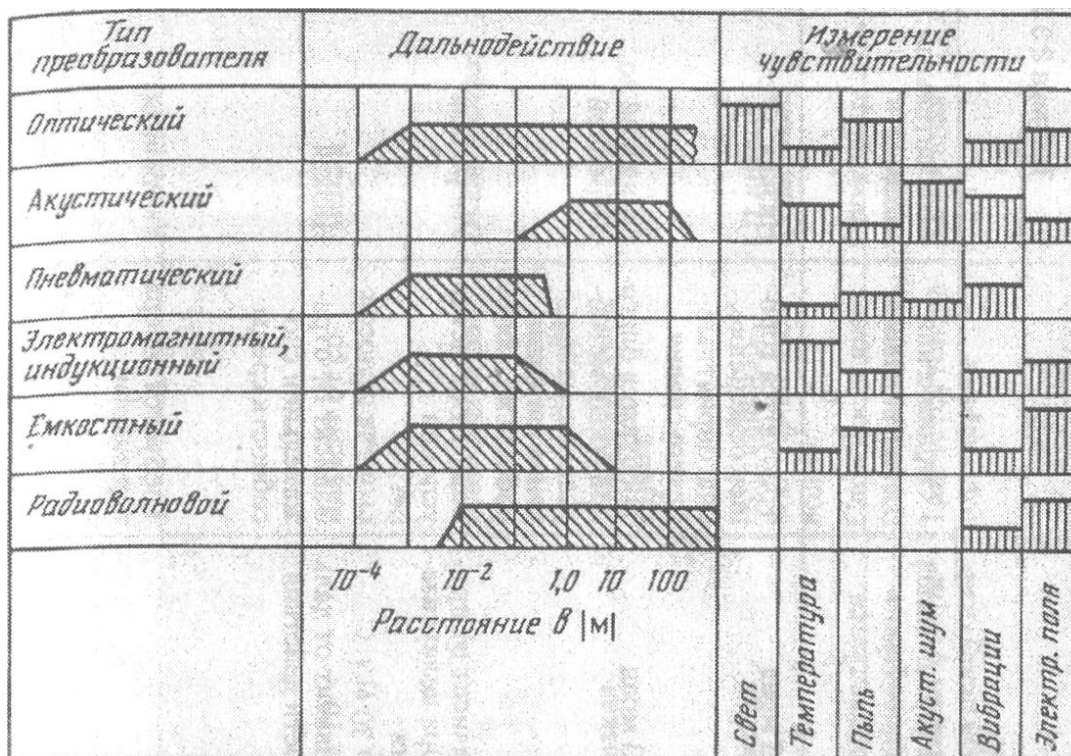


Рис. 2.3.3. Влияние свойств внешней среды на чувствительность преобразователей

является важной задачей робототехники. Информационные оценки используются на стадии проектирования и в процессе алгоритмизации. Исследования в направлении рационального построения ИИС роботов с применением информационных оценок или критериев широко ведутся в нашей стране и за рубежом. Определенные результаты были получены в работах [73, 79], где, в частности, введено понятие коэффициента использования информации ИИС очувствления робота, равного отношению оптимального объема информации, необходимого для устранения неопределенности системы с учетом резервирования, к объему информации на входе в систему управления.

В работах [70, 76] приведены данные об учете информационных параметров, получаемых с помощью различного типа датчиков роботов с использованием физических методов преобразования.

Учитывая данные измерений параметров роботов в процессе их движения, влияние физических методов преобразования информации и возможные типы преобразователей ИИС, для улучшения качества управления целесообразно введение следующих информационных оценок:

а) Информативность или мера информации. Мера информации на каждое измеренное значение $J = \log n = -\log P$, где

Таблица 2.3.1

Параметры датчиков, применяемых в ИИС МРПП						
Тип датчика	Физическое свойство измерения	Режим работы	Диапазон (дальность)	Разрешающая способность	Ограничения к применению	Относительная стоимость
1	2	3	4	5	6	7
Телевизионный	Обнаружение отраженного излучения	Пассивный	До 20 км	0,3 мрад	Требуются хорошее освещение, благоприятные метеоусловия	Низкая
Инфракрасный в диапазонах 3–5 и 8–14 мкм	Обнаружение отраженного излучения	Пассивный	До 20 км	0,3 мрад	Требуются благоприятные метеоусловия, охлаждение во время работы	От низкой до умеренной
Лазерный дальномер	Обнаружение отраженного лазерного излучения	Активный	От 10 м до предела прямой видимости	Зависит от прибора целеуказания	Зависит от метеоусловий	Умеренная
Датчик получения панорамных трехмерных изображений поверхностей	Интерференция отраженных лучей от наблюдаемой среды	Активный	До нескольких метров	Зависит от дальности действия	Зависит от отражательной способности среды	Низкая
Радиолокационная станция мм-диапазона	Обнаружение отраженного высокочастотного импульса	Активный	100 м – 5 км		Требуется генератор энергии	Умеренная

Таблица 2.3.1 (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7
Приемник мм-диапазона для синтезирования изображений	Обнаружение излучения в мм-диапазоне	Пассивный				
Микрофон	Обнаружение акустической волны	Пассивный	Низкая частота – до 20 км; высокая частота – до 100 м	От 10 до 20 угл. с	Зависит от состояния атмосферы	Низкая
Ультразвукового зондирования	Обнаружение отраженного ультразвукового импульса	Активный	Несколько метров		Сложная обработка и интерпретация сигналов	Очень низкая
Сейсмический	Обнаружение скорости и давления сейсмической волны	Пассивный	До 1 км	Низкая	Зависит от типа грунта	Низкая
Магнитный	Обнаружение изменений магнитного поля	Пассивный	Менее 15 м	Низкая	Нестационарность фоновых полей	От низкой до высокой
Тактильный	Измерение сил и давления	Активный	Определяется типом робота	Определяется типом робота	Сложность интеграции данных	Сложно прогнозировать
Газовый анализатор дальнего радиуса действия на основе лазерного локатора	Измерение обратного рассеивания	Активный	Несколько десятков километров	Зависит от прибора целеуказания	Требуется генератор энергии	Умеренная

Таблица 2.3.1 (окончание)

1	2	3	4	5	6	7
Газовый анализатор на основе лазерного лока- тора	Измерение газо- вой концентрации		Определяется типом робота	Очень низкая	Зависит от со- стояния атмосфе- ры	От низкой до умеренной
Метеорологиче- ский	Измерение локальных метео- рологических параметров		Определяется типом робота	Очень низкая	Зависит от изме- нения состояния атмосферы	Умеренная
Радиометриче- ский измеритель дальности	Измерение коор- динат положения объекта и вре- мени	Пассивный	Несколько десятков мет- ров	Несколько десятков метров		Умеренная
Приемник радио- обнаружения	Обнаружение радиосигналов и теплового излу- чения	Пассивный	Несколько десятков кило- метров			От низкой до умеренной

$n = 1/2\delta_x + 1$, $\delta_x = \Delta x/x$ – относительные погрешности, n – число различных измеренных уровней с равной вероятностью; $P = 1/n$ – вероятность одного результата из общего числа n значений. Для одного аналогового датчика с диапазоном измерения h и разрешающей способностью Δh в момент времени t число его состояний $n = h/\Delta h$.

Объем информации на входе в ИИС робота:

$$J_{\text{вх}} = \log(M_{\text{вх}} \cdot n_{\text{вх}}^q \cdot k) = \log(2^q \prod_{i=1}^k n_{\text{вх}}), \quad (2.3.1)$$

где $M_{\text{вх}}$ – число возможных независимых состояний всех двухпозиционных датчиков на входе, q, k – количество двух- и n -позиционных датчиков.

б) Коэффициент η использования информации ИИС [137, 72] робота

$$\eta = \frac{J_{\text{опт}}}{J_{\text{вх}}}, \quad (2.3.2)$$

где $J_{\text{опт}} = \log M_{\text{опт}}$; $M_{\text{опт}}$ – число состояний внешней среды, необходимое для формирования оптимального движения. Система оптимальна при $\eta = 1$. Однако точные выражения для $M_{\text{опт}}$ получить трудно, поэтому используют приближенные выражения, получаемые для конкретных задач робототехники.

в) Мера информационных потерь при отклонении параметров ИИС робота реальной от идеальной по n аналоговым каналам в предположении, что они некоррелированы между собой, но каждый из них несет по своему каналу информацию, которая может быть коррелирована с помехой. Усредненная по времени среднеквадратичная погрешность преобразования

$$\sum_{i=1}^n \overline{\varepsilon_i^2(t)} = \sum_{i=1}^n \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [z_i(t) - x_i(t)]^2 dt, \quad (2.3.3)$$

где $x_i(t)$ – входной, $z_i(t)$ – выходной сигналы ИИС, при этом $x_i(t)$ равен сумме полезного $x_{mi}(t)$ сигнала и помехи $\xi(t)$. Оценка точности, при условии не превышения заданных пределов потерь информации и использования метода компенсации коррелированной с помехой составляющей сигнала $x(t - \tau)$ с помощью функции $S_{\text{опт}}$, определяется минимум среднеквадратичной ошибки преобразования

$$\varepsilon_{\min}(t, \tau) = z(t) - S_{\text{опт}} \cdot x(t - \tau),$$

$$\sum_{i=1}^k \overline{\varepsilon_i^2(t, \tau)_{\min}} = \sum_{i=1}^k \overline{z_i^2(t)} \cdot [1 - k_r^2], \quad (2.3.4)$$

где $k_r = \frac{z_i(t) \cdot x_i(t-\tau)}{[x_i^2(t) \cdot z_i^2(t)]^{1/2}}$ – нормированный коэффициент корреляции в данном канале.

г) Оптимизация передаваемой информации. Максимальный объем передаваемой информации, содержащейся в выходном сигнале, по отношению ко входному сигналу при определенном датчике робота с учетом минимальной ошибки по одному каналу равен

$$J(x, z, \tau) = \frac{1}{2} \log \frac{\overline{z^2(t)}}{\varepsilon_{\min}^2(t, \tau)} = \frac{1}{2} \log [1 - k_r]^{-1}. \quad (2.3.5)$$

Оптимальная в информационном смысле система должна удовлетворять условию

$$\frac{\overline{\varepsilon^2(t, \tau)}}{\overline{z^2(t)}} \rightarrow \min. \quad (2.3.6)$$

д) Пропускную способность тракта "ИИС робота–система управления", или количество информации, переданной за единицу времени, можно оценивать уравнением Шеннона в предположении, что входной сигнал – белый шум, а ИИС – идеальный фильтр нижних частот с граничной частотой $f_{\text{гр}}$

$$J_T = f_{\text{гр}} \cdot \log \left[1 + \frac{\overline{x_n^2(t)}}{\xi^2(t)} \right]. \quad (2.3.7)$$

е) Коэффициент передачи при измерении параметра определяется уравнением движения системы [20, 29]. Например, для очувствленного схвата бортового манипулятора массы m , включающего упругий и демпфирующий элементы, поведение которого описывается уравнением второго порядка, модуль коэффициента передачи силы на стенки схвата равен

$$|F| = \left\{ \frac{1 + \frac{1}{Q^2} \left(\frac{\bar{\omega}}{\bar{\omega}_0} \right)^2}{\left[1 - \left(\frac{\bar{\omega}}{\bar{\omega}_0} \right)^2 \right]^2 + \frac{1}{Q^2} \left(\frac{\bar{\omega}}{\bar{\omega}_0} \right)^2} \right\}^{1/2}, \quad (2.3.8)$$

где $Q = \frac{1}{c} \cdot \sqrt{k \cdot m}$ – добротность системы, $\bar{\omega}_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – резонансная частота.

Система датчиков механических величин робота должна удовлетворять требованиям информационных оценок, обладать избирательностью информации. При решении каждой задачи системе следует наделить способностью отбирать только необходимые для этого данные. Отсюда вытекает существенный вывод о проектировании измерительно-информационной системы робота, состоящий в том, чтобы на первом этапе производить обработку первичной измерительной информации, опрашивая определенные датчики или управляя их параметрами (чувствительностью, избирательностью, коэффициентом усиления, добротностью и т.п.). На следующих этапах - формировать алгоритм управления с учетом обобщенной первичной измерительной информации.

Проектирование с учетом информационных оценок необходимо для улучшения динамики, упрощения алгоритмов, повышения надежности робота в целом, а также существенного расширения измерительно-информационных свойств о состоянии окружающей среды, в которой движется мобильный робот, и технологической ситуаций, в которой производятся различные действия бортовым манипулятором мобильного робота.

Системы технического зрения. Управление движением мобильного робота производится на основе информации от бортовой ИИС, например, от телевизионной или лазерной, когда телекамера или лазерный источник установлены на борту робота. В этом случае осуществляется сканирование пространства световым или лазерным лучом. Изображение объектов может быть получено методом триангуляции [70], при использовании которого массив точек, расстояния от которых до приемника известны, переносится в Трехмерную систему координат. Результатами сканирования являются изображения объектов, интенсивность которых, пропорциональна зоне дальности, измеренной от плоскости движения до пары источник-приемник. Схема получения изображений методом триангуляции (рис. 2.3.4) иллюстрирует прохождение световых лучей через линзы и их отражение от объекта. Измерение расстояний может осуществляться с помощью фотодиодов (рис. 2.3.5) или посредством фоточувствительных ячеек (рис. 2.3.6). Если производится сканирование светового луча, то на матрице из фото чувствительных элементов получается изображение объекта.

Другим методом является метод подсветки, состоящий в проецировании светового потока на группу объектов и использовании эффекта изменения интенсивности потока для вычисления расстояния. Пересечение светового потока с объектами в рабочем пространстве образует полосы света, фиксируемые

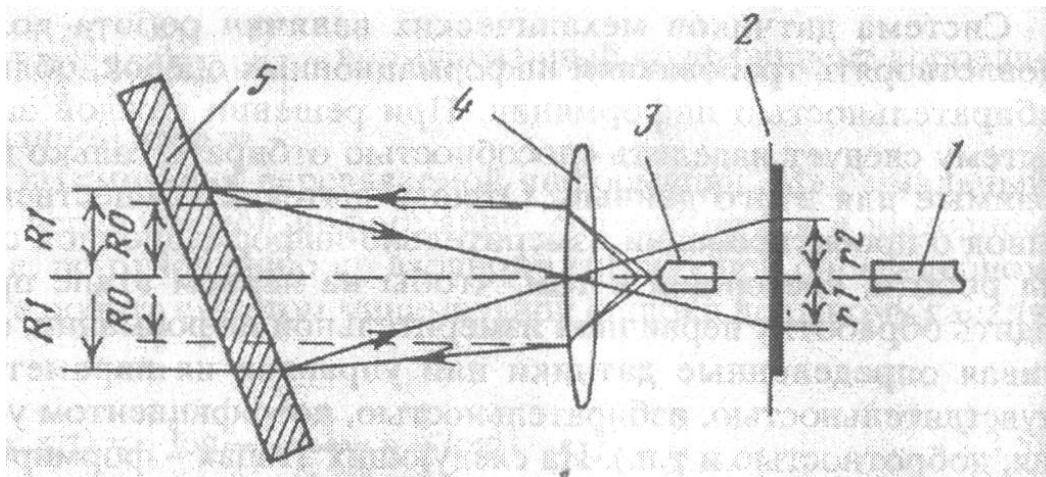
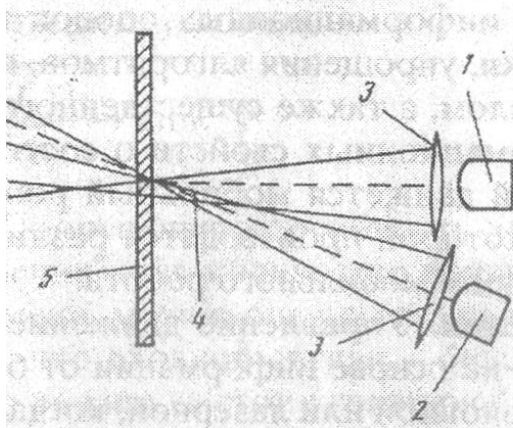


Рис. 2.3.4. Получение изображений методом триангуляции



2.3.5. Измерение расстояний
ощью фотодиодов

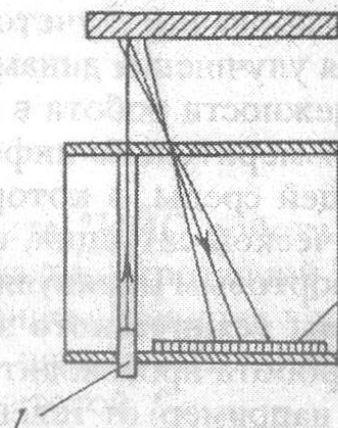
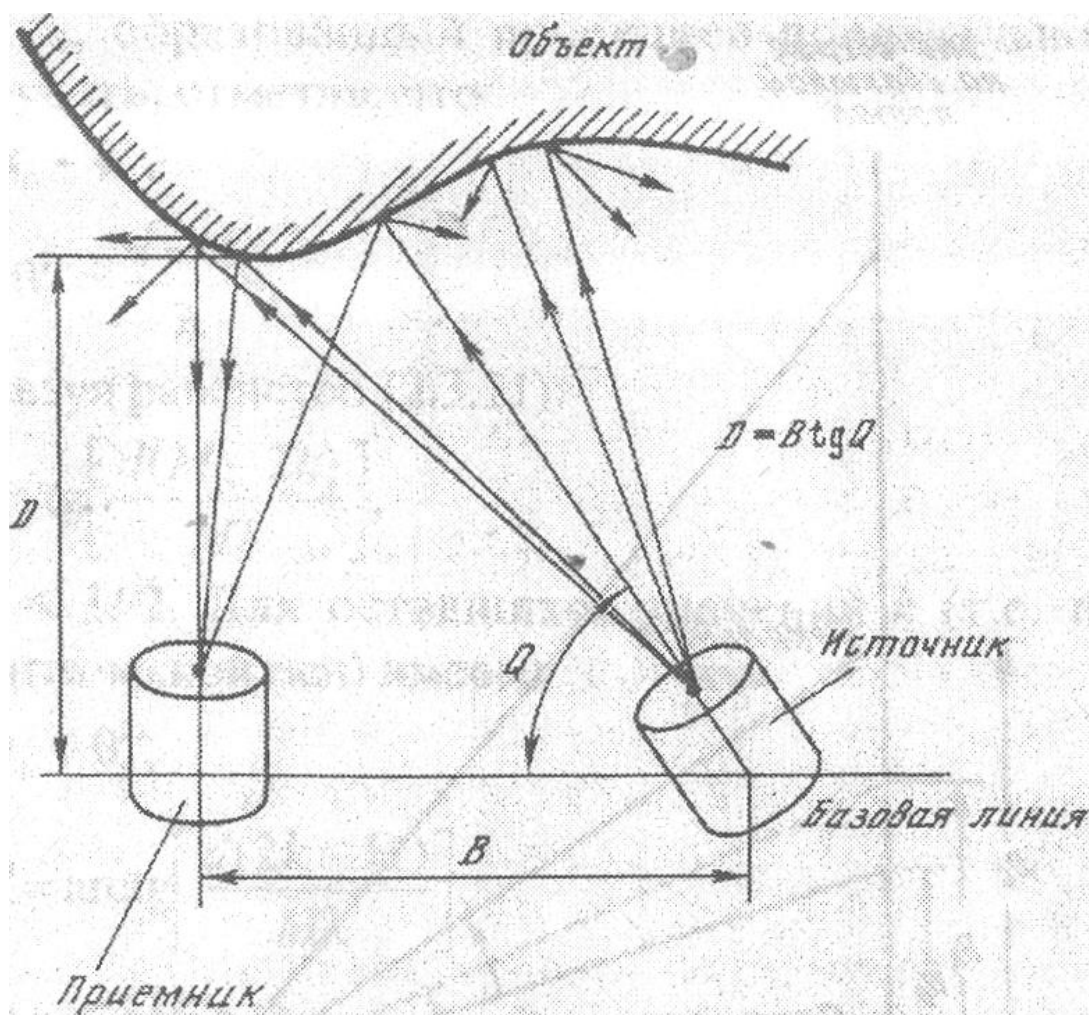


Рис. 2.3.6. Измерение расстояний
методов фоточувствительных
ячеек

телевизионной камерой, помещенной на известном расстоянии от источника света на борту робота. Для получения базовых значений расстояний вначале проводят калибровку системы. Один из простейших вариантов идентификации приведен на рис. 2.3.7, на котором изображен вид сверху системы, показанной на рис. 2.3.8. При таком расположении источник света и камеру помещают на одинаковой высоте, а световой поток перпендикулярен линии, соединяющей источник света и центр объектива камеры. Плоскостью отсчета служит вертикальная плоскость, проходящая через эту линию. Плоскостью отсчета 1 перпендикулярна световому потоку и любая вертикальная! плоская поверхность, пересекающая луч, дает вертикальную полосу света (см. рис. 2.3.8), каждая точка которой будет равноудалена по нормали от плоскости отсчета. Таким образом находится каждая точка в одном столбце изображения, поскольку известно расстояние от плоскости отсчета, что позволяет получать цифровые изображения. Предположим, что изображение



Рис, 2.3.7. Схема измерения расстояния и калибровки

полученное камерой, преобразовано в цифровой массив размерностью $n \times m$ и $y = 0, 1, 2, \dots, m - 1$ является номером столбца этого массива. Процедура калибровки состоит в измерении расстояния d между источником света и центром линз и последующим измерением углов α_c и α_0 . После того как эти величины становятся известными, из правил элементарной геометрии следует, что d (рис. 2.3.8) вычисляется по формуле

$$d = \lambda \operatorname{tg} \theta, \quad (2.3.9)$$

где λ – фокальная длина линз,

$$\text{и } \theta = \alpha_c - \alpha_0. \quad (2.3.10)$$

Для цифрового изображения, содержащего M столбцов, приращение расстояния d_k между столбцами определяется по формуле

$$d_k = k \frac{d}{M/2} = \frac{2kd}{M} \quad (2.3.11)$$

для $0 \leq k \leq M/2$. (В изображении на мониторе $k = 0$ соответствовало бы крайнему слева столбцу, а $k = M/2$ – центральному столбцу.)

Угол α_k , образованный проекцией произвольной полосы, легко получить, отметив, что

$$\alpha_k = \alpha_c - \theta'_k, \quad (2.3.12)$$

$$\text{где } \operatorname{tg} \theta'_k = \frac{d - d_k}{\lambda}, \quad (2.3.13)$$

или используя равенство (2.3.11):

$$\theta'_k = \operatorname{arctg} \left[\frac{d(M - 2k)}{M\lambda} \right], \quad (2.3.14)$$

где $0 \leq k \leq M/2$. Для оставшихся значений k (т.е. по другую сторону оптической оси) имеем:

$$\alpha_k = \alpha_c + \theta''_k, \quad (2.3.15)$$

$$\text{где } \theta''_k = \operatorname{arctg} \left[\frac{d(2k - M)}{M\lambda} \right], \quad (2.3.16)$$

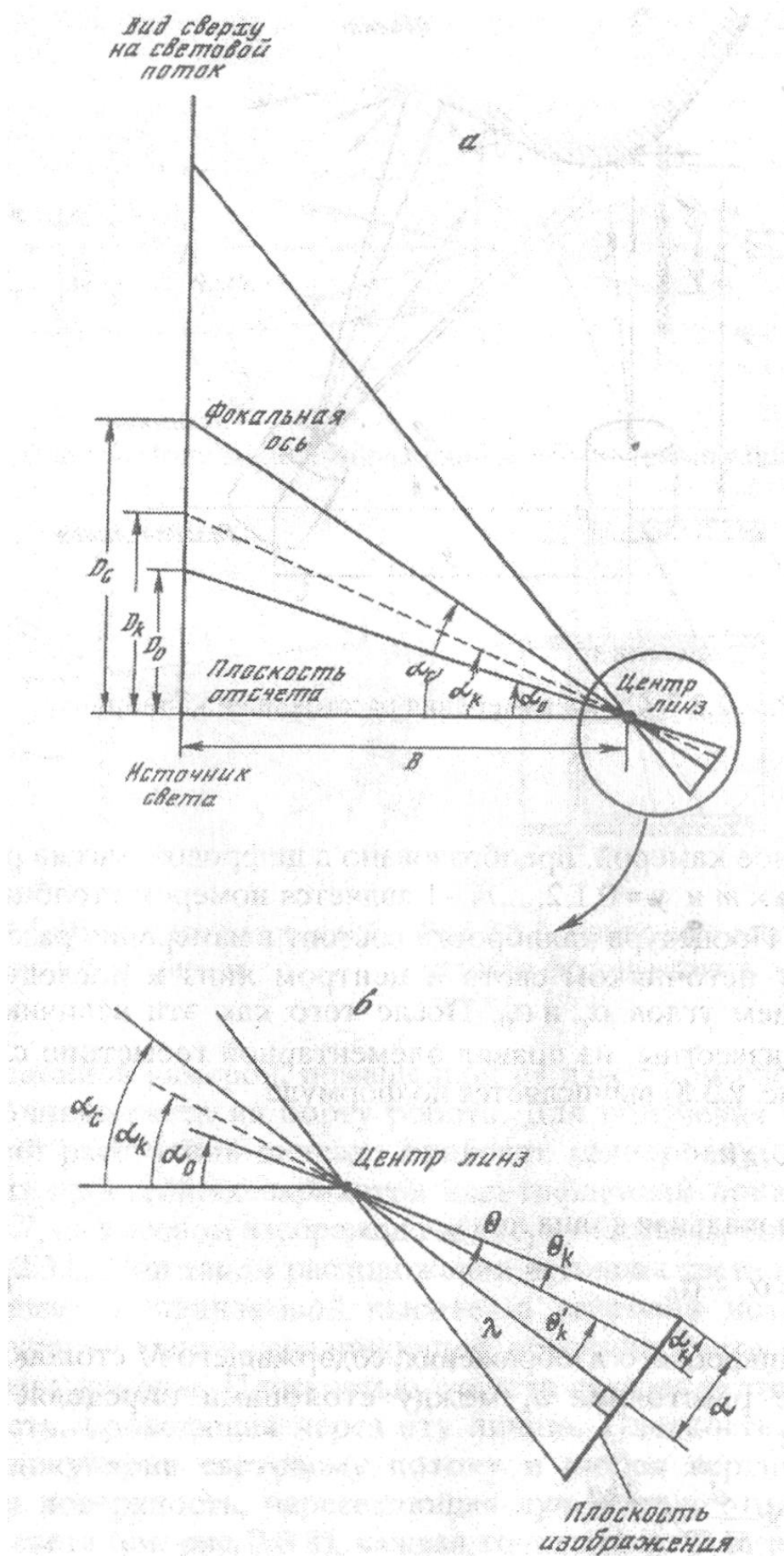


Рис. 2.3.8. Измерение расстояния методом подсветки

для $M/2 < k \leq (M-1)$.

Сравнивая уравнения (2.3.14) и (2.3.16), отметим, что $\theta_k'' = -\theta_k'$. Таким образом, равенства (2.3.14) и (2.3.15) идентичны для всего диапазона $0 \leq k \leq M-1$. Тогда из рис. 2.3.8 следует, что расстояние по нормали D_k между произвольной полосой света и плоскостью отсчета будет равно

$$D_k = B \operatorname{tg} \theta_k, \quad (2.3.17)$$

для $0 \leq k \leq M-1$, где α_k вычисляется либо из уравнения (2.3.12), либо из уравнения (2.3.15).

Важно отметить, что, если величины B , α_0 , α_c , M и λ известны, номер столбца в цифровом изображении полностью определяет расстояние между плоскостью отсчета и всеми точками на полосе, отображенной на этом столбце. Так как M и λ являются фиксированными параметрами, процедура калибровки состоит в простом измерении B и определении α_c и α_0 , как указано выше. Для определения α_c плоскую вертикальную поверхность размещают так, чтобы ее пересечение со световой полосой находилось в центре плоскости изображения (т.е. $y = M/2$). Затем измеряют величину перпендикуляра D_c между поверхностью и плоскостью отсчета. Из рис. 2.3.8 следует, что

$$\alpha_c = \operatorname{arctg} \left[\frac{D_c}{B} \right]. \quad (2.3.18)$$

Чтобы определить α_0 , поверхность перемещают ближе к плоскости отсчета, пока ее световая полоса не совместится с

$y = 0$ на плоскости изображения. Затем измеряют D_0 и из рис. 2.3.8 находят

$$\alpha_0 = \operatorname{arctg} \left[\frac{D_0}{B} \right]. \quad (2.3.19)$$

Это завершает процесс калибровки.

Основное преимущество такой системы состоит в относительной простоте измерения расстояний. После завершения калибровки расстояние, соответствующее каждому столбцу в изображении, вычисляется с помощью уравнения (2.3.17), где $k = 0, 1, 2, \dots, M-1$, а результаты хранятся в памяти. Затем в процессе измерений расстояние до любой точки изображения получают простым определением номера ее столбца в изображении и обращением к соответствующей области памяти.

В лазерных ИИС могут использоваться импульсные и непрерывные световые потоки. Двумерное сканирование лазерным лучом может выполняться электронным методом или путем отклонения лазерного луча вращающимся зеркалом [701]. Рабочая зона такого устройства обычно не превышает нескольких метров с точностью до 0,25 см. Построение двух- и трехмерных изображений объектов с помощью лазерного луча осуществляется встроенным в ИИС микропроцессором (рис. 2.3.9).

Импульсный световой сигнал можно заменить непрерывным лучом лазера, в таком случае измеряемое запаздывание в виде фазового сдвига между посылаемыми и отраженными лучами служит информативным параметром (рис. 2.3.10).

Допустим, что луч лазера с длиной волны λ расщеплен на два луча. Один из них ("луч отсчета") проходит расстояние L к фазометру, а другой - расстояние D до отражающей поверхности. Общее расстояние, пройденное отраженным лучом, составляет $D' = L + 2D$. Допустим, что $D = 0$. При этом условии $D' = L$, и как луч отсчета, так и отраженный луч достигают фазометра одновременно. Если увеличивать D , отраженный луч проходит большой путь и, следовательно, возникает фазовый сдвиг между двумя лучами в точке измерения (рис. 2.3.10 б). В этом случае имеем:

$$D' = L + \frac{\theta}{360} \lambda. \quad (2.3.20)$$

Отметим, что если $\theta = 360^\circ$, обе волны вновь совпадают и нельзя отличить $D' = L$ и $D' = L + n\lambda$, $n = 1, 2, \dots$, основываясь на одном измерении фазового сдвига. Таким образом, решение может быть получено только в том случае, если $\theta < 360^\circ$, либо, что то же самое, $2D < L$. Так как $D' = L + 2D$, подставив

это значение в уравнение (2.3.20), имеем:

$$D = \frac{\theta}{360} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (2.3.21)$$

что определяет расстояние через фазовый сдвиг, если известна длина волны. Если длина волны лазерного луча мала (например, 632,8 нм для гелий-неонового лазера), то метод, схема которого показана на рис. 2.3.10, нецелесообразно применять в робототехнике.

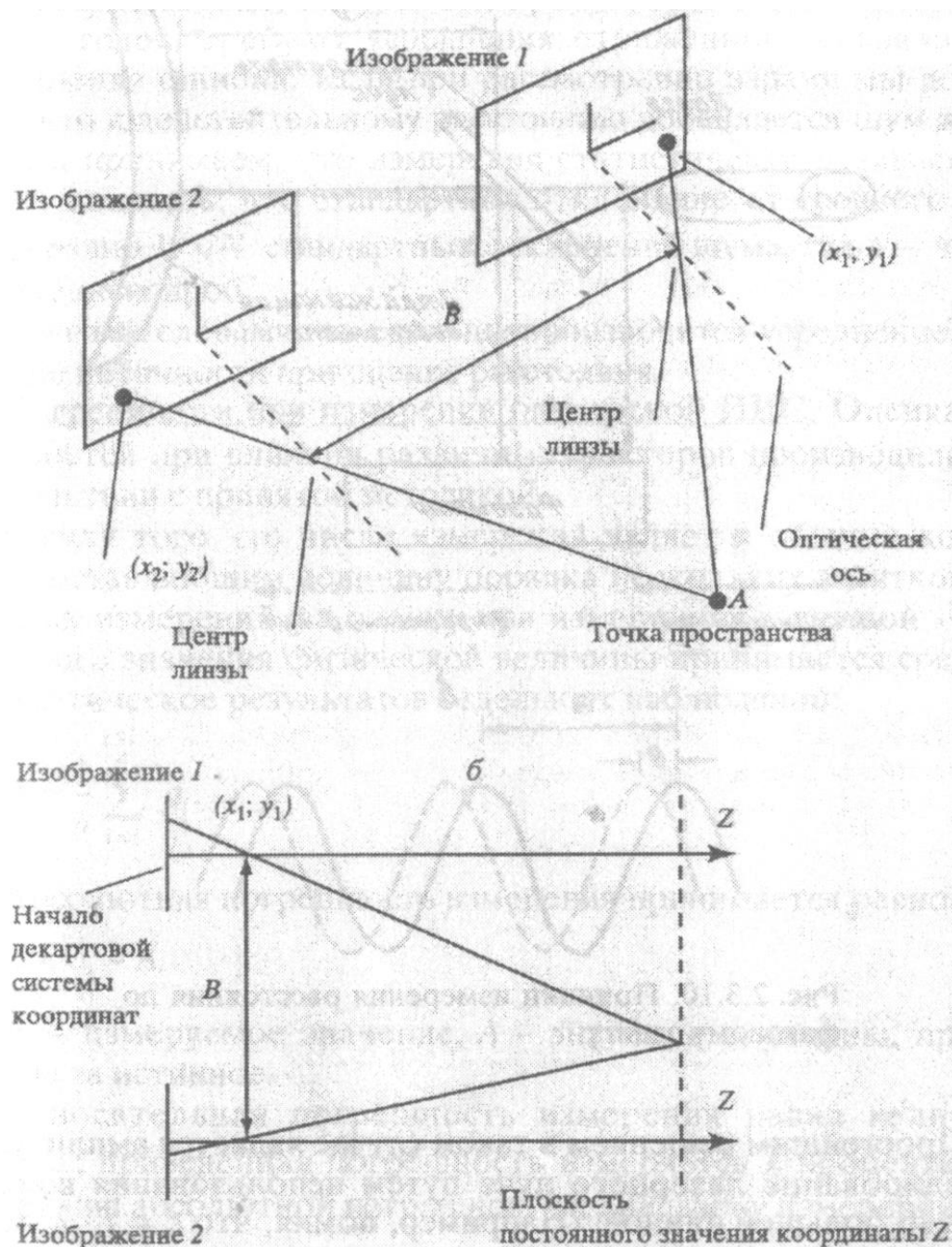


Рис. 2.3.9. Схема получения стереоизображения

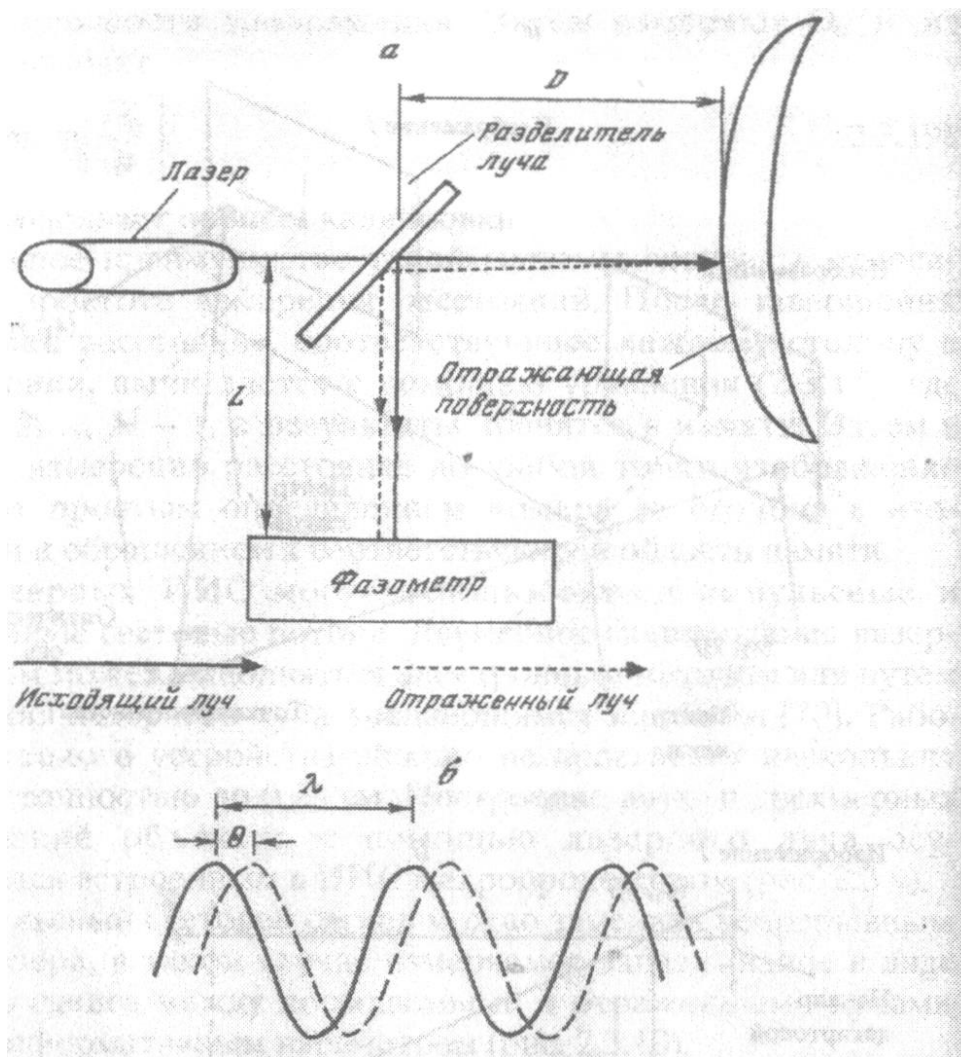


Рис. 2.3.10. Принцип измерения расстояния по фазовому сдвигу

Простейшим решением в таком случае является амплитудное моделирование лазерного луча путем использования волны с гораздо большей длиной. (Например, помня, что $c = f \times \lambda$, модулирующая волна с частотой $f = 10$ МГц, имеет длину 30 м). Этот метод проиллюстрирован на рис. 2.3.10. Основная процедура прежняя, но сигнал отсчета теперь - функция модулирования. Модулированный лазерный сигнал посылается на объект, а возвращенный сигнал демодулируется и сравнивается с отсчетным сигналом для определения фазового сдвига. Равенства (2.3.10, 2.3.21) все еще имеют силу, но теперь работа происходит в более удобном диапазоне длин волн.

Важное преимущество метода с непрерывным лучом по сравнению с импульсным методом состоит в том, что первый дает сведения об интенсивности (чем ярче, тем ближе) [70, 137]. Однако для работы по методу с непрерывным лучом затрачивается значительно большая мощность. Неточности при измерении расстояний, получаемые при использовании любого из этих методов, требуют усреднения

отраженного сигнала для уменьшения ошибки. Если при рассмотрении задачи мы допускаем, что к действительному расстоянию добавляется шум измерения и принимаем, что измерения статистически независимы, можно показать, что стандартное отклонение от среднего значения равно $1/\sqrt{N}$ стандартных отклонений шума, где N - число усредненных проб.

Другими словами, чем дольше производится усреднение, тем меньше неточности при оценке расстояния.

Погрешности при измерении оптической ИИС. Оценка погрешностей при влиянии различных факторов производилась в соответствии с принятой методикой.

В силу того что число измерений является обычно конечным, составляющим величину порядка нескольких десятков отдельных измерений, за оценку при измерениях в каждой точке истинного значения физической величины принимается среднее арифметическое результатов отдельных наблюдений:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i.$$

Абсолютная погрешность измерения принимается равной

$$\Delta = a_i - A,$$

где a_i – измеряемое значение, A – значение величины, принимаемое за истинное.

Относительная погрешность измерения равна величине $\bar{\Delta} = \Delta / x$; приведенная погрешность измеряется в процентах от отношения абсолютной погрешности к диапазону измерений, т.е.

$$\delta'_{\text{пр}} = \frac{\Delta}{D} \cdot 100\%,$$

где D – диапазон измерения, $\Delta_i = \Delta_{\text{и}} + \delta_{\text{и}}$ – погрешность измерения, $\Delta_{\text{и}}$ – систематическая погрешность, $\delta_{\text{и}}$ – случайная погрешность.

В качестве точечной оценки дисперсии можно выбрать соотношение

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - A)^2.$$

Соответственно оценка среднеквадратичного отклонения выбирается равной

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - A)^2}.$$

Случайная погрешность округления, появляющаяся в результате квантования аналоговой величины, существенно зависит от закона распределения плотности вероятности случайной погрешности. При условии справедливости для данного случая равномерного распределения распределение плотности вероятности $P(x)$ случайной погрешности δ , равномерно распределенной внутри интервала квантования $\left(-\frac{\Delta x}{2}, \frac{\Delta x}{2}\right)$, равно

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\delta}, & -\delta \leq x \leq +\delta, \\ 0, & x < -\delta; \quad x > +\delta. \end{cases}$$

Среднеквадратичное значение погрешности квантования можно определить по формуле

$$\sigma = \sqrt{\int_{-\frac{\Delta x}{2}}^{+\frac{\Delta x}{2}} P(x) \delta^2 dx}.$$

Заметим, что погрешность квантования пропорциональна величине интервала квантования Δx .

Ниже приводятся некоторые результаты исследования видеодетектора японской фирмы "Фуджи электрик" [73], с помощью которого можно распознавать изображения геометрических фигур.

Видеодетектор (ВД) позволяет вести контроль объектов по их изображениям, параметры которых представляются и анализируются в относительных единицах.

Однако имеется возможность использовать устройство и для проведения абсолютных измерений, но при этом надо учитывать, что на абсолютных результатах измерений при работе с видеодетектором сказываются такие факторы, как точность фокусировки, стабильность освещенности объекта, точность позиционирования, скорость перемещения объекта, шумы в тракте передачи и т.д.

Проведенный анализ и эксперименты по учету влияния различных факторов на результаты измерений геометрических параметров объектов показали, что с учетом приведенных выше формул отклонения в результатах могут достигать величин: из-за влияния шумов в тракте передачи - 0,15%; из-за поворота объекта вокруг оси - 0,3-0,5%; из-за изменения уровня видеосигнала - 2%; из-за изменения освещенности - 2%; из-за перемещения объекта в поле телекамеры - 0,01%.

Учет влияния предыдущих факторов проводился на плоском квадратном образце размером 20 x 20 мм- с объективом Cosmícar (фокусное расстояние $F = 75$ мм, светосила 1:1,4); уровень фокусировки оставался постоянным, при этом при измерении выдерживалось подобие фигур на экранах мониторов.

Минимальные размеры объекта, которые могут быть зарегистрированы для разных объективов, составляют:

- 0,25 мм - для объектива Cosmícar с фокусом $F = 75$ мм;
- 0,4 мм - для объектива Cosmícar с фокусом $F = 50$ мм;
- 0,8 мм - для объектива Cosmícar с фокусом $F = 25$ мм.

Анализ изображения производился за время от 10 до 500 мс и зависит от сложности распознаваемого образца.

Динамические свойства измерительной робототехнической системы с оптическим датчиком-телекамерой можно характеризовать изменением разрешающей способности в зависимости от скорости движения объекта в поле зрения телекамеры при постоянной освещенности. В качестве эталонного объекта использовалось растровое изображение с последовательно нанесенными на известном расстоянии штрихами определенной ширины. При увеличении скорости движения эталонного и других изображений уменьшалась амплитуда сигнала по координатам x и y и "сужались" контуры изображения. Ориентация изделия относительно камеры производилась на основании матричных соотношений конечных вращений тел [34]. Скорость увеличивалась до потери изображения или разделения непрерывных линий на прерывные, что соответствует максимально допустимой скорости движения объекта в поле зрения датчика.

Вращательные движения эталонного растрового образца осуществлялись в поле зрения ВД с помощью электрического двигателя типа РД. На вал двигателя насаживался диск с прорезями. Ширина прорезей (от 2 до 0,1 мм) и их количество менялось в процессе экспериментирования.

Минимальное время показа изображения составляло 100 мс при линейной скорости, равной 0,4 м/с. Для улучшения динамических характеристик при манипулировании с движущимися объектами и измерении их геометрических и механических параметров рекомендуется применять два метода: синхрони-

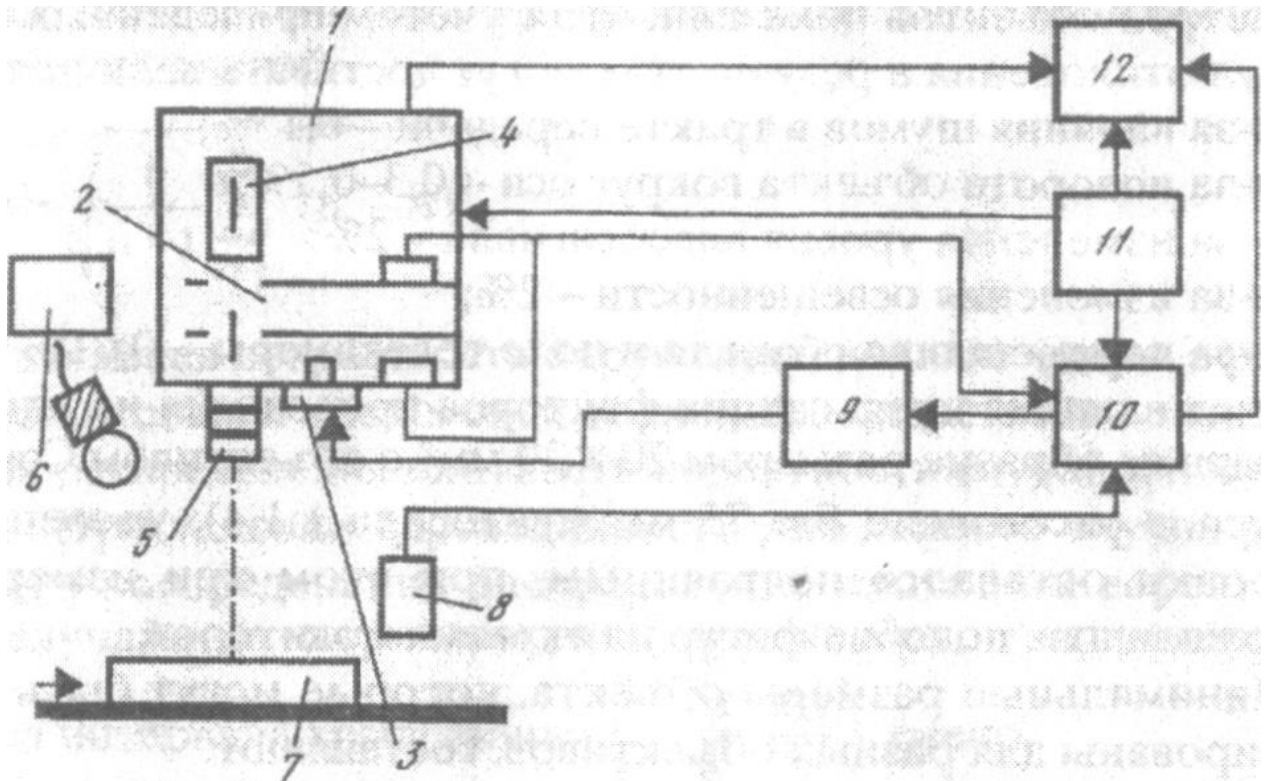


Рис. 2.3.11. Система управления механическим затвором

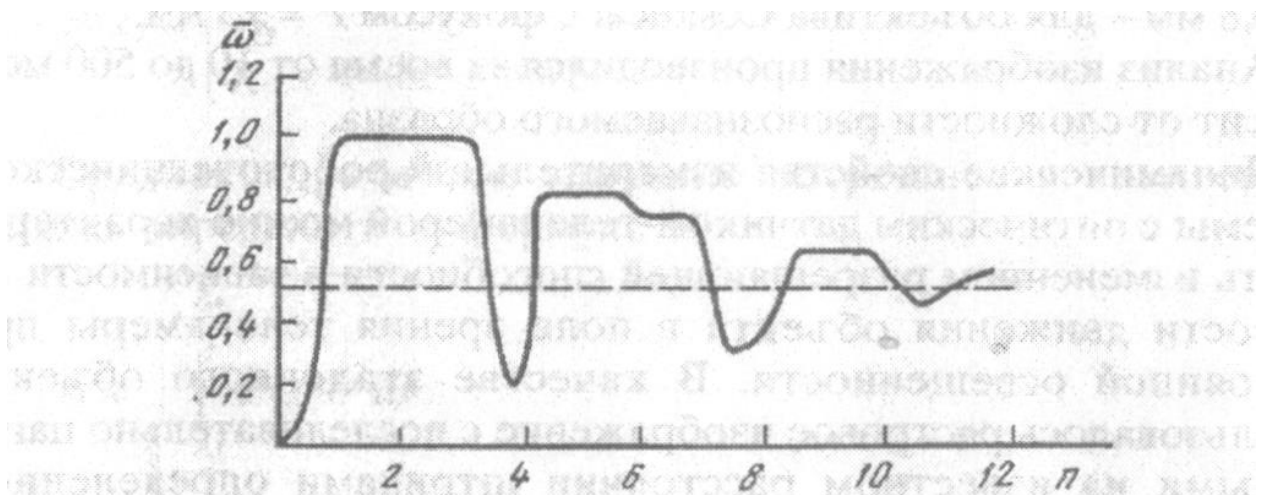


Рис. 2.3.12. Зависимость относительной угловой скорости от числа шагов двигателя

зацию изображения движущегося объекта с помощью стробоскопа и использование механического затвора в устройстве телекамеры [60, 73].

Система управления механическим затвором телекамеры содержит следующие устройства (рис. 2.3.11): 1 - телекамера, 2 - диск, 3 - шаговый двигатель, 4 - телевизионная трубка, 5 - объектив, 6 - источник освещенности, 7 - подвижный объект, 8 - датчик наличия детали, 9 - частотный преобразователь, 10 - блок управления механическим затвором, 11 - командное устройство, 12 - блок распознавания изображений.

Вращающийся диск с прорезями, укрепленный на валу шагового двигателя, располагается между телевизионной трубкой и объективом. При вращении с определенной частотой диск достигает постоянной угловой скорости после второго шага (рис. 2.3.12), где p - число шагов, ω - относительная угловая скорость. Система действует как фокусный плоский механический затвор. При этом частота переключения механического затвора согласуется с внешней строчной разверткой телекамеры при формировании изображения. Качество изображения эквивалентно качеству, получаемому посредством стробоскопического метода. Эффективный диаметр щели - 15 мм, время движения изображения - не более 2 мс, время перемещения механического затвора - 420 мкс.

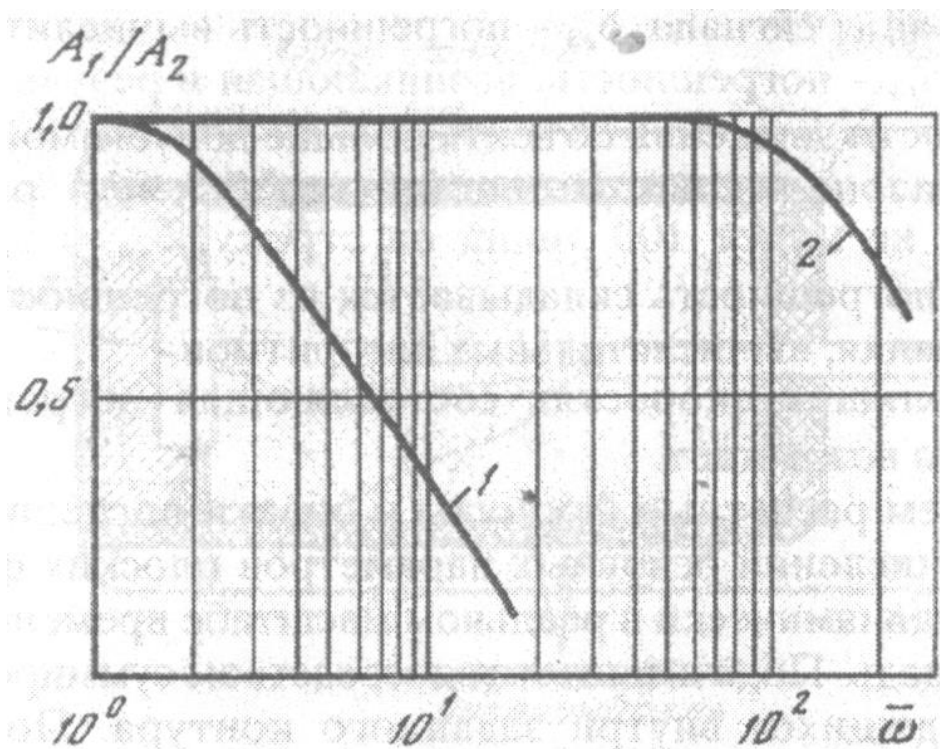


Рис. 2.3.13. Угловые амплитудно-частотные характеристики без затвора и с затвором

Применение управляемого механического затвора значительно улучшает динамические качества системы и в первую очередь разрешающую способность

системы. Так, при скорости движения подвижного объекта 7 (рис. 2.3.11), равной 500 мм/с, применение механического затвора повышает разрешающую способность в 10 раз (рис. 2.3.13). На рис. 2.3.13: 1 - условная амплитудно-частотная характеристика без затвора, 2 - амплитудно-частотная характеристика с затвором, по оси абсцисс - эквивалентное разрешение по числу телевизионных линий, по оси ординат - отношение выходной амплитуды ко входной.

Среднеквадратичная динамическая погрешность состоит из следующих основных составляющих:

$$\delta_g = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^k \delta_{gi}^2}}{k} = \frac{\sqrt{\delta_{g1}^2 + \delta_{g2}^2 + \delta_{g3}^2 + \delta_{g4}^2}}{4},$$

где δ_{g1} – погрешность телевизионного тракта, δ_{g2} – погрешность

преобразования сигнала, δ_{g3} – погрешность вычислительных алгоритмов, δ_{g4} – погрешность, возникающая в результате увеличения скорости движения объекта больше допустимой.

В диапазоне малых скоростей (до 0,5 м/с) разрешение составляет не менее 100 линий на строку, $\delta_{g4} = 0$, и результирующая погрешность складывается из погрешностей тракта, преобразования, вычислительных алгоритмов.

При больших скоростях составляющая погрешности δ_{g4} значительно возрастает.

Приведем расчетные формулы и оценки погрешностей численных вычислений основных параметров плоских фигур, производимых динамически в реальном масштабе времени.

а) Площадь. Подсчитывается посредством суммирования дискрет, находящихся внутри заданного контура. Погрешность равна сумме дискрет, находящихся на границе контура.

б) Периметр. Определяется формулой

$$l = \sqrt{\left(\sum \Delta x_i\right)^2 + \left(\sum \Delta y_i\right)^2},$$

где Δx_i и Δy_i – элементы длины по осям x и y .

Если контур фигуры представляет ломаную линию, то погрешность равна 0. Максимальная погрешность составляет 2,5% при криволинейном профиле.

в) Координаты центра масс

$$x = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta x_i}{N}; \quad y = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i}{N}.$$

Погрешность вычислений не превышает величин $\sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$.

г) Определение особых зон производится в соответствии с неравенствами:

$$(l + \Delta l) - 2\sqrt{\pi(S - \Delta S)} > 0 \text{ есть особая зона,}$$

$$(l + \Delta l) - 2\sqrt{\pi(S - \Delta S)} \leq 0 \text{ нет особой зоны,}$$

где Δl – и ΔS – периметр и площадь особых зон соответственно.

Ультразвуковые ИИС. Метод измерения расстояния по времени прохождения сигнала реализуется в ультразвуковых измерителях расстояний. Ультразвуковой сигнал передается за короткий промежуток времени и так как скорость звука известна

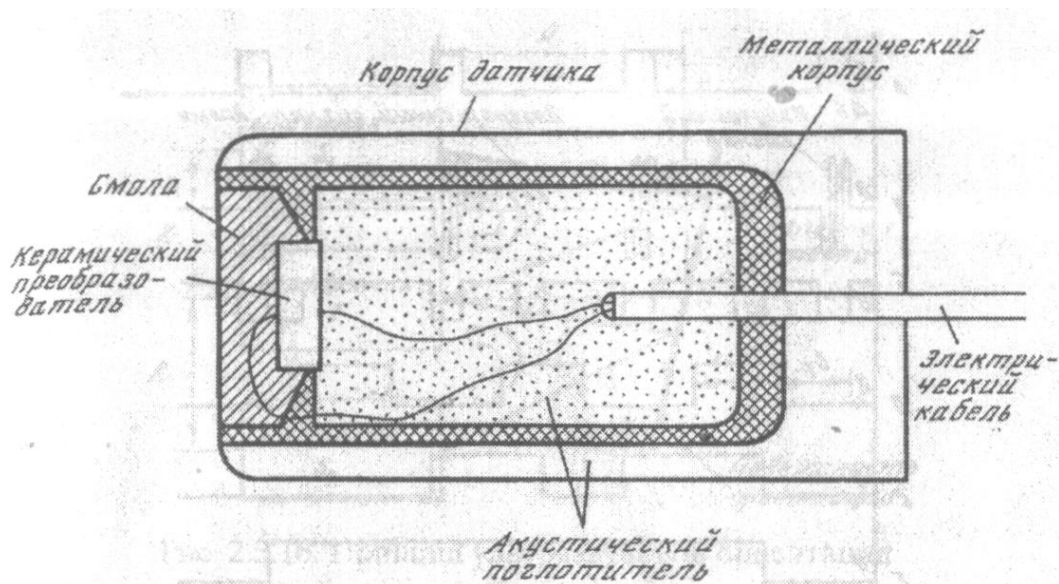


Рис. 2.3.14. Ультразвуковой датчик измерений в ближней зоне

для определенной среды, то произведение скорости распространения звука на интервал времени между посылаемым и отраженным сигналами равно расстоянию до отражающей поверхности.

Ультразвуковые преобразователи служат для измерения расстояний в дальней и ближней зонах [48, 51, 66,70].

В схеме типового ультразвукового преобразователя (рис. 2.3.14) основным элементом является электроакустический преобразователь, которым обычно служит пьезоэлектрический керамический элемент. Затем сигнал поступает на усилитель и вторичный преобразователь. Подложка из смолы защищает преобразователь от влажности, пыли и других внешних воздействий. Подложка также служит переходным акустическим сопротивлением. Поскольку один и тот же преобразователь используется обычно как для передачи, так и для приема сигналов, для обнаружения объектов в ближней зоне необходимо быстрое демпфирование акустической энергии. Это достигается применением акустических поглотителей и развязкой преобразователя от корпуса. Конструкция корпуса позволяет получать узкий акустический поток, дающий мощный и направленный сигнал.

Для лучшего понимания работы ультразвукового преобразователя ИИС в ближней зоне, представим последовательность сигналов, используемых как для передачи, так и для приема акустической энергии (рис. 2.3.15).

Сигнал *А* является опорным сигналом, используемым для управления посылаемыми сигналами. Сигнал *В* содержит выход-

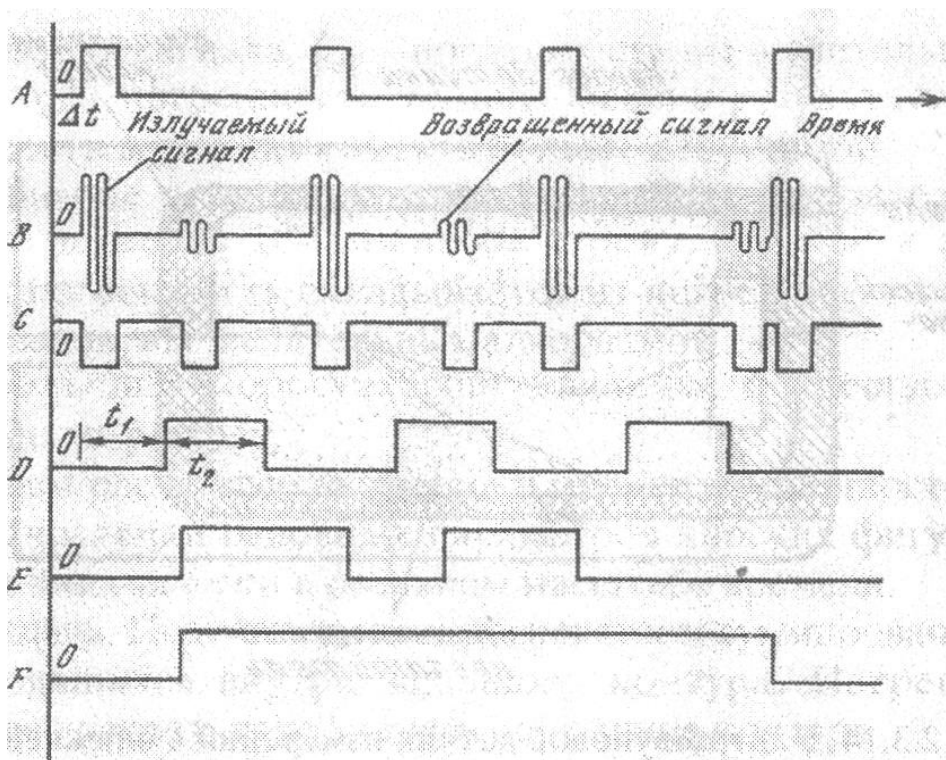


Рис. 2.3.15. Сигналы, используемые в ультразвуковом датчике измерения в ближней зоне

ной и отраженный сигналы. Импульсы C выделяют сигналы передачи или приема. Для того чтобы установить различие между импульсами, соответствующими посылаемой и отраженной энергии, вводятся временные окна (сигнал D), на которых основывается принцип измерения датчика. Временной интервал Δt есть минимальное время измерения, а $t_1 + t_2$ - максимальное. Можно отметить, что эти временные интервалы соответствуют прохождению определенных расстояний со скоростью распространения звука в используемой рабочей среде. После получения отраженного сигнала (в то время как сигнал D имеет максимальное значение), вырабатывается сигнал E , величина которого принимает нулевое значение после окончания действия передающего импульса A . Наконец, сигнал F генерируется при появлении положительного импульса E и сбрасывается в случае отсутствия сигнала F и появления импульса A . Таким образом, сигнал F будет иметь максимальное значение при наличии объекта на расстоянии, определяемом параметрами сигнала D . т.е. сигнал F - выходной сигнал ультразвукового датчика, работающего в бинарном режиме.

Для обработки измеряемых сигналов используется встроенный микропроцессор.

Длительность посылаемых сигналов составляет величину порядка нескольких микросекунд, частоты рабочих импульсов лежат в диапазоне 20-70 кГц, диапазон измеряемых расстояний составляет величины 0,1 – 10 м, с погрешностью 3 – 10%. Для

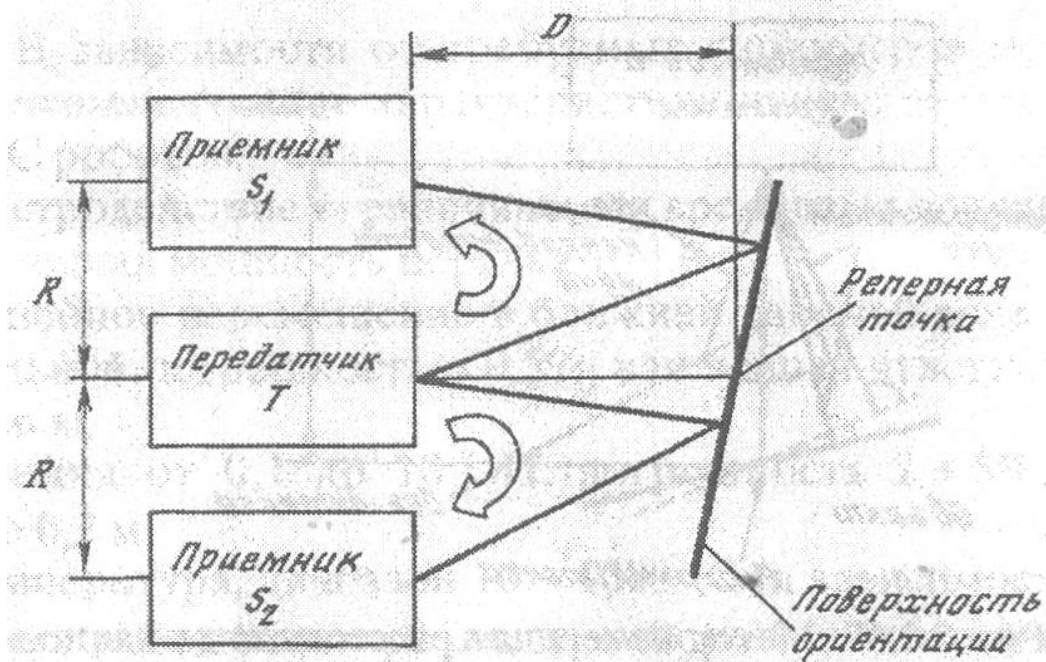


Рис. 2.3.16. Принцип ультразвуковой ориентации

улучшения устойчивости сигнала используются смешанные частоты. Например, в ультразвуковой ИИС фирмы Polaroid применяется сигнал длительностью 1 тс, состоящий из 56 импульсов частотой 50, 53, 57 и 60 кГц [70].

Ультразвуковой преобразователь ИИС связывается жестко с корпусом робота в системах ориентации и может осуществлять сканирование для анализа поверхностей.

Принцип действия ультразвуковой ИИС для ориентации робота относительно некоторой поверхности в направлении нормали к ней (рис. 2.3.16) состоит в измерении и анализе времени отражения сигналов от разных точек детектируемой поверхности. Генератор ультразвуковых сигналов Г находится на некотором расстоянии R от приемников, но может быть и совмещен с приемниками отраженных сигналов (рис. 2.3.17).

Отраженные ультразвуковые сигналы от поверхности объекта, наклонной по отношению к первоначальной плоскости измерений реперной точки, воспринимаются приемником за разное время (рис. 2.3.17).

Ультразвуковые датчики обычно применяются для ориентации, навигации и обхода препятствий мобильными роботами. Ультразвуковой метод измерения может служить и для построения изображений объектов, в том числе их внутренних сечений, что находит применение в системах ультразвуковой томографии медицинского и технического назначения. Этот эффект перспективен для использования в системах технической диагностики мобильных роботов, перемещающихся внутри труб, предназначенных например, для оценки качества или внутреннего состояния труб различных диаметров агрегатов и магистральных трубопроводов.

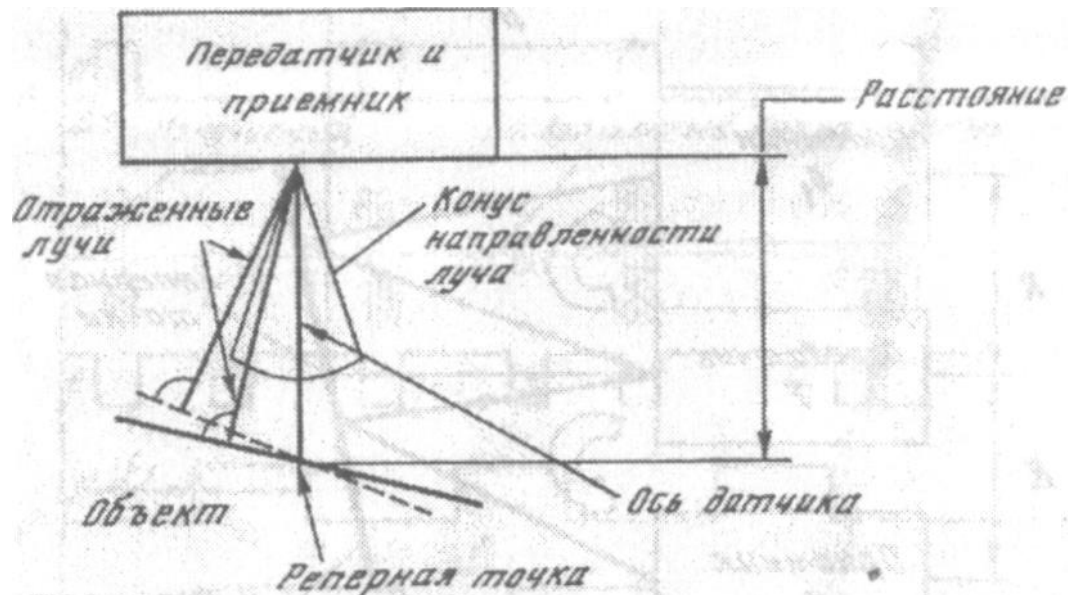


Рис. 2,3.17. Метод измерения расстояния до наклонной поверхности

Разрешающая способность и точность измерения ультразвуковыми ИИС в значительной степени зависят от ширины конуса диаграммы направленности: чем уже конус, тем выше качество датчика.

Пневматические ИИС роботов. В составе мобильных роботов, действующих в экстремальных средах, в которых имеется высокая температура, повышенный уровень электромагнитных или иных помех, взрывоопасность, загазованность, повышенная радиационная или химическая опасность, изменение плотности окружающей среды или ее прозрачности, могут применяться пневматические струйные системы измерения, отличающиеся простотой, надежностью и долговечностью. Например, использование таких ИИС целесообразно в мобильных работах, предназначенных для выполнения операций при пожарах [160], в условиях загрязнения прибрежных вод шельфа морей [108, 197], во взрывоопасных ситуациях, в авиационно-космической технике [140, 196]. В пневматических преобразователях некоторый физический параметр преобразуется в потенциальные или частотные сигналы

избыточных давлений и расходов питающего потока газа или воздуха. Обладая рядом преимуществ, устройства струйной техники несколько уступают по быстродействию, потребляемой и выходной мощности, дальности действия по сравнению с электрическими, электронными и ультразвуковыми устройствами. Вместе с тем при использовании различных методов преобразования информации пневматические системы могут успешно применяться в локационном, тактильном и сило-моментном осязании, для измерения таких параметров, как угловые и линейные малые перемещения, расстояния до объектов в малой зоне, скорости, ускорения, усилия, давления, температуры [20, 45, 88]. В зависимости от требуемых параметров могут быть достигнуты следующие характеристики пневматических струйных ИИС роботов:

- быстродействие ограничивается временами порядка 10^{-3} с,
- выходная мощность порядка 10^{-1} Вт,
- линейное перемещение в ближней рабочей зоне до 6 мм с минимальной погрешностью 0,5%, наилучшая чувствительность 200 Па/мкм,
- усилия от 0,1 до 10^{-3} Н, погрешность 2–5%, быстродействие 0,2 м;
- температура, диапазон 10 – 1000 °С (в зависимости от температуростойкости материала, из которого изготовлены струйные сопла), погрешность до 2 – 5%, быстродействие 20 – 30 с, чувствительность от 1 до 10 °С;
- давление, диапазон до 10 МПа, погрешность 2–5%, быстродействие $2 \cdot 10^{-1}$ с, чувствительность 0,05 МПа.

Практическое применение пневматических струйных систем в нашей стране и в зарубежных странах отражено, например, в работах [99, 136, 182], где приведены контролируемые параметры, используемые эффекты, технические характеристики и схемы контроля.

Рассмотрим одну из пневматических наиболее распространенных схем измерения малых расстояний и перемещений (рис. 2.3.18) в ближней зоне движения робота посредством прикрытия сопла заслонкой при перемещении заслонки или выходного сопла в направлении x , перпендикулярно к его горлу.

В этой системе линейное перемещение преобразуется в изменение давления P_v на выходе в результате прикрытия вытекающей турбулентной или ламинарной струи заслонкой по мере ее приближения к торцу сопла.

В целях расширения функциональных возможностей измерительная система сделана двухканальной (рис. 2.3.19). Она состоит из двух элементов - 4, 5; 6, 8 -

"сопло-заслонка", настроечных сопротивлений - 1, 2, 3 и анемометров - 7, преобразующих скорость потока в электрические сигналы. Сопротивления настройки 1, 2, 3 и сопротивления в зазорах между соплами 4, 5 и заслонками 6, 8 образуют пневматический мостик, в диагонали которого включено сопротивление 2. В качестве эталонного сопротивления, настроенного на определенное расстояние, может использоваться одно из сопротивлений "сопло-заслонка", например 4,6. Сопротивление 2 переменное и регулируемое в широких пределах. Если сопротивление 2 бесконечно, то оба канала не связаны между собой и работают независимо; P_0 , P_{B1} , P_{B2} - со-

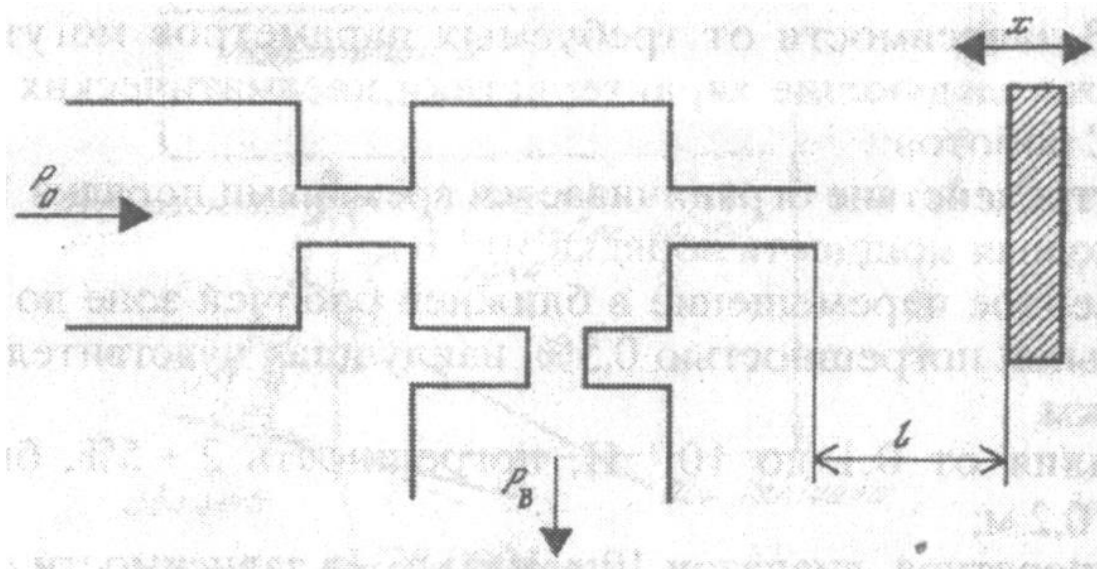


Рис. 2.3.18, Измерение малых перемещений пневматическим методом "сопло-заслонка" в ближней зоне

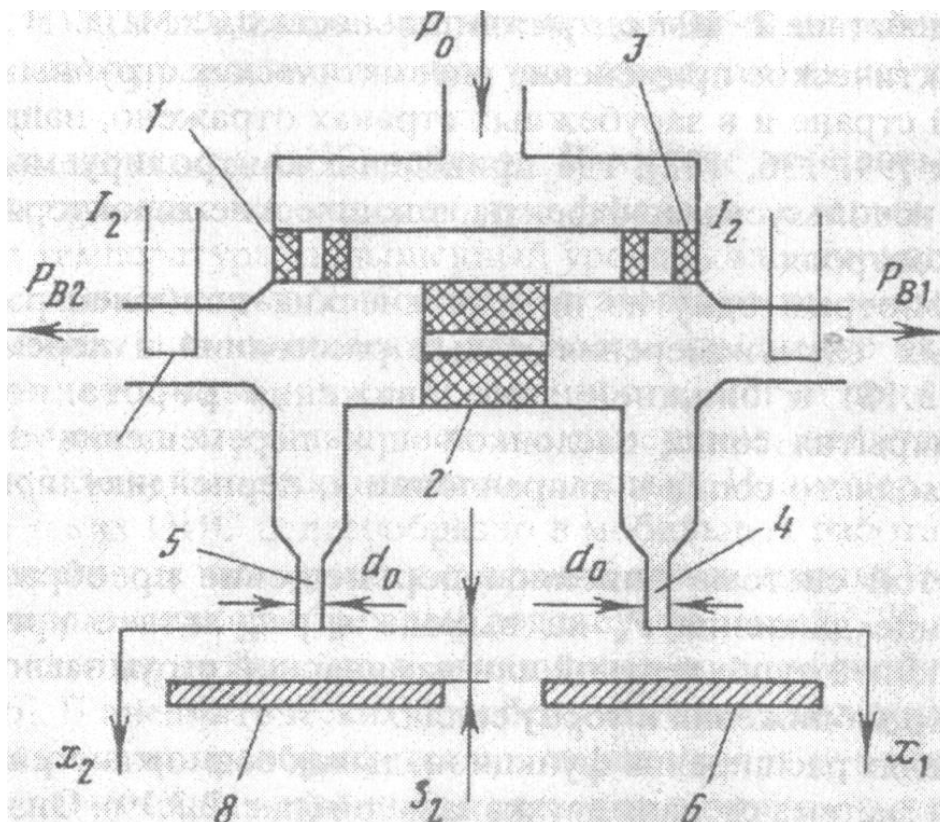


Рис. 2.3.19. Измерение малых перемещений методом пневматического моста

ответственно давления питания и на выходе. Вид зависимости безразмерного давления P_{B1}/P_0 и безразмерного перепада давления $\Delta P/P_0 = (P_{B2} - P_{B1})/P_0$ от расстояния x_1 , положения заслонки 6 относительно сопла 4 получен как при полностью закрытом втором сопле 5 заслонкой 8 (случай $S_2 = 0$), так и для промежуточных значений $S_2 = 0,1d_0$ и $S_2 = 0,5d_0$ (рис. 2.3.20, график 1). Погрешность измерений составляет 1 – 1,5% от шкалы,

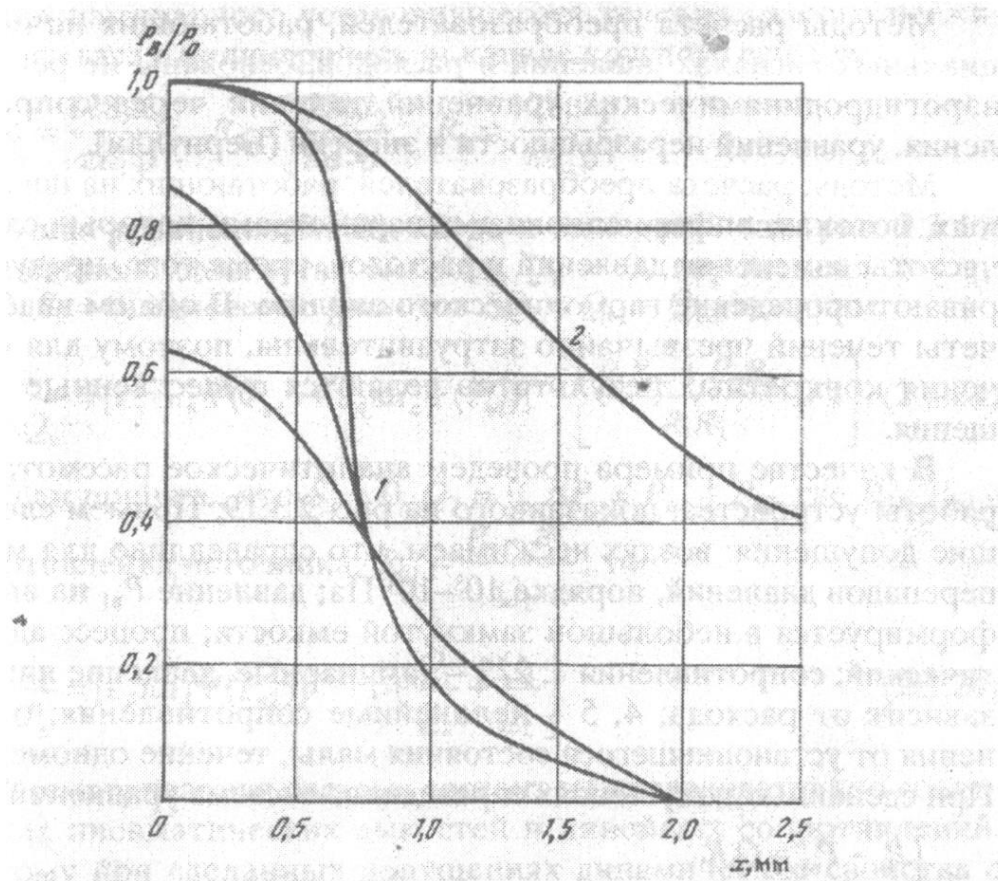


Рис. 2.3.20. Измерение расстояний пневматическим методом

время переходного процесса - 0,01 с, диапазон давлений питания - 0,01-5-0,1 МПа. Для повышения дальности действия на внутренней поверхности сопла 2 выполнена спиралевидная винтовая канавка для закрутки потока и придания ему формы кольцевого вихря. Дальность действия повышалась в 3-5 раз (рис. 2.3.20, кривая 2).

Рассмотренные выше основные схемы первичных преобразователей, использующие свойства струйных течений, состоят из отдельных типовых элементов - ламинарных и турбулентных пневматических сопротивлений, проточных и замкнутых емкостей, функциональных струйных модулей, механических подвижных элементов и коммутационных каналов. Расчет параметров чувствительных элементов струйной автоматики был рассмотрен в [89] и ряде других работ.

Аналитическое рассмотрение схем пневматических измерителей предусматривает использование как потенциальных сигналов давлений и расходов, так и построенных на частотных преобразованиях сигналов переменных потоков (токов).

Методы расчета преобразователей, работающих на потенциальных сигналах давлений и расходов, основаны на решении аэрогидродинамических уравнений течений через сопротивления, уравнений неразрывности и энергии (Бернулли).

Методы расчета преобразователей, работающих на переменных потоках, информационными параметрами которых служат частоты изменения давлений и расходов, кроме того, предусматривают проведение гармонического анализа. В общем виде расчеты течений чрезвычайно затруднительны, поэтому для получения конкретных результатов делаются существенные допущения.

В качестве примера проведем аналитическое рассмотрение работы устройства, показанного на рис. 2.3.19. Примем следующие допущения: воздух несжимаем, что справедливо для малых перепадов давлений, порядка 10^3 - 10^4 Па; давление $P_{в1}$ на выходе формируется в небольшой замкнутой емкости; процесс адиабатический; сопротивления 1, 2, 3 - ламинарные, давление линейно зависит от расхода; 4, 5 - нелинейные сопротивления; отклонения от установившегося состояния малы, течение одномерное. При сделанных допущениях справедлива система уравнений

$$\begin{cases} P_0 - P_{в1} = Q_1 R_1 \\ P_0 - P_{в2} = Q_3 R_3 \\ P_{в1} P_{в2} = Q_2 R_2 \\ Q_4 = \varepsilon_4 \pi d_4 x_1 \cdot \psi(P_{в1}) \\ Q_5 = \varepsilon_5 \pi d_5 x_2 \cdot \psi(P_{в2}) \\ Q_1 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_7. \end{cases} \quad (2.3.22)$$

Первые три уравнения системы определяют расходы через сопротивления 1, 2, 3 в зависимости от перепадов давлений; уравнения 4 и 5 определяют истечение через сопротивления 4, 5 типа "сопло-заслонка", уравнение 6 – неразрывности потока; $Q_1 \div Q_7$ – массовые расходы через сопротивления 1–7; P_0 , P_a – давления питания и атмосферное; $P_{в1}$, $P_{в2}$ – давление на выходе в замкнутых емкостях; R_1 , R_2 , R_3 – линейные пневматические сопротивления; x , x_1 , x_2 – перемещения заслонок, отсчитываемые от значений $x = 0$; $\psi(P_{в1})$, $\psi(P_{в2})$ – нелинейные сопротивления, при турбулентном установившемся течении $\psi(P_{в1}) = [\rho(P_{в1} - P_a)]^{1/2}$, линеаризуемые в виде ряда; $d_1 \div d_5$ – диаметры пневматических дросселей-сопротивлений, l_1 , l_2 , l_3 – их длины; ε_4 , ε_5 – коэффициенты расхода; ρ – плотность; μ – динамический коэффициент вязкости воздуха.

Для ламинарного установившегося течения вязкого несжимаемого газа в цилиндрическом канале круглого сечения

$$R_1 = \frac{128\mu l_1}{\pi d_1^2 \rho}; \quad R_2 = \frac{128\mu l_2}{\pi d_2^2 \rho}; \quad R_3 = \frac{128\mu l_3}{\pi d_3^2 \rho}.$$

Решая уравнения 2.3.22, когда к выходам 7 (см. рис. 2.3.19) присоединена замкнутая емкость, $Q_7 = 0$, переменная $x = x_1$, $x_2 = 0$, $S_2 = 0$, изменение расходов $\Delta Q_v = Q_{v1} - Q_{v2}$, получим:

$$\frac{x}{\Delta Q_v} = [\varepsilon_5 \pi d_5 \Psi(P_{v2}) + \varepsilon_4 \pi d_4 \Psi(P_{v1})]^{-1} \cdot \left[\frac{R_1 R_{01} + R_3 R_{02}}{R_1 R_3} + 1 \right] \quad (2.3.23)$$

Если принять, что $S_2 = 0$, $Q_7 = 0$, $\Delta P_v = P_{v1} - P_{v2}$, где R_{01} , R_{02} – сопротивления источника, $R_{01} = \frac{P_0 - P_{v1}}{Q_2}$, то

$$\frac{x}{\Delta P_v} = [\varepsilon_4 \pi d_4 \Psi(P_{v2})]^{-1} \cdot \left[1 + \frac{Q_1}{Q_2} + \frac{Q_3}{Q_2} \right]. \quad (2.3.24)$$

Рассматриваемая система состоит из последовательно соединенных пневматических емкостей и линейных сопротивлений. Поэтому при сделанных допущениях динамические свойства с достаточной точностью описываются линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Так, поведение системы (рис. 2.3.19), состоящей только из сопротивлений R_1 , R_5 , R_2 и емкостей C – одной проточной, ограниченной перечисленными сопротивлениями, второй замкнутой и присоединенной к выходу 7 с давлением P_{v1} , подчиняется уравнению второго порядка. После приведения уравнения к каноническому виду, получим

$$\frac{d^2 P_{v1}}{dt^2} + 2\xi \frac{1}{\tau} \frac{dP_{v1}}{dt} + \frac{1}{\tau^2} P_{v1} = P[x(t)] \quad (2.3.25)$$

В уравнении (2.3.25) постоянная времени $\tau = \left(\frac{LC}{1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_5}} \right)^{1/2}$,

коэффициент демпфирования $\xi = \frac{\frac{L}{R_1} + \frac{L}{R_5} + R_2 C}{2 \left[LC \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_5} \right) \right]^{1/2}}$.

Таблица 2.3.2

Значения пневматических сопротивлений, емкостей и индуктивностей

Наименование	Определение	Q (объемный расход)
		Формула
Активное сопротивление канала длиной l	$R = \frac{\Delta P}{Q}$	$\frac{8\pi\nu}{s^2} \cdot l$
Струйная индуктивность канала длиной l	$L = \frac{\Delta P}{\frac{\partial Q}{\partial t}}$	$\frac{1}{s} \cdot l$
Струйная емкость (адиабатическая)	$C = \frac{Q}{\frac{\partial P}{\partial t}} \bigg _{\substack{v=c \\ v=\text{const}}}$	$\frac{V \cdot \rho}{kP} = \frac{V}{a^2}$
Индуктивное сопротивление	$Z_l = j\omega l$	$j \frac{\omega}{s} \cdot l$
Емкостное сопротивление	$Z_c = -j \frac{1}{\omega c}$	$-j \frac{k\omega^{-1}P}{V \cdot \rho}$
Импеданс линии круглого сечения (продольное сопротивление единицы длины)	$Z = -\frac{\frac{\partial Q}{\partial x}}{Q}$	$\frac{j\omega}{s} \left\{ 1 - j \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right) \right\}^{-1}$
$j \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right) \equiv \frac{1 + j \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right)^2 - \frac{1}{18} j \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right)^3 + \frac{1}{180} \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right)^4}{1 + 2j \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right) - \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right)^2 - \frac{2}{9} j \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right)^3 + \frac{1}{36} \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right)^4}; \quad \omega_v = \frac{8\pi\nu}{s}$		

Q (объемный расход)	$Q_{об}$ (массовый расход)	
Размерность	Формула	Размерность
$[l^{-1}T^{-1}]$ [м ⁻¹ с ⁻¹ = Па с/кг]	$\frac{8\pi\mu}{s^2} \cdot l$	$[l^{-4}mT^{-1}]$ [кг м ⁻⁴ с ⁻¹ = Па с/м ³]
$[l^{-1}]$ [м ⁻¹ = Па с ² /кг]	$\frac{\rho}{s} \cdot l$	$[l^{-4}m]$ [кг м ⁻⁴ = Па с ² /м ³]
$[lT^2]$ [мс ² = кг/Па]	$\frac{V}{kP} = \frac{V}{\rho a^2}$	$[l^4m^{-1}c^2]$ [кг ⁻¹ м ⁴ с ² = м ³ /Па]
$[l^{-1}T^{-1}]$ [м ⁻¹ с ⁻¹]	$j \frac{\omega \cdot \rho}{s} \cdot l$	$[l^{-4}mT^{-1}]$ [кг м ⁻⁴ с ⁻¹]
$[l^{-1}T^{-1}]$ [м ⁻¹ с ⁻¹]	$-j \frac{k\omega^{-1}p}{V}$	$[l^{-4}mT^{-1}]$ [кг м ⁻⁴ с ⁻¹]
$[m^{-2}c^{-1}]$	$\frac{j\omega p}{s} \left\{ 1 - j \left(\frac{\omega}{\omega_v} \right) \right\}^{-1}$	$[кг м^{-3}с^{-1}]$

$$\text{Если } x = 0, \text{ то } R_3 \rightarrow \infty, \frac{R_2}{R_3} \rightarrow 0 \text{ и } \xi = \frac{\frac{L}{R_1} + R_2 C}{2 \left[LC \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right]^{1/2}}.$$

Значения пневматических сопротивлений, емкостей и индуктивностей, полученные методом аналогий с электрическими цепями, приведены в табл. 2.3.2.

Уравнение (2.3.25) было получено при начальных условиях при $t = 0$, $P_{в1} = P_0$, $\dot{P}_{в1} = 0$ и при определенных ограничениях на внешнее воздействие. Решая уравнение (2.3.25), найдем изменение давления в рассматриваемой системе, которое происходит по следующему закону:

$$P_{в1} = \frac{P_0 \cdot e^{-\xi \frac{t}{\tau}}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \cdot \cos\left(\frac{t}{\tau} \sqrt{1 - \xi^2} - \varphi\right) + P(t), \quad (2.3.26)$$

где $\varphi = \arcsin \sqrt{1 - \xi^2}$; $P(t)$ – частное решение уравнения (2.3.25), которое найдено для двух случаев:

а) релейного ступенчатого перемещения заслонки до закрытия сопла, когда при $t = 0$, $P(t) = 0$; при $t > 0$, $P(t) = \tau^2 \cdot P_0$,

б) перемещения заслонки во времени по линейному закону, когда с $t = 0$ начала движения к моменту времени $t = t_1$, $x = 0$.

В этом случае частное решение при $t_1 \geq t > 0$

$$P(t) = \frac{P_0}{t_1} \tau^2 \cdot (t - 2\xi\tau),$$

а при $t > t_1$, $P(t) = \tau_2 \cdot P_0$.

На динамические характеристики пневматических систем значительное влияние оказывает инерционность в передаче сигналов по каналам. В пневмоавтоматике обычно при малых частотах, измеряемых десятками герц, и малых длинах, до нескольких метров, *динамические свойства каналов принято характеризовать последовательным соединением звеньев чистого запаздывания и апериодического*. В робототехнических системах частоты информационных сигналов могут быть значительно больше, поэтому влияние пневматических емкостей и индуктивностей необходимо учитывать и при малых длинах каналов.

4. Технологическое оборудование и манипуляторы МРПП

Особенности использования технологического оборудования и манипуляторов в составе МРПП. Ранее были рассмотрены различные транспортно-механические системы МРПП, представляющие из себя, как правило, универсальное шасси, на котором устанавливается технологическое оборудование и/или манипулятор. Однако использование технологического оборудования в составе МРПП имеет ряд особенностей по сравнению, например, с мобильными роботами горизонтального перемещения или РВП [26].

Первой особенностью использования технологического оборудования в составе МРПП является то, что движения исполнительных элементов технологического оборудования могут осуществляться за счет собственно движения приводов транспортно-механической системы. Это предъявляет дополнительные требования к системам приводов МРПП, главным образом по точности, отсутствию люфтов и неравномерностей движения.

Вторая особенность заключается в вопросе о месте расположения технологического оборудования и ориентации его исполнительного элемента, поскольку она может меняться после перехода с одной поверхности на другую. Это наиболее характерно для двухмодульных МРПП. Например, манипулятор может располагаться сбоку, вдоль корпуса МРПП, так как его расположение по оси симметрии корпуса робота затруднительно из-за наличия узла соединения платформ. На рис. 2.4.1 показано возможное положение манипулятора на борту двухмодульного МРПП, а на рис. 2.4.2 - его положение до и после перехода с горизонтальной поверхности на вертикальную. Восстановление нужной ориентации возможно либо вращением корпуса МРПП вокруг своей оси, либо вращением манипулятора на 180° .

Третьей особенностью для не автономных МРПП является расположение и сложность узла подводки соединительных кабелей. При переходе с поверхности на поверхность должны быть исключены его нахлесты и перекручивания.

Может быть два варианта размещения технологического оборудования на борту МРПП:

- частичное, когда на борту размещается только исполнительный элемент технологического оборудования, например краскораспылитель, а резервуар с расходными материалами находится вне МРПП;
- полное, когда и исполнительные элементы и резервуары находятся на борту МРПП.

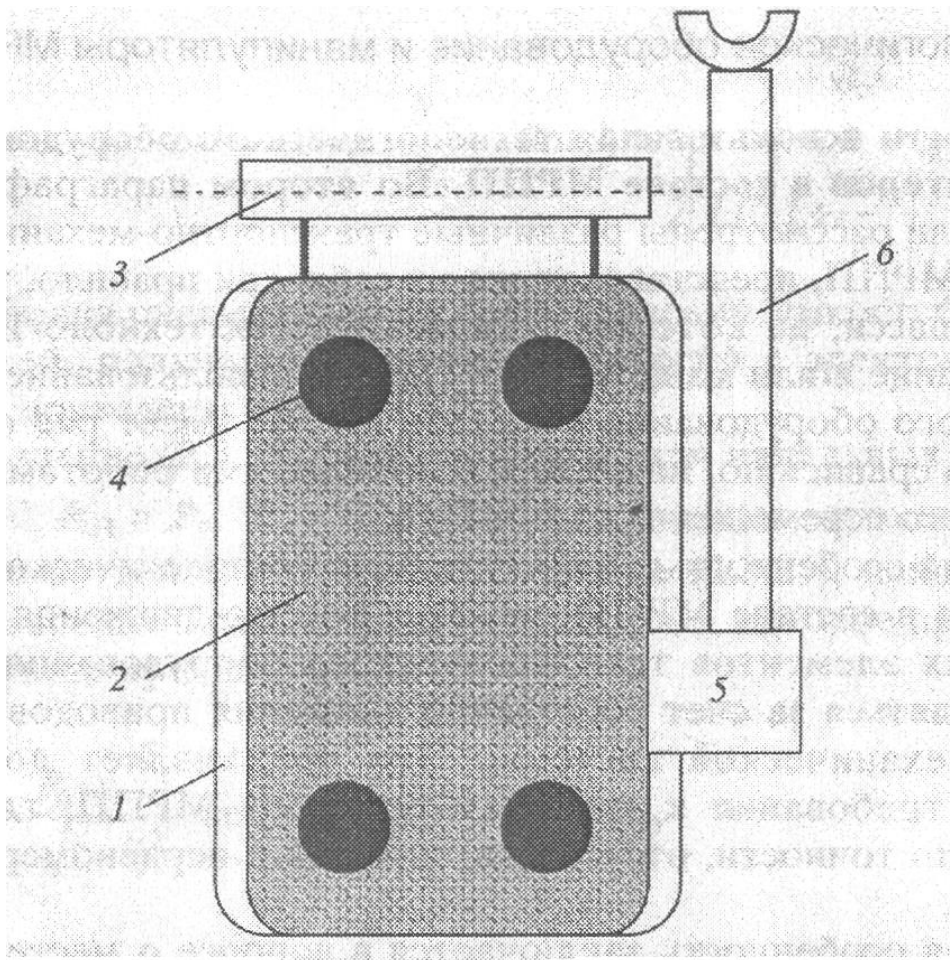


Рис. 2.4.1. Вариант размещения исполнительного устройства на борту МРПП

1 - нижняя транспортная платформа; 2 - верхняя транспортная платформа; 3 - узел соединения платформ; 4 - захватное устройство; 5 - блок приводов манипулятора; 6 - стрела манипулятора

Оба варианта имеют свои достоинства и недостатки. В первом случае время работы всего комплекса велико, но зона достижимости ограничена большим количеством соединительных кабелей, снижающих общую грузоподъемность МРПП. Во втором случае зона достижимости увеличивается, но время работы ограничено емкостью резервуаров расходных материалов. Этот вариант более подходит для небольших ремонтных работ.

Основные технологические операции, выполняемые МРПП. Современные МРПП используются для решения следующих основных задач:

Осмотр и инспекция поверхностей и объектов. Для выполнения этой задачи МРПП оснащаются видеокамерами, средствами неразрушающего контроля, системами мониторинга окружающей среды для выявления, например, степени радиоактивного заражения, утечки вредных химических веществ и т.п. Для основных

движений перечисленного технологического оборудования может быть достаточно только приводных систем МРПП.

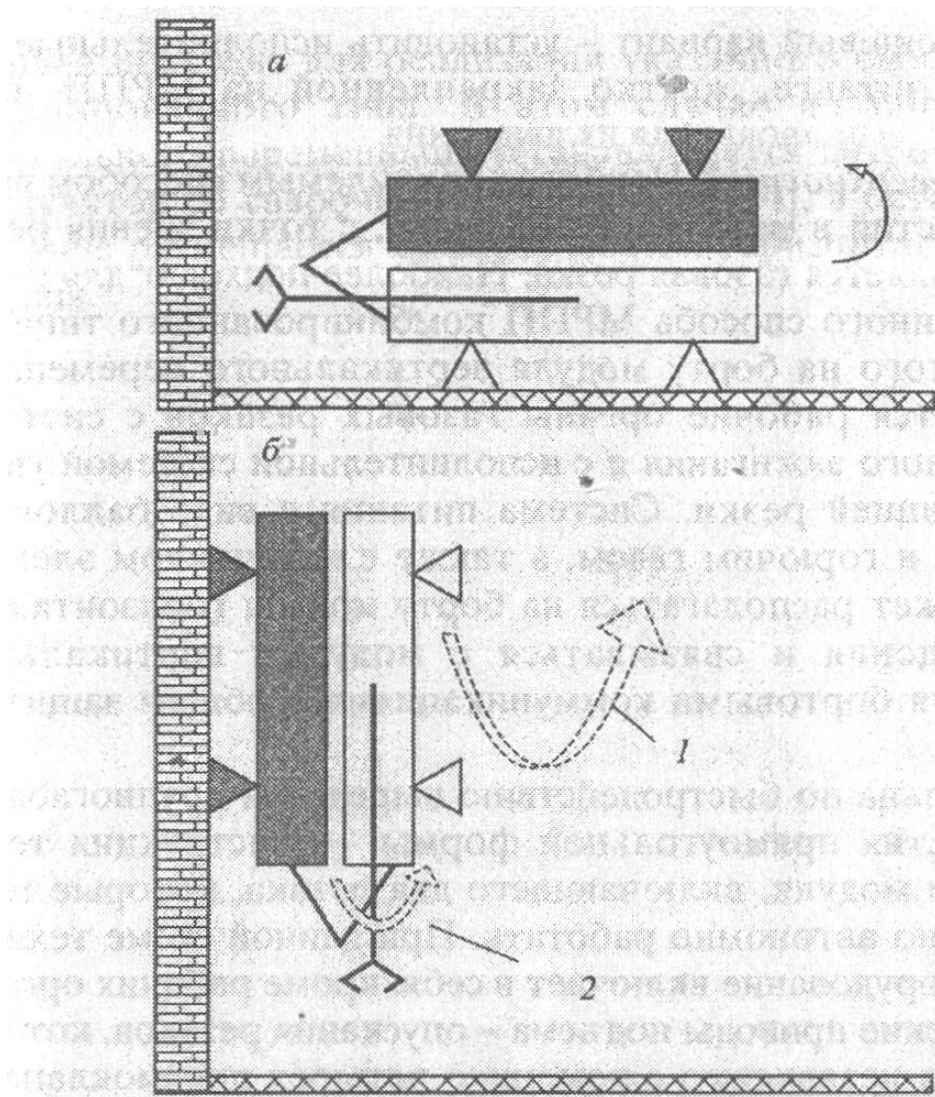


Рис. 2.4.2. Изменение ориентации манипулятора МРПП при переходе с горизонтальной на вертикальную поверхность и способы восстановления ориентации
а - разворотом корпуса МРПП; б - вращением манипулятора

Очистка поверхностей, дезактивация. МРПП оснащаются шлифовальным инструментом, системой пескоструйной очистки, щетками для удаления слоя, например ржавчины или старой краски, щетками с подачей моющего раствора (мойка стекол, дезактивация). При этом требуются дополнительные приводные системы, например, для вращения инструмента.

Окраска, заделывание трещин, швов. Применяются автоматические дистанционно управляемые краскораспылители, дозаторы, устройства для нанесения герметика. Перечисленные устройства могут быть установлены на бортовом манипуляторе МРПП - в этом случае приводная система МРПП используется только для удержания на поверхности, а все движения инструмента осуществляются за счет

собственных приводов манипулятора, и процесс нанесения покрытий такой же, как в промышленных робототехнических комплексах [5, 1, 26]. Более простой и дешевый вариант - установить исполнительные устройства на штанге, жестко закрепленной на МРПП, и использовать его приводы для их движения.

Резка поверхностей. Наиболее приемлемым способом вырезания отверстий в металлической стене, с точки зрения реализуемости, является газовая резка. Наиболее подходят для реализации указанного способа МРПП комбинированного типа. Для этого на борту модуля вертикального перемещения располагаются рабочие органы газовых резаков с системой дистанционного зажигания и с исполнительной системой управления операцией резки. Система питания в виде баллонов с кислородом и горючим газом, а также с источником электропитания может располагаться на борту модуля горизонтального перемещения и связываться с модулем вертикального перемещения бортовыми коммуникациями в общем защитном кожухе.

Оптимальна по быстродействию вырезания крупногабаритного отверстия прямоугольной формы - конструкция технологического модуля, включающего два резака, которые могут одновременно автономно работать. При данной схеме технологическое оборудование включает в себя, кроме рабочих органов, пневматические приводы подъема - опускания резаков, которые управляются независимо с помощью четырех пневмоклапанов. Каждый резак, в свою очередь, имеет по четыре электромагнитных малогабаритных газовых клапана, через которые подаются рабочие газы в резак, и пропан-воздушную горелку. Технологический модуль имеет систему дистанционного поджига, позволяющую зажигать резаки в автоматическом режиме и с пульта управления.

Используемый резак с внутрисопловым смешиванием рабочих газов имеет шлицевые мундштуки, обеспечивающие гарантированную резку малоуглеродистых сталей в диапазоне толщин от 5 до 20 мм. В качестве горючего газа приметаются пропан-бутан. Для обеспечения процесса резки давление на входе резака должно быть не ниже: пропан-бутана - 0,05 МПа; кислорода - 0,5 МПа. На резаке установлена шлицевая фор-камера (зазор между торцом внутреннего и внешнего мундштуков) в 1-1,5 мм, которая не позволяет ему гаснуть при нежелательных касаниях поверхности. На консоли смонтирован ограничительный упор с подпружиненным роликом, вращающийся вокруг своей оси, который ограничивает колебания консоли с резаком при перемещении робота.

Сварка. Выполнение сварочных работ с помощью МРПП представляется наиболее сложной задачей. Как и для резки, наиболее подходят для реализации указанного способа МРПП комбинированного типа. В этом случае на борту модуля вертикального перемещения устанавливается антропоморфный манипулятор со сварочной горелкой [21, 24], а остальное оборудование размещается на борту модуля горизонтального перемещения.

Лекция

Тема 3.3.3. Принципы управления мобильными роботами повышенной проходимости

ВОПРОСЫ

1. Архитектура систем управления мобильными роботами повышенной проходимости.
2. Кинематические соотношения при различном взаимном расположении бортового манипулятора и датчика информационно-измерительной системы.
3. Управление на основе информации о силовом воздействии.
4. Применение компьютерного моделирования для анализа и управления многозвенными роботами повышенной проходимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Градецкий В.Г. и др. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука. 2001, 360 с. (96-172).

1. Архитектура систем управления мобильными роботами повышенной проходимости

Иерархическое управление. Наилучшим для работы в экстремальных условиях был бы полностью автономный МРПП, допускающий в то же время вмеша-

тельство человека-оператора на любом уровне управления. Обеспечить работу такого робота может специальный интерфейс телеоператора, поддерживающий переход от телеуправления к полной автономности. Подобная общая концепция иерархического управления роботом предложена в [138. 150), схема архитектуры которой приведена на рис. 3.1.1 [120, 183].

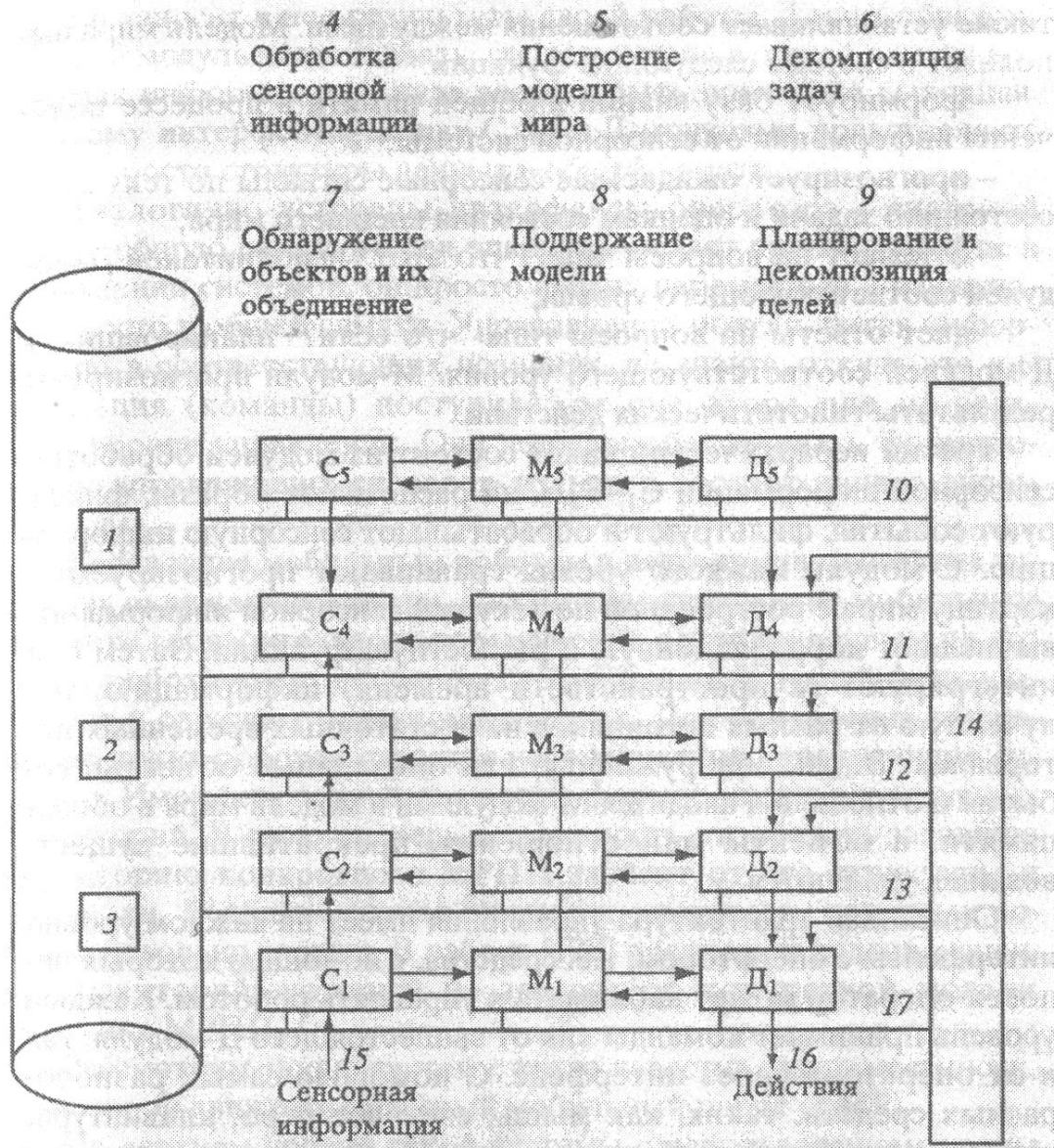


Рис. 3.1,1. Система иерархического управления роботом

1 - общая память; 2 - карты, списки объектов, переменные состояния; 3 - программные файлы; 4-9 объяснены на рисунке; 10 - рабочая станция; 11 ~ задача; 12 - элементарная операция; 13 - элементарное движение робота; 14 - интерфейс с оператором; 15-16 объяснены на рисунке; 17 -преобразование координат, сервоуправление

Архитектура системы управления организована в виде трех иерархических пакетов вычислительных модулей, объединенных системой связи и общей памятью 1, 2, 3. Модули декомпозиции задач 6 выполняют в реальном масштабе времени функции планирования, решения задач и декомпозицию задач на пространственные и временное последовательности. Модули обработки сенсорной информации 4 обрабатывают сенсорную информацию средствами фильтрации, корреляционного анализа, обнаружения объектов и их объединения в картины. Модули построения модели мира 5 отвечают на запросы, выполняют прогнозирование и вычисляют функции переменных состояния, определяемых на основе информации, хранящейся в общей памяти, которая по существу выступает в роли базы данных, где хранятся наилучшие оценки состояния внешней среды.

Первый иерархический пакет состоит из модулей декомпозиции задач D_1 - D_5 , которые планируют и осуществляют декомпозиции целей верхнего уровня в действия нижнего уровня. Д-модуль каждого уровня состоит из распределителя работ планировщиков и исполнителей. Второй иерархический пакет состоит из модулей моделирования мира M_1 - M_5 , который моделирует (запоминает, оценивает, прогнозирует) и вычисляет состояние системы и внешней среды. Модель мира представляет собой наилучшую оценку текущего и будущего; состояний внешнего, по отношению к управляемой системе, мира и ее самой. Модель мира включает модули M и базу знаний, хранящуюся в общей памяти, и содержит карты, списки объектов и событий, а также устанавливает соотношения между ними. Модель мира выполняет в системе следующие функции:

- формирует базу знаний в общей памяти в процессе получения информации от сенсорной системы;
- прогнозирует ожидаемые сенсорные сигналы по текущему состоянию задачи и оценкам состояния внешнего мира;
- отвечает на вопросы типа "что это?" исполнителей Д-модулей соответствующего уровня;
- дает ответы на вопросы типа "что если?" планировщиков Д-модулей соответствующего уровня. М-модули прогнозируют результаты гипотетических действий.

Третий иерархический пакет состоит из модулей обработки сенсорной информации S_1 - S_5 . Они распознают образы, фиксируют события, фильтруют и обрабатывают сенсорную информацию. С-модули каждого уровня сравнивают прогно-

зируемую картину мира с построенной по текущей сенсорной информации, вычисляют корреляционную и разностную функции. Затем они интегрируют (в пространстве и времени) информацию, полученную от разных источников на достаточных временных интервалах. Вновь обнаруженные или опознанные объекты, события и отношения вводятся М-модулями в модель мира в общей памяти, а объекты или отношения, прекратившие существование, удаляются.

Описанная архитектура управления имеет на каждом уровне интерфейсы с оператором, т.е. средства, с помощью которых человек-оператор может наблюдать и управлять роботом. Каждый уровень принимает команды как от вышестоящего Д-модуля, так и от оператора через интерфейс. С помощью самых разнообразных средств, таких, как мышь, световое перо, клавиатура, рукоятка управления, обычная речь, человек-оператор может в любое время вмешаться в процесс управления на любом уровне, например, ввести дополнительную информацию, прервать автоматическое выполнение операции, взять управление на себя или использовать свой интеллект для обработки сенсорной информации и построения модели мира. При этом совсем не обязательно, чтобы в каждый момент времени все функции управления на выбранном уровне выполнялись либо оператором, либо автоматически. Например, человек-оператор может заниматься ориентацией камеры, в то время как ее программное перемещение в пространстве будет выполняться автоматически.

Одной из главных функций общей памяти является обеспечение тесной связи между модулями. Каждый модуль обработки сенсорной информации, построения картины мира и декомпозиции задач непосредственно читает информацию из общей памяти и заносит в нее результаты своей работы. Таким образом, каждый модуль должен знать, где размещена в общей памяти его входная информация, и куда должна быть помещена выходная. Поэтому интерфейсы между С, М и Д-модулями представляют собой просто структуры данных в общей памяти.

Аналогично устроены интерфейсы оператора с системой (через общую память). Если оператор желает принять участие в управлении системой, он просто вводит переменные в надлежащее место в общей памяти. Управляющие модули, читая информацию в соответствующих позициях, не знают, откуда эта информация (команды) поступила: от оператора или от верхнего уровня управления. Они должны обеспечивать формирование управляющих сигналов только в соответствии с типом команды.

Управление мобильным роботом в недетерминированных условиях окружающей среды. Рассмотрим управление мобильным роботом горизонтального перемещения с установленным на его борту роботом вертикального перемещения, который функционирует в сложных незнакомых средах. Для управления движениями таких роботов строятся иерархические управляющие системы. Имеются различные методы формирования реализуемых траекторий. В свою очередь, возможность отработать заданную траекторию конкретного МРПП зависит от его структуры и динамики. В общем случае динамика, например, колесных роботов довольно сложна. В работе [120] предложен подход к оценке траекторий, который не зависит от конкретной модели динамики МРПП.

Рассмотрим такую систему, когда известна карта местности, по которой движется колесный мобильный робот (КМР).

На верхнем уровне такой системы с использованием карты окружающей местности планируется путь КМР без столкновений с препятствиями. Затем этому пути ставится в соответствие некоторый профиль скорости, в результате чего задается желаемая траектория в системе координат мира робота. Сформированная траектория поступает на нижний уровень управления, который непосредственно определяет команды на сервоприводы руля и колес КМР.

Реализуемость траектории зависит от ограничений на силы трения колес при соответствующей геометрии пути. Блок-схема такой системы может быть представлена на рис. 3.1.2. Предполагается, что блок планирования пути формирует двумерный путь движения центра масс КМР в инерциальной системе декартовых координат или некоторой эквивалентной системе координат в окружающей среде. Реализуемость этого пути оцени-

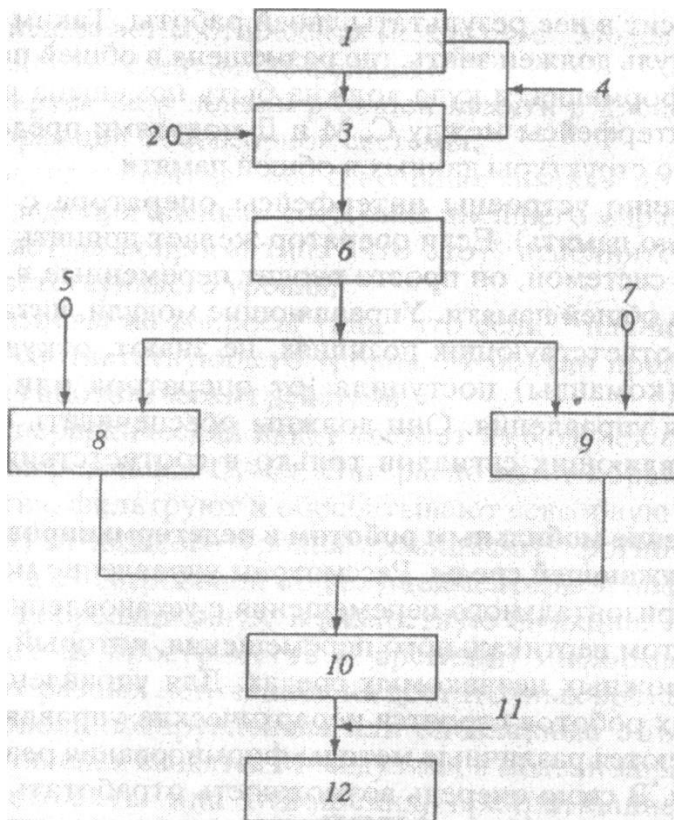


Рис. 3.1.2. Блок-схема алгоритма оценки траектории движения робота

1 - планирование пути; 2 - путевые ограничения; 3 - оцениваемые пути; 4 - нереализуемый путь;

5 - кинематические ограничения; 6 - формирование траектории; 7 - динамические ограничения; 8 - кинематическое оценивание; 9 - динамическое оценивание; 10 - масштабирование времени; 11 - реализуемая траектория; 12 - система управления КМР в реальном времени

вают с использованием путевых ограничений, связанных с конфигурацией колесной базы и механизма рулевого управления КМР. Если путевые ограничения нарушены, то по данному пути пройти нельзя ни при какой скорости, т.е. необходимо планировать новый путь.

Если задан реализуемый путь, траекторию центра масс КМР формируют, ставя в соответствие этому пути желаемый профиль скорости или эквивалентную функцию. Для оценки траектории рассчитывают соответствующие кинематические переменные (скорости и ускорения). Далее решают обратную задачу динамики КМР, чтобы получить те силы трения и управляющие входные воздействия, которые потребовались бы для отработки данной траектории без проскальзывания. Как видно из рис. 3.1.2, траектория оценивается по отношению к кинематическим и динамическим ограничениям. Значения кинематических переменных сравниваются с

предельными скоростями. Требуемые входные управляющие воздействия и силы трения сравниваются с динамическими ограничениями. Если все ограничения удовлетворены, КМР может успешно отработать данную траекторию. Если же кинематические или динамические ограничения нарушены, то можно выбрать такой масштаб времени, который даст реализуемую траекторию движения вдоль этого же пути, проходимую более медленно.

Дальнейшим направлением в реализации управления является формирование оптимальных траекторий робота по путевым, кинематическим и динамическим ограничениям. Далее следуют цели верхнего уровня - навигации и обхода препятствий. В результате должна быть создана интегральная система, способная формировать реализуемые траектории. Для этого вводятся топологически структурированные базы знаний и организуется глобальное управление движением автономных мобильных роботов. Особенно остро стоит эта проблема при движении в пространстве с препятствиями произвольной конфигурации, когда необходим учет геометрических и кинематических характеристик конкретного робота, аналогичного рассматриваемому, с установленным на его борту роботом вертикального перемещения. Соответствующие модельные исследования и разработки навигационных систем были выполнены на кафедре процессов управления и регулирования технического училища в Мюнхене (ФРГ) и проверены применительно к конструкции автономного робота MACROBE [138].

На рис. 3.1.3 представлена компоновка двух роботов горизонтального и вертикального перемещения. Робот горизонтального перемещения представляет собой конструкцию на основе транспортной тележки с двумя ведущими колесами, робот вертикального перемещения снабжен вакуумными захватами для движения по наклонным и вертикальным поверхностям. Габариты робототехнического комплекса - $1,6 \times 0,6 \times 1,5$ м, максимальная скорость движения по горизонтальной поверхности - 0,5 м/с, по вертикальной поверхности - 1,5 м/мин. Минимальный радиус кривизны поворота составляет 0,5 м.

Установленная в верхней части робота система обзора позволяет просматривать пространство перед роботом в диапазоне от 0,5 до 7 м; ошибка определения расстояния не превышает 0,7 см, а разрешающая способность при получении пространственной

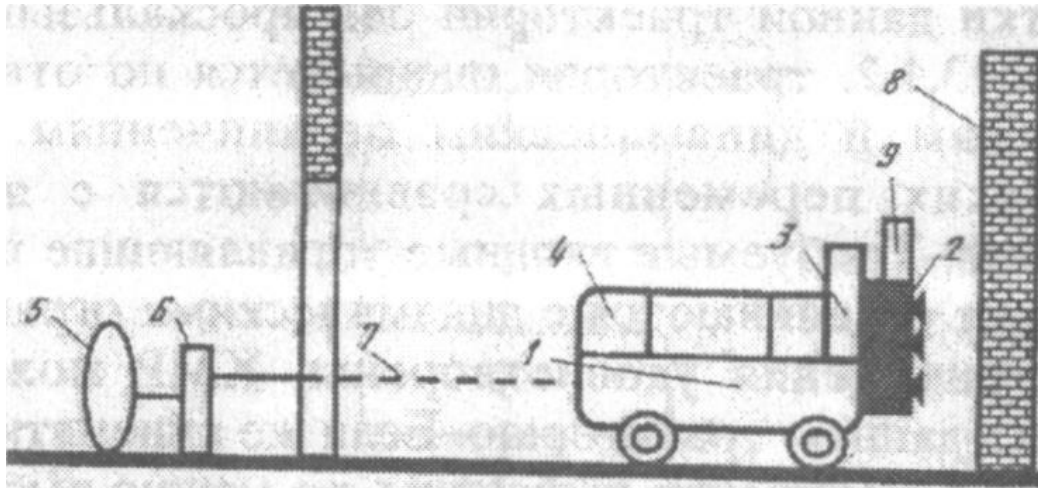


Рис. 3.1.3. Робототехнический комплекс повышенной проходимости ,
1 - робот горизонтального перемещения; 2 - робот вертикального перемещения; 3 - блок сопряжения роботов вертикального и горизонтального перемещения; 4 - блок питания; 5 - оператор; 6 - пульт управления; 7 - канал связи; *H* - поверхность обработки; 9-система наблюдения

картины позволяет получить 81 точку в каждой из 41 строки при частоте сканирования 5 кадров в секунду. Определение положения тележки внутри неподвижной декартовой системы координат осуществляется путем навигационных расчетов на основе информации от датчиков пути, связанных с ведущими колесами.

Тележка может двигаться по траекториям из отрезков прямых и дуг окружности, причем сопряжение этих участков происходит с помощью отрезков клотоиды. Максимальная ошибка в измерении расстояния на длине пути до 50 м составляет 50 см, угловая ошибка - 3° .

Система переработки информации подразделяется на три иерархически связанные подсистемы с различными требованиями к длительности цикла обработки при работе в реальном времени (см. рис. 3.1.4).

На верхнем уровне находится система глобального планирования и принятия решений, осуществляющая крупномасштабную навигацию. Она может быть дополнена системой картографирования окружающего пространства на основе изображения, получаемого от лазерной камеры.

Локальная система планирования и принятия решений выполняет задачи вождения с возможностью введения в дальнейшем отработки рефлексных реакций на внешние возмущения. Система управления тележкой обеспечивает точную реализацию основных функций, в том числе удержание на курсе при движении по

трассе. Каждая из перечисленных подсистем использует как априорные знания, так и соответствующую информацию от датчиков.

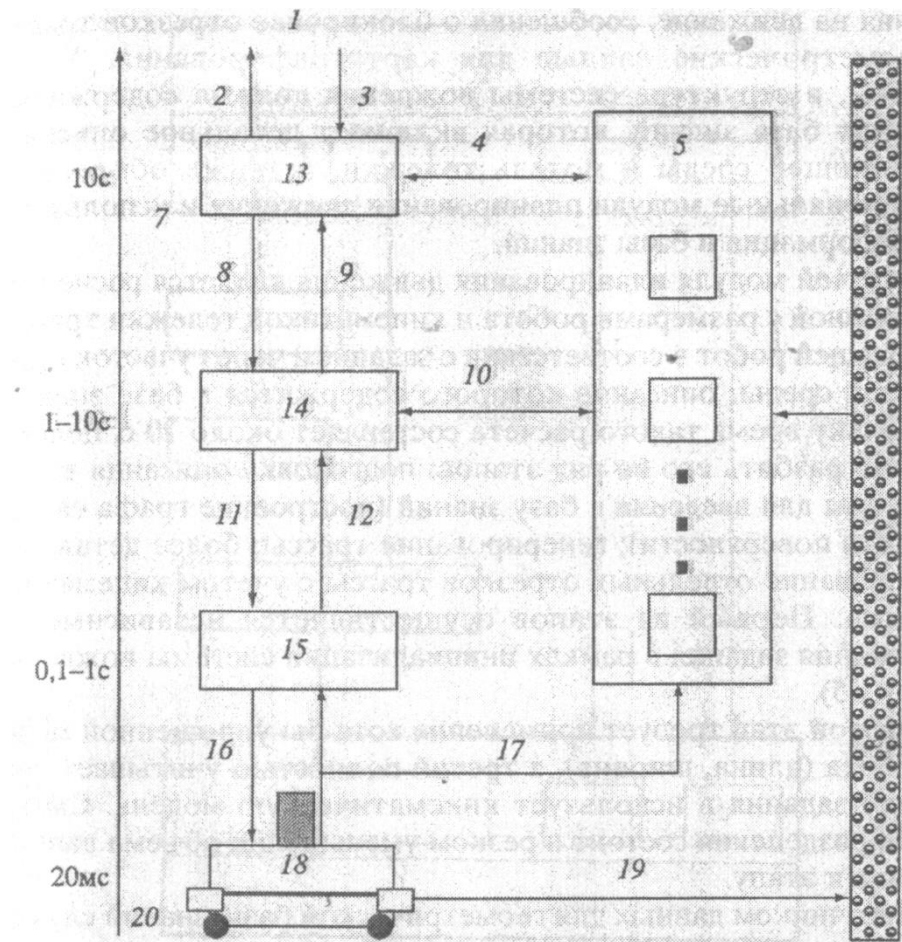


Рис. 3.1.4. Система обработки информации

1 - планирование; 2 - задание на движение; 3 - сообщение о состоянии; 4 - геометрические данные; 5 - многодатчиковая система; 6 - окружающая среда; 7- траектория движения; 8-трасса; 9-блокировка трассы; 10- информация о трассе; 11 - команда на движение; 12 - состояние тележки; 13 - навигатор; 14 - водитель; 15 - управление тележкой; 16 - управление приводом; 17 - данные о движении; 18 - тележка; 19 - движение по курсу; 20 - характерное время реакции

Система вождения осуществляет планирование траекторий в среде с известным расположением препятствий, используя при этом кинематическую модель тележки. Задание на движение определяет стартовую и целевую точки, ориентацию тележки, а также, если потребуется, ее промежуточные положения. Сама же система в ходе выполнения задания осуществляет управление и использует структурированную геометрическую базу данных (карту местности), генерирует трассы, а также реализует и корректирует эти трассы в случае блокирования каких-либо отрезков из-за препятствий. В систему должны поступать извне задания на движение,

сообщения о блокировке отрезков трассы и геометрические данные для картографирования. Таким образом, в структуре системы вождения должна содержаться основная база знаний, которая включает детальное описание окружающей среды и модель тележки, а также объединяет функциональные модули планирования движения и использования информации и базы знаний.

Задачей модуля планирования движения является расчет согласованной с размерами робота и кинематикой тележки трассы, проводящей робот в соответствии с заданием через участок окружающей среды, описание которого содержится в базе знаний. Поскольку время такого расчета составляет около 10 с, целесообразно разбить его на ряд этапов: подготовку описания внешней среды для введения в базу знаний (построение графа связей участков поверхности); генерирование трассы; более детальное планирование отдельных отрезков трассы с учетом кинематики тележки. Первый из этапов осуществляется независимо от содержания задания в рамках инициализации системы вождения (рис. 3.1.5).

Второй этап требует применения хотя бы упрощенной модели робота (длина, ширина), а третий полностью учитывает специфику задания и использует кинематическую модель. Смысл такого разделения состоит в резком уменьшении объема данных от этапа к этапу.

Источником данных для геометрической базы знаний служит двумерное описание внешней среды, образованное замкнутыми контурами проекций препятствий на плоскость движения в рабочей зоне робота. Для упрощения машинного описания контуры аппроксимируются многоугольниками и должны быть заданы как замкнутые, чтобы можно было однозначно определить свободные и занятые зоны.

Выбранный способ описания окружающей среды с помощью угловых точек, ребер и многоугольников позволяет отображать широкий класс объектов в произвольных условиях, но если этого недостаточно, отдельные объекты снабжаются атрибутами. Так, ребро "дверь" может иметь атрибуты "открыто", "закрыто", "высота" и т.д. Тактически это означает последовательный переход к 3-мерному описанию.

Однако указанный способ описания не подходит при прокладке трасс, поскольку в нем не предполагается использование данных о взаимном расположении элементов, т.е. топологической информации. В таком случае поверхность разбивается на ряд простых элементов (например, треугольников) ограниченного размера, расположение которых связано с имеющимися пре-

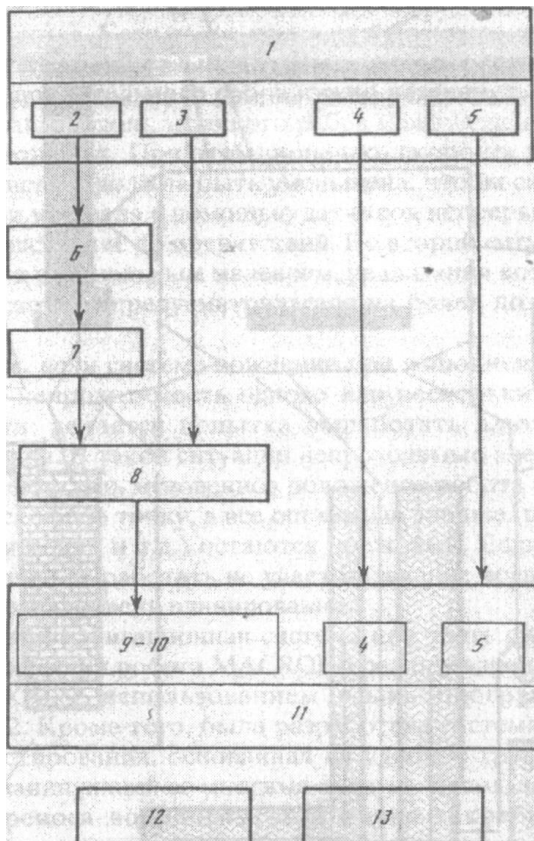


Рис. 3.1.5. Блок-схема подготовки описания внешней среды

1 - описание внешней среды; 2 - угловые точки; 3 - ребра; 4 - атрибуты угловых точек; 5 - атрибуты ребер; 6 - алгоритм Вороного; 7 - разделение поверхности (предварительное); 8 - разделение смешанных элементов поверхности; 9 - разбиение поверхности; 10- граф объединения элементов поверхности; 11 - топологически структурированная геометрическая база знаний; 12 - алгоритмы; 13- данные

пятствами, точнее, с их угловыми точками и ребрами. Так как у каждых двух смежных элементов общее ребро, то можно построить граф, узлы которого и изображают элементы поверхности, а ребра образованы двумя соседними элементами. Пример подобного объединения элементов поверхности экспериментального пространства в испытательном зале приведен на рис. 3.1.6.

Построение графа связи позволяет обеспечить эффективное Размещение описания пространства в памяти ЭВМ, когда смежные элементы оказы-

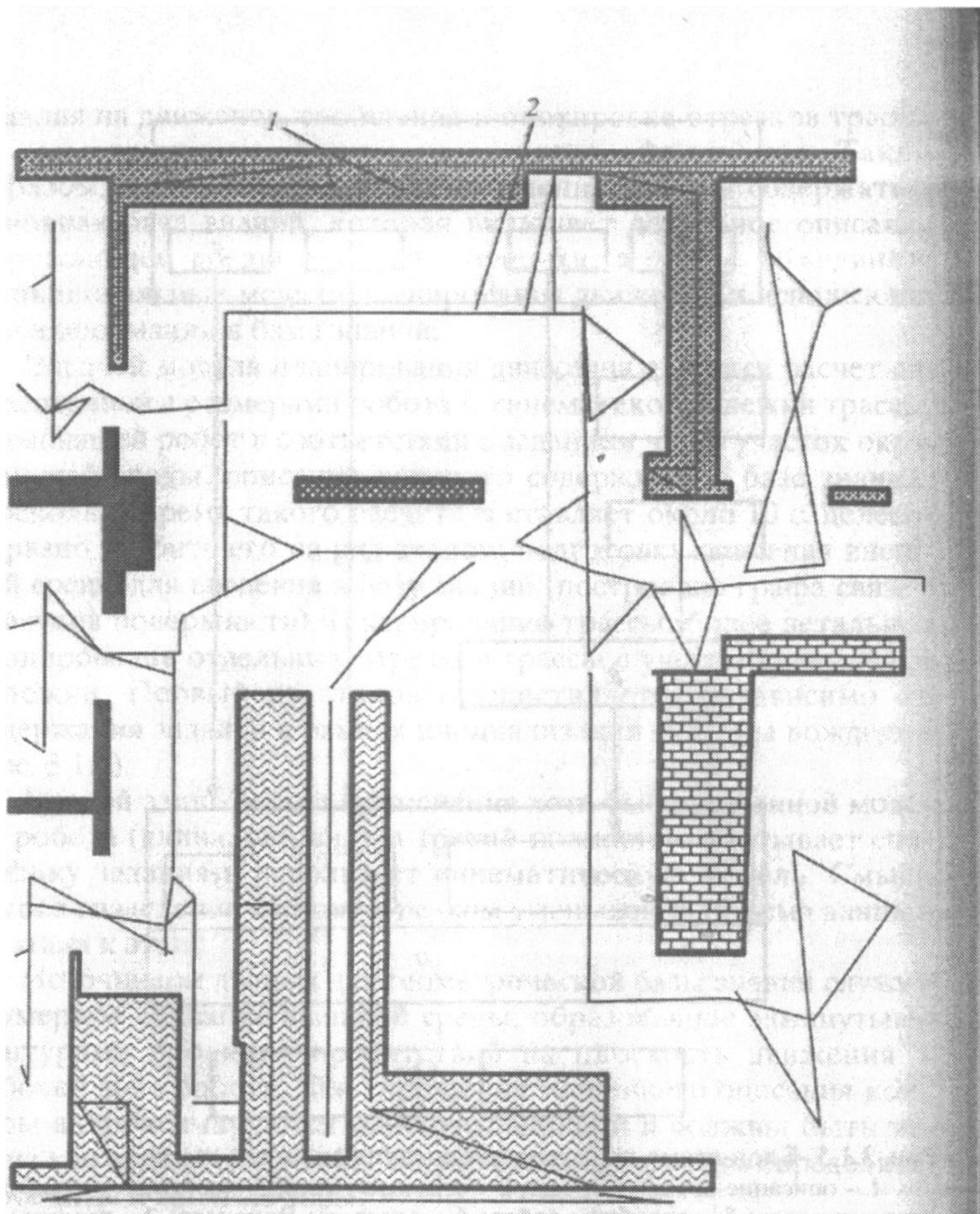


Рис. 3.1.6. Граф связи элементов и траектории движения

1 - граф связи элементов: 2 - возможные траектории движения

ваются в памяти рядом и становится возможным быстрый целенаправленный поиск элементов.

На этапе использования геометрической базы знаний в геометрическое описание внешней среды часто приходится вносить изменения, в том числе по информации от датчиков. Одно из этих изменений - блокировка отдельных отрезков - рассценивается как кратковременное и отмечается в базе знаний соответствующими атрибутами, например "ребро непроходимо". Геометрические изменения осуществляются через расширение базы знаний введением дополнительных угловых точек, ребер или многоугольников. Если таких изменений сравнительно немного,

повторная генерация базы знаний не требуется. Например, для введения дополнительного ребра нужно раздвинуть только элементы, лежащие вдоль заданного ребра между уже имеющимися угловыми точками. При этом, конечно, скорость вождения на опасных участках должна быть уменьшена, чтобы система сбора информации успевала с помощью датчиков непрерывно контролировать расстояние до препятствий. Во второй ситуации можно прибегнуть к специальным маневрам, реализация которых в описываемой системе предусматривается на более поздних этапах разработки.

В случае, если система вождения при выполнении движения обнаружит непроходимость одного или нескольких элементов поверхности, делается попытка выработать альтернативный план движения. В такой ситуации непроходимые элементы снабжаются атрибутами, мгновенное положение робота принимается за новую исходную точку, а все остальные данные (ширина трассы, целевая точка и т.д.) остаются прежними. Если же альтернативный план выработать не удастся, задание возвращается на более высокий уровень планирования.

Описанная навигационная система как часть системы обработки информации робота MACROBE реализована на ЭВМ типа Micro VAX II с использованием языка программирования МОДУЛА 2. Кроме того, была разработана система проектирования и тестирования, основанная на удобной графической системе для манипуляций со многими окнами. Используемая концепция переноса во многом аналогична таковой для обыкновенных банков данных, что позволило разделить графическую часть и решение собственно навигационной задачи. Последняя на упомянутой ЭВМ требует времени от 8 до 80 с, причем первая цифра относится к условиям испытательного зала с 87 угловыми точками и 12 обобщенными ребрами, а вторая - к заводским условиям, в которых эти величины равны 845 и 53 соответственно. Основную часть времени занимает расчет диаграмм Вороного; его длительность определяется количеством угловых точек, тогда как затраты на разделение смешанных элементов поверхности прямо пропорциональны количеству обобщенных ребер. Таким образом, эксперименты показывают, что при скорости движения тележки 0,5 м/с алгоритм может использоваться в реальном времени.

Итак, топологически структурированная геометрическая база знаний может составлять основу для ряда функций автоматического движения МРПП, в том числе для распознавания и картографирования окружающего мира. При этом в определенных пределах база знаний расширяется и модифицируется инкрементально с одновременным выполнением функций планирования движения. Вместе

с тем цикл распознавания совершенно новой среды - сбор информации от датчиков, расчет возможных точек траектории обхода препятствий и изменение начальной позиции - может выполняться достаточно быстро. После ряда таких шагов база знаний генерируется заново. Если же оказывается, что среда не изменяется, нет необходимости постоянно перестраивать базу знаний и соответствующая информация формируется в виде банка данных, а редко используемые атрибуты вводятся непосредственно в этот банк.

Одной из основных особенностей подвижных подводных роботов, так же как и космических, является отсутствие фиксированного неподвижного основания. Если рабочий орган манипулятора выполняет определенную операцию, положение и ориентация базового модуля, служащего основанием, возмущаются силами и моментами реакции, возникающими из-за ее движения, которые необходимо учитывать при выполнении точных движений.

Для учета этих особенностей разработан, например, метод на основе учета не координат или углов, а с помощью скоростей движения, при котором кинематика рабочего органа и динамическое воздействие на базовое тело развязаны, т.е. обратная задача кинематики может быть решена только на основе определения уравнений.

Управление на основе баз знаний. Постоянно осуществляются попытки, чтобы сделать роботы более "разумными" путем интеграции тактильного осязания, зрения, приведения в действие по голосу, автоматического измерения расстояний и даже обоняния. Считается, что управление с помощью искусственного интеллекта может повысить мобильные и рабочие возможности робота. Интеллект может быть представлен в устройстве управления в виде базы знаний, обычно реализуемой в виде множества правил и соответствующего механизма логического вывода.

Для управления экстремальными роботами можно использовать различные методы. Так как роботы характеризуются быстро изменяющимися процессами, которые существенно нелинейны, динамически связаны и часто имеют высокий порядок, нельзя прибегать только к линейному сервоуправлению. В общем случае существует много трудностей при практическом применении алгоритмов жесткого управления. Если модель процесса неточна, управление, основанное на ней, может дать неудовлетворительные результаты. Даже при точной модели, если значения параметров известны лишь частично, нечетко или неопределенно, необходимо производить соответствующие оценки. Алгоритмическое управление, основанное

на такой неполной информации, обычно не дает удовлетворительных результатов. Среда, с которой взаимодействует процесс, может не быть вполне предсказуемой. Естественно, что жесткий алгоритм не может точно соответствовать условиям, которые он не может "понимать". Алгоритм жесткого управления нуждается в полном множестве данных. Если некоторые данные недоступны, негибкий алгоритм, естественно, не работает.

Обычно робот сталкивается с незапланированными событиями и неизвестными ситуациями и желательно, чтобы он разумно вел себя в этих ситуациях. Поведение робота можно улучшить, если система управления станет учитывать прошлый опыт и экспертные оценки людей. В этих отношениях основанная на базе знаний система управления очень привлекательна.

В работах [15, 183] предложена трехуровневая структура управления, которая является попыткой объединить преимущества жесткого алгоритмического управления и управления, основанного на базе знаний.

Структура управления состоит из трех уровней. Нижний уровень соответствует серворегуляторам степеней подвижности робота. Сервоконтур шарниров замыкаются на нелинейный регулятор обратной связи, который развязывает и линеаризует систему. Траектория робота определяется выполняемой задачей. Эта требуемая траектория генерируется блоком планирования траектории и порождает требуемые траектории шарниров, которые формируют эталонные входы в сервомеханизмы шарниров. Сервомеханизмы имеют пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) тип. Их согласованная настройка осуществляется основным на базе знаний нечетким регулятором на третьем уровне структуры управления.

Второй уровень состоит из ряда источников знаний. Они представляют собой наблюдателей, называемых сервоэкспертами. Для каждой степени подвижности системы робота имеется свой сервоэксперт. Каждый сервоэксперт применяется как система прямого вывода, обладающая базой знаний, имеющая правила прямого вывода, несколькими базами данных, содержащими данные или контекст, и механизмом логического вывода для управления операций в целом. Сервоэксперт контролирует выходную ошибку конкретной степени подвижности робота. Эти данные наблюдений образуют контекст для сервоэксперта. Выводы, касающиеся ряда характеристик (например, перерегулирования, амплитуды колебаний, систематической ошибки, скорости сходимости, расхождения) выходного процесса относи-

тельно заданных показателей качества, передаются в нечеткий регулятор на верхнем уровне. Обычно выходная ошибка интерпретируется как реакция независимого процесса второго порядка. Экспертиза при интерпретации таких реакций не должна представлять трудностей. Например, желаемая реакция может быть определена в терминах соответствующих мер для ошибки, скорости реакции или ширины полосы пропускания, а также устойчивости.

Нечеткий настройщик несет знания в виде лингвистических утверждений, которые могут содержать нечеткие члены, группы людей-экспертов для настройки сервомеханизмов шарниров. Они образуют нечеткую базу данных.

В общем случае нечеткая система знаний на верхнем третьем уровне способна добавлять, исключать или модифицировать свою собственную базу правил и базу правил сервокомпенсаторов. Информация, собранная нечеткой системой знаний за достаточно продолжительный период времени, может быть использована для модификации показателей качества, используемых серво-экспертами. Этот процесс может рассматриваться как обучение.

Многозвенный робот можно описать следующей моделью:

$$\mathbf{M}(q)\ddot{q} = \mathbf{n}(q, \dot{q}) + \mathbf{f}(t), \quad (3.1.1)$$

где $\mathbf{M} = n \times n$ - матрица инерции, а $\mathbf{f}$ - вектор движущих сил или моментов. Число степеней подвижности робота n разное (обычно 6), а вектор $\mathbf{n}$ представляет нелинейные члены, включая силы Кориолиса и центробежные силы, демпфирование (например, кулоново трение), люфты и гравитационные силы. Ясно, что вектор $\mathbf{n}$ моделировать трудно, а матрицу $\mathbf{M}$, хотя и содержащую нелинейные члены (тригонометрические члены, возникающие из-за преобразования координат), моделировать относительно легко. Если возможно измерение шарнирных сил (моментов), положений и ускорений, то нелинейный член $\mathbf{n}$ может быть вычислен из уравнения (3.1.1). Тогда эта оценка вектора $\mathbf{n}$ поступает в систему через обратную связь для компенсации любых неизвестных нелинейных эффектов. Кроме того, оценку матрицы $\mathbf{M}$ можно использовать в прямой связи системы управления для линеаризации и, возможно, развязки динамического взаимовлияния звеньев робота.

Предупреждение столкновений. В связи с неопределенностью экстремальных ситуаций безопасное управление, особенно подвижными роботами в неизвестной обстановке, приобретает важное значение, которое возрастает по мере расширения применения и усложнения измерительной и информационной систем.

Для экстремальных ситуаций предупреждение столкновений обычно основывается на предварительном планировании и программировании безопасных траекторий движения. Расчет производится в реальном времени по ходу выполнения задачи. Расчеты могут вестись для заданной точки рабочего органа, отдельной степени подвижности или для робота в целом. Задача расчета безопасных движений в реальном времени требует наибольшей вычислительной производительности, так что ее решение, несмотря на повышение мощности микропроцессоров, может быть весьма сложной. Что же касается предварительного планирования, оно может быть поддержано системой автоматизированной оценки обстановки. Из этой системы выводится трехмерная база данных, с помощью которой может осуществляться пошаговое моделирование движения каждой из степеней подвижности. Однако внедрение данного способа в работающие системы все равно требует мощных вычислительных средств в системе управления.

Таким образом, возможны различные варианты реализации систем предупреждения столкновений, отличающиеся точностью моделирования и качеством получаемых траекторий без столкновений, начиная от использования тактильных датчиков и кончая сложными многоуровневыми системами с быстродействующими ЭВМ.

При выборе структуры системы предупреждения столкновений должна приниматься во внимание "матрица опасности". Она содержит оценки потенциальной опасности столкновений с механизмами, предметами или другими объектами, находящимися в рабочем пространстве, в виде следующих укрупненных градаций: малая опасность, средняя, высокая и очень высокая опасность.

В настоящее время планирование траекторий для большинства роботов осуществляется в режиме обучения непосредственно и лишь затем они тиражируются на программаторе; при этом используются моделирующие программы, с помощью которых траектории могут быть оптимизированы, например по критерию времени обхода препятствий.

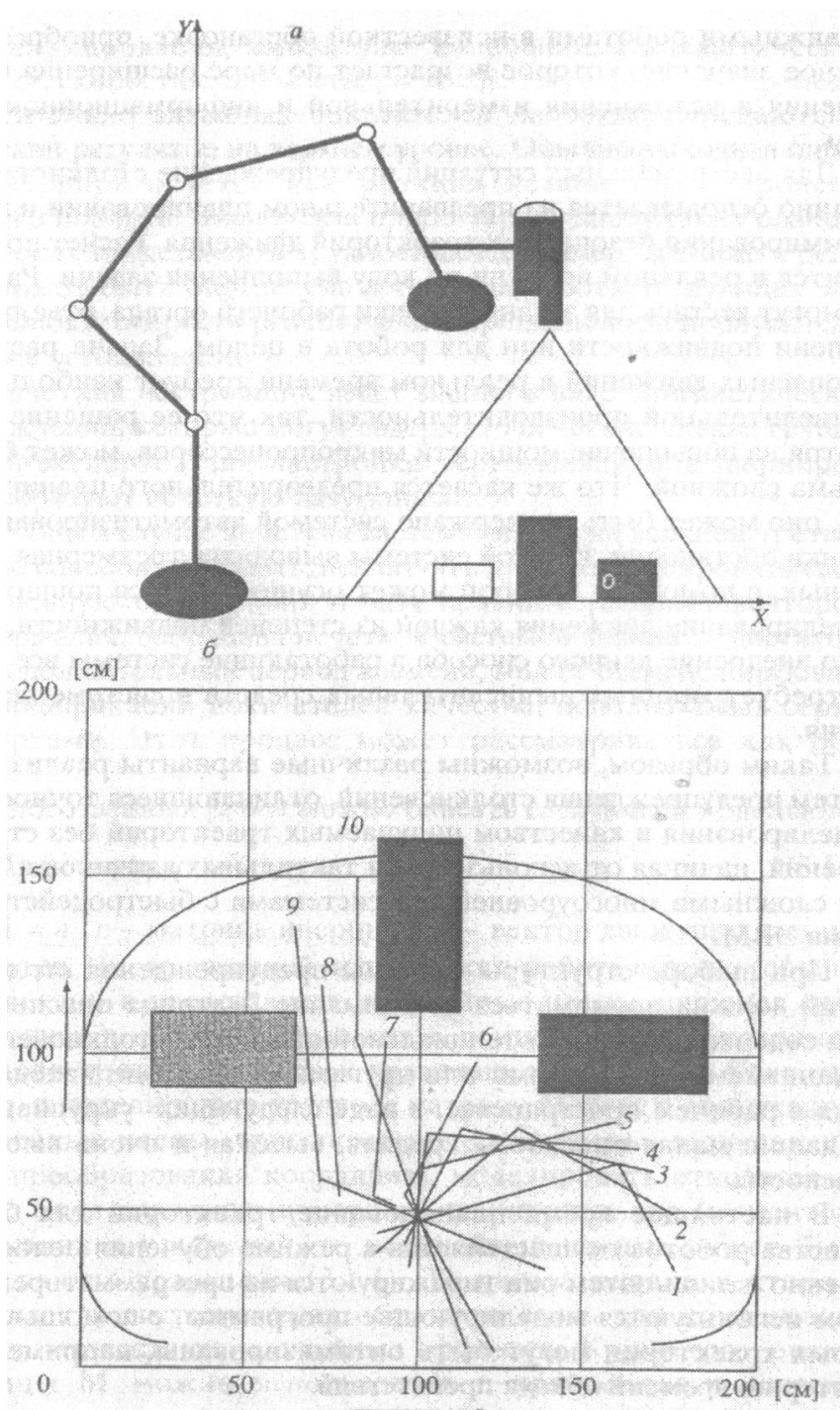


Рис. 3.1.7. Последовательность обхода препятствий

Обычно в таких случаях моделирование проводится на основе упрощенной стержневой модели робота (рис. 3.1.7), где порядковыми номерами обозначены последовательные положения и конфигурации многозвенную МРПП при уклонении от

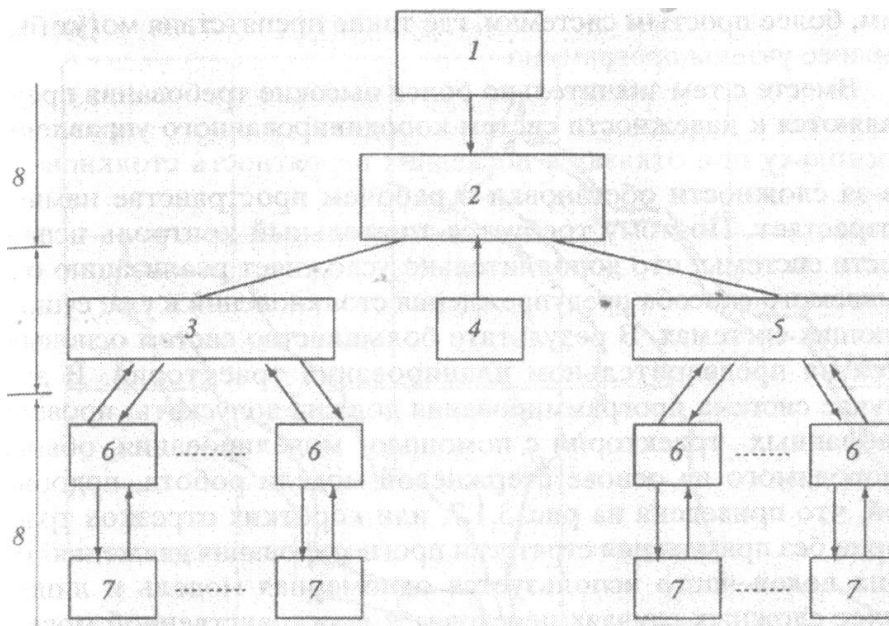


Рис. 3.1.8. Структура многоуровневой системы предупреждения столкновений
 1 - данные из системы автоматизированной оценки обстановки; 2 - планирование траектории и предупреждение столкновений; 3 - динамическая развязка степеней подвижности первого робота; 4 - датчики; 5 - динамическая развязка степеней подвижности второго робота; 6 - регулятор соответствующей степени подвижности; 7 - соответствующая степень подвижности робота; 8 - уровень

столкновений с находящимися в рабочем пространстве прямоугольными препятствиями.

Иногда, например для МРПГТ с вращательными степенями подвижности, удобно проводить моделирование в угловых координатах. Моделирование координированных движений нескольких роботов непосредственно в процессе работы с учетом предупреждения столкновений требует применения дополнительного координационного уровня над системами управления отдельных роботов. Структура подобной многоуровневой системы управления представлена на рис. 3.1.8.

Еще одним важным классификационным признаком системы предупреждения столкновений является вид препятствий, от столкновений с которыми удастся эффективно уклониться. В этом смысле многоуровневые системы координированного управления обладают определенными преимуществами, поскольку они наиболее безопасны в случаях попадания в рабочее пространство движущихся объектов.

В смысле же опасности столкновения со стационарными препятствиями они равноценны другим, более простым системам, где такие препятствия могут быть заранее учтены программно.

Вместе с тем значительно более высокие требования предъявляются к надежности систем координированного управления, поскольку при отказах в последних вероятность столкновений из-за сложности обстановки в рабочем пространстве намного возрастает. Поэтому требуется тщательный контроль исправности системы, что дополнительно усложняет реализацию описываемого способа предупреждения столкновений в уже существующих системах. В результате большинство систем основывается на предварительном планировании траекторий. В этом случае система программирования должна допускать проверку выбранных траекторий с помощью моделирования, обычно проводимого на основе стержневой модели робота, подобной той, что приведена на рис. 3.1.7, или коротких отрезков траектории без применения стратегии прогнозирования движения. Для этих целей часто используется одномерная модель и лишь в более сложных случаях переходят к пространственной модели, учитывающей реальные габариты звеньев и размеры периферийных элементов.

Планирование траекторий движения робота может осуществляться не в абсолютной системе координат, а в конфигурационном пространстве, которое соответствует значениям угловых отклонений для отдельных степеней подвижности или значениям пути вдоль осей декартовой системы. Определенное положение робота характеризуется точкой конфигурационного пространства, а траектории - соответствующей в нем кривой. Для расчета траекторий, не приводящих к столкновениям, препятствия в рабочем пространстве также должны быть отображены в конфигурационное пространство с учетом длины звеньев. Существующие способы оптимизации позволяют обходить даже наиболее сложные по форме препятствия по кратчайшему пути. На рис. 3.1.9 показаны примеры препятствий в конфигурационном пространстве

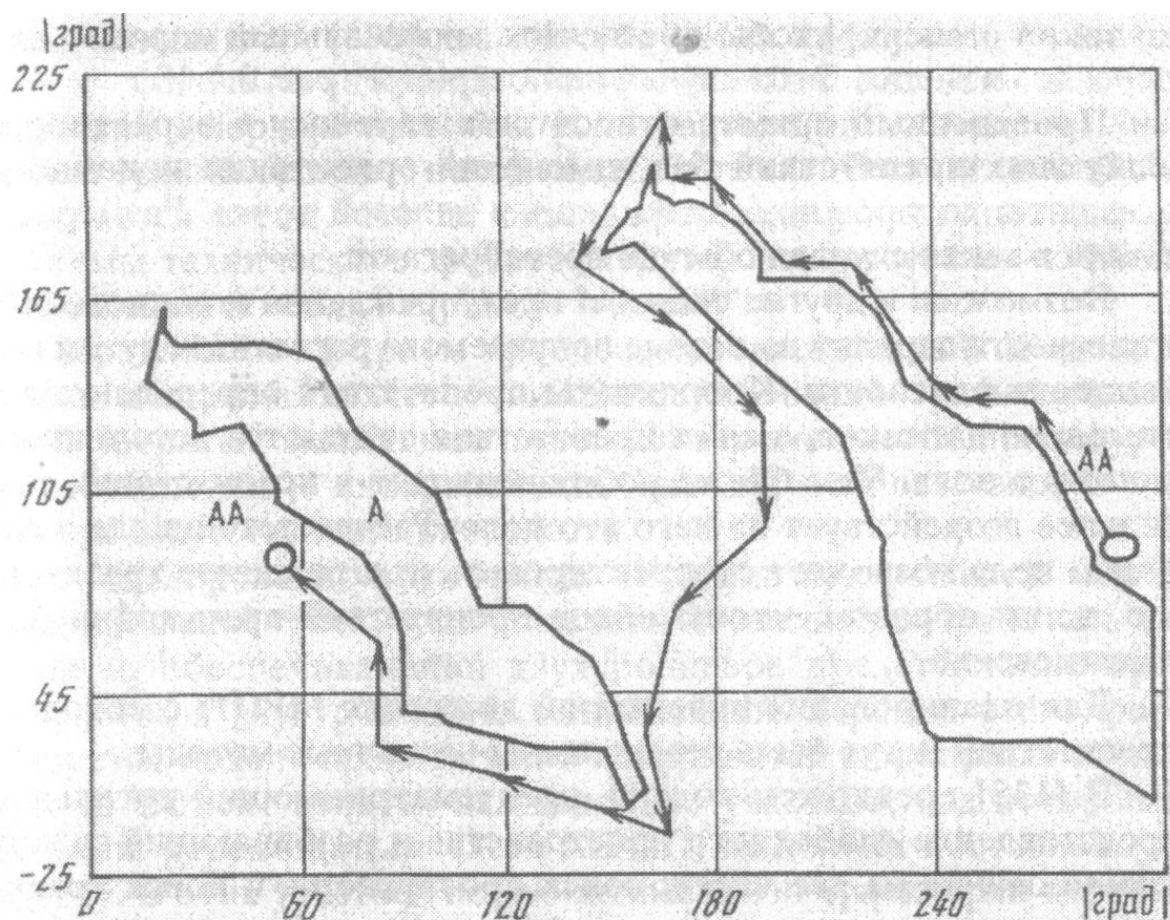


Рис. 3.1.9. Примеры препятствий в конфигурационном пространстве и кратчайшая траектория обхода

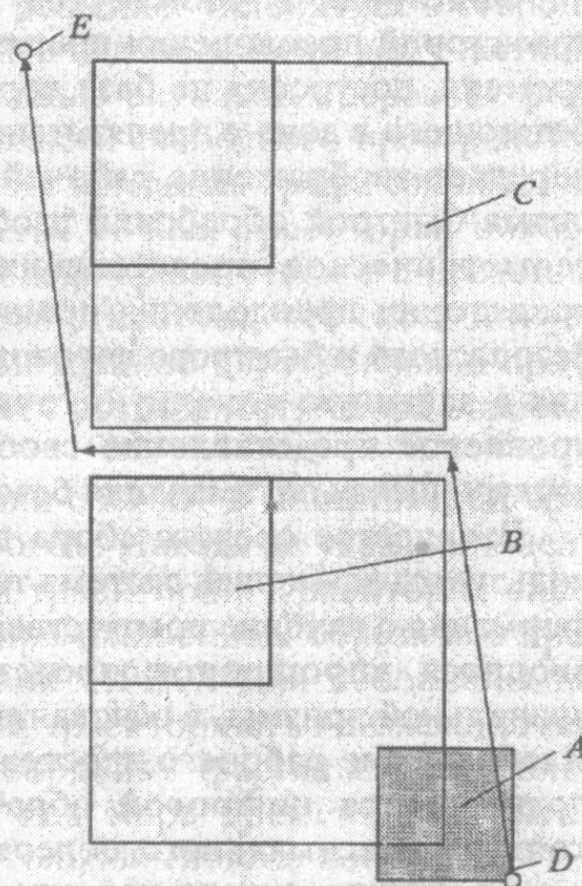


Рис. 3.1.10. Схема представления робота и препятствий

A – изделие; B – фактический размер препятствия; C – размер препятствия, увеличенный расчетным путем; D – точка отсчета в начале движения; E – точка отсчета в конце движения

двухзвенного МРПП с вращательными степенями подвижности и представлена кратчайшая траектория обхода, исходящая из точки $w_1 = 290^\circ$, $w_2 = 85^\circ$ и ведущая в целевую точку с координатами $(50^\circ, 95^\circ)$.

Еще один способ расчета траекторий, не приводящих к столкновениям, заключается в "расширении" препятствий. Согласно этому способу геометрические размеры робота или его отдельного звена сокращаются, а препятствие увеличивается на такую же величину. Например, при переносе прямоугольного изделия в пространстве с препятствиями прямоугольной формы размер изделия сводится к точке, а размер препятствий увеличивается до такой степени, чтобы обеспечить минимальный коридор для переноса изделия. Этот случай иллюстрирует рис. 3.1.10.

Приведенный пример относится к переносу в окрестности выпуклых препятствий без изменения ориентации конечного элемента, которое возможно лишь в целевой точке. Размерами схвата в таких случаях обычно пренебрегают.

Возможны и другие способы предупреждения столкновений, в частности вариант на основе получаемого расчетным путем потенциала опасности. Координаты препятствий определяются с помощью датчиков, а сами препятствие считаются источником силового поля. Чем ближе робот подходит к препятствию, тем сильнее воздействует на него это поле. Расчет потенциала в силовом поле позволяет скорректировать программную траекторию таким образом, чтобы обход препятствий происходил без столкновений.

Для планирования траекторий движения МРПП с обходом препятствий могут быть реализованы различные методы.

В [138] предложен подход, предусматривающий детальное представление свободного пространства и разбивающий задачу планирования на две части: поиск пространства и поиск траектории.

Описанная в упомянутой работе система планирования траекторий преодоления препятствий, работающая в реальном времени, построена на базе персональной ЭВМ для робота, работающего в зоне с препятствиями. После того как телекамера передает изображение рабочей зоны робота, с помощью алгоритма быстрой обработки изображений формируется простое геометрическое представление препятствия. Планирование траектории преодоления препятствия осуществляется в целях безопасного и быстрого перевода робота из начального положения в за-

данную конечную точку, для чего используются двухуровневое представление свободной области пространства и двухуровневая оптимизация безопасных траекторий робота.

В качестве средств сбора данных для описания сцены используется двумерная система технического зрения. Поэтому информация о глубине препятствия должна вводиться заранее. Так, вводится упрощенное представление препятствия в виде правильной призмы, в основании которой лежит многоугольник. Изображение рабочего пространства, получаемое телекамерой, подвергается цифровой обработке, цель которой - поиск контура максимального поперечного препятствия и аппроксимация максимального контура выпуклыми многоугольниками. На базе последних данных формируется основание правильной призмы, которая служит моделью препятствия.

Указываются [138] два способа ввода информации о положении конечной заданной точки, называемой целью. В соответствии с первым способом пользователь распечатывает значения трех координат, находящихся в точке. Второй способ заключается в том, что на базе информации, поступающей от системы технического зрения, оператор использует язык функциональных команд, например: "взять В".

Предложен алгоритм преодоления препятствий. Конечной целью алгоритма является снижение требований к размеру памяти и затратам машинного времени. Применяются процедуры представления и интерпретации знаний, используемые в системах искусственного интеллекта.

Моделирование хода мысли человека при решении задачи планирования траектории движения позволило разработать алгоритм, обеспечивающий двухуровневое представление пространства и двухуровневую оптимизацию. Прежде всего формируется модель препятствия в координатах шарнирных сочленений. Объект делится на несколько участков, над которыми должны перемещаться части МРПП, выполняя поставленную задачу. В этих участках поиск оптимальной траектории первого уровня должен осуществляться на основе интуитивного подхода. Например, необходимо принять решение: уклониться в сторону для обхода препятствия или пройти над ним. Далее для участков, содержащий препятствия, с помощью октальных деревьев формируется детальное описание области свободного пространства (второй уровень описания). Затем с помощью графа сопряжения октальных деревьев отыскивается точная траектория обхода препятствия. При завершении обхода препятствия его представление в форме октального дерева стирается, что способствует экономии объема памяти. Рассмотренное двухуровневое

представление пространства расширяет возможности сбора эвристической информации.

Цель оптимизации траектории состоит в минимизации времени отработки траектории роботом. Исходя из указанной цели строится критерий оптимизации траектории. Траектория определяется последовательностью прямолинейных отрезков в пространстве шарнирных сочленений МРПП. Для небольших по величине отрезков, описывающих траекторию, минимизация может выполняться в системе координат шарнира. Для более длинных отрезков расстояние как мера времени отработки траектории измеряется в прямоугольной системе координат.

Первый уровень алгоритма двухуровневой оптимизации относится к этапу начального уровня планирования. Этот этап характеризуется использованием грубой математической модели.

Реальная геометрическая конфигурация препятствия заменяется цилиндром, описанным вокруг препятствия. В качестве критерия выбирается минимальная длина траектории движения робота при обходе препятствия в декартовой системе координат. Для программы обхода двух препятствий (второй уровень) необходимый объем памяти РС ЭВМ составляет 256 Кбайт. Вся процедура планирования выполняется за 35 с. Из них 21 с затрачивается на операции преобразования и 14 с - на поиск траектории.

Во многих сферах применения в экстремальных условиях и ситуациях требуется точное отслеживание заданных траекторий в условиях неопределенности параметров и их изменений во времени. При этом наиболее адекватны методы адаптивного управления, в которых могут быть предусмотрены не только идентификация неизвестных и, возможно, изменяющихся во времени параметров объекта в процессе управления, но и адаптация к изменениям условий функционирования, в частности, нагрузки рабочего органа или окружающей рабочей среды). Наиболее полный обзор методов адаптивного управления многозвенными роботами содержится в [116, 137].

В основополагающих работах по адаптивному управлению предполагается, что объект управления является линейным, а его параметры постоянны во времени. Поэтому при применении результатов этих работ для синтеза адаптивного управления нелинейности робота и взаимосвязи между звеньями считаются достаточно малыми, чтобы их можно было линеаризовать с использованием приближений первого порядка или вообще аппроксимировать константами. Но как только ско-

рость движения робота возрастает или в приводах начинают применяться редукторы с меньшими коэффициентами передачи, эти допущения становятся необоснованными. В настоящее время, как правило, используются редукторы с большими коэффициентами передачи, в результате чего динамика приводов превалирует над динамикой звеньев и при синтезе управления многозвенный МРПП с большой степенью достоверности может быть представлен как несвязанная линейная система с постоянными коэффициентами. Однако имеется ярко выраженная тенденция к использованию высокотехнологичных приводов с непосредственной передачей движения. Поэтому проблема учета нелинейности и взаимосвязей приобретает все большую актуальность.

Методы адаптивного управления, в которых учитывается нелинейность модели робота, можно разделить на два основных класса: методы адаптивного управления с использованием больших коэффициентов усиления для компенсации нелинейных эффектов [137] и методы "рассчитанного момента" [161]. В методах первого из этих классов остается неформализованным выбор некоторых параметров и коэффициентов усиления в контуре адаптации, зависящий от свойств замкнутой системы управления. Кроме того, в этих системах управления часто возникает явление "дрожания" при управляющем воздействии, что может привести к возбуждению немоделируемых высокочастотных динамических колебаний. Введение зоны нечувствительности в законы управления и адаптации позволяет справиться с этим эффектом, но вызывает появление ненулевой установившейся ошибки даже при отсутствии возмущений.

Методы "рассчитанного момента" требуют достаточно полной информации о модели, а в ряде случаев - измерения угловых ускорений или использования специальных схем фильтрации для восстановления этих ускорений. При этом вопрос о робастности полученных систем управления по отношению к немоделируемым динамическим свойствам и изменению параметров остается открытым.

Для роботов, работающих в экстремальных средах в космическом пространстве, под водой, актуален анализ динамических нестационарных сцен. Движение сцены или относительные перемещения объекта необходимо определять на ранних стадиях, еще до распознавания образа. В условиях динамически меняющейся рабочей среды требуется удерживать объект в поле зрения, например камеры системы технического зрения, путем перемещения ее с помощью соответствующих приводов или движений самого робота, что менее предпочтительно из-за сложности. Для решения задачи предлагаются системы, оценивающие положение и/или

скорость объекта по последовательности изображений и использующие эти оценки для формирования сигналов управления приводами. Однако в таких случаях требуются большие объемы вычислений при обработке изображений.

В [115] для снижения вычислительных затрат проблема отслеживания рассматривается как задача определения закона управления без точной оценки параметров движения. Адаптивные возможности такой системы позволяют управлять сервоприводами так, чтобы объект занимал оптимальное положение в поле зрения. Таким образом, задача может найти применение для наведения подвижного робота на движущийся объект.

Управление гибким бортовым манипулятором и многозвенным роботом. Результаты сравнительного исследования методов управления рукой "гибкого манипулятора" (среди которых: синтез корректирующих воздействий на основе классического метода корневого годографа - с позиционной обратной связью; использование управления с наблюдателем на базе обратной связи по комплексу параметров состояния; синтез коррекции с обратной связью по ускорению) показали эффективность третьего метода управления применительно к современным облегченным многозвенным роботам. Последние могут использоваться для выполнения специальных задач в экстремальных условиях на промышленных объектах (например, химической или атомной промышленности) или в космическом пространстве. МРПП этого класса обладают рядом преимуществ, в том числе высоким быстродействием, низким энергопотреблением, компактностью механической конструкции. Манипуляторы для выполнения различных технологических задач могут устанавливаться на борту таких МРПП.

Известен ряд теоретических работ, в которых проанализированы различные методы математического моделирования и управления рукой гибкого манипулятора. Эти работы главным образом носят академический характер, поскольку в них не уделяется достаточного внимания вопросам, связанным с практической реализацией. Например, таким, как ограничение коэффициента усиления устройства управления; учет динамики исполнительного силового механизма; ограничений, накладываемых на формирование сигналов. Указанные факторы выявляются в процессе проведения лабораторных исследований на реальном макете.

В ряде работ анализируются возможности использования обратной связи по ускорению в процессе синтеза закона управления. Например, рассмотрена схема, позволяющая вычислять закон управления с обратной связью по ускорению в оп-

тимальной формулировке при использовании опережающей форсирующей линеаризации коррекции. Показано также, что управление с обратной связью по ускорению устойчиво при наличии описания динамики замкнутой системы в пространстве состояний. Однако определение запаса устойчивости невозможно и робастность при условии влияния гибкости не гарантируется. Тем не менее идея применения обратной связи по ускорению остается весьма привлекательной с точки зрения технического проектирования, особенно в связи с относительной простотой технической реализации. Другим важным достоинством систем управления с обратной связью по ускорению является структурная совместимость всех процессов очувствления и активизации подвижных звеньев. Это означает, что отпадает необходимость в позиционировании телекамеры, что важно для крупномасштабных применений, таких, как космические телероботы.

В [9] выполнено экспериментальное исследование в области управления гибкими многозвенными роботами для решения двух тесно связанных между собой проблем. Первая состоит в управлении вибрацией руки робота в процессе ее движения. Вторая проблема заключается в управлении положением концевой точки руки робота по завершении движения поворота.

Проведена серия экспериментов по управлению конечным положением балки (или руки), совершающей вращательное движение. В качестве входной информации наблюдателя используются: положение концевой точки, положение вала, скорость вала. Далее рассчитываются коэффициенты усиления обратной связи с использованием теории оптимального управления. В университете г. Торонто (Канада) принят другой подход, в соответствии с которым спроектирован стабилизирующий контроллер, в основе которого лежит теория линейного квадратичного регулятора. Затем последовала разработка независимого ПИД-регулятора для управления поворотом. Еще один подход использует набор тензометрических датчиков, установленных по всей длине руки, а также информацию о положении вала двигателя привода и его скорости для организации управления с обратной связью.

В упомянутых экспериментальных работах определение крутящего момента на валу двигателя привода звена осуществлялось или путем измерения механического напряжения в балке, или по положению концевой точки звена робота. В рассматриваемой экспериментальной работе сигналом обратной связи служило ускорение концевой точки. Исследовались две различные схемы построения обратной

связи: с использованием выходных параметров и по внутреннему состоянию системы. Идентичность при сравнении эффективности указанных схем с обратной связью по ускорению достигалась за счет информации о положении концевой точки.

На базе рассмотренной лабораторной исследовательской установки проверялись различные алгоритмы управления. Для их оценки были выбраны две схемы управления с обратной связью по положению концевой точки руки. Эти схемы сравнивались со схемой управления, содержащей обратную связь по ускорению. Во всех случаях цель управления совпадала: поворот звена на заранее заданный угол с максимально возможной скоростью. Входной управляющий сигнал должен быть ступенчатой формы. При этом требовалось обеспечить устойчивость концевой точки руки приведением в движение втулки двигателя.

Схемотехническое решение первого варианта устройства управления обеспечивает коррекцию управляющих воздействий, используя данные о положении концевой точки, поступающие от камеры линейной развертки. Второй вариант устройства управления содержит наблюдатель с обратной связью по состоянию системы для определения положения полюсов. Коэффициенты усиления обратной связи по состоянию системы вычисляются на основе теории дискретного линейного квадратичного регулятора. В соответствии с этой теорией параметры целевой функции, которая должна быть минимизирована, определяются положением концевой точки руки и входными управляющими сигналами.

Тенденция развития вычислительной аппаратуры для применения к экстремальным роботам и языки программирования. В настоящее время развивается тенденция к разработке специализированных интегральных схем (СПИС), специально предназначенных для использования в робототехнике. При этом считается, что будет получен ряд преимуществ:

- повышение производительности;
- уменьшение размеров и потребляемой энергии, что особенно важно для автономных транспортных и других подвижных робототехнических средств;
- повышенная надежность, особенно в условиях экстремальных воздействий среды;
- низкая стоимость.

Технология СПИС обладает всеми необходимыми качествами робототехнической аппаратуры реального времени при возможности частой модификации или

полном перепроектировании. Наибольшие ее преимущества проявляются в задачах адаптивного управления, где требуется локальная предварительная обработка огромного количества разнообразных, часто зашумленных сигналов от средств очувствления.

Несмотря на то что уже стали коммерчески доступными высокопроизводительные сумматоры/множители со средней производительностью 10 млн операций с плавающей запятой (МОПЗ), реальная производительность построенной на них рабочей станции общего назначения оказывается значительно ниже, чем эта потенциальная производительность. Использование высокопроизводительных автоматических логических устройств (АЛУ) для задач кинематики и динамики роботов требует тщательно продуманной архитектуры системы, особенно с точки зрения передачи данных и управления вычислением.

Многие эффективные алгоритмы управления роботами не могут использоваться до сих пор в режиме реального времени в связи с большим объемом вычислений, требующихся для их реализации. Аппаратная реализация параллелизма и применение специализированных узлов может существенно повысить вычислительную мощность и производительность. Например, эта задача может быть решена с помощью векторного процессора для робототехнических применений. Его арифметические блоки, структура взаимосвязей и набор команд обеспечивают эффективное выполнение трехмерных векторно-матричных операций. Векторный процессор представляет собой пример вычислителя с сокращенным набором команд, имеет соответствующий интерфейс для организации взаимодействия группы аналогичных процессов с жесткой синхронизацией. Он состоит из небольшого числа арифметических узлов, объединенных в специализированную вычислительную секцию. Его набор инструкций содержит только 7 простейших команд. Производительность цикла процессора составляет 125 нс. На выполнение такой процедуры, как вычисление Якобиана для робота с шестью степенями подвижности затрачивается 50 мкс.

Для реализации алгоритмов по обработке изображений используются специализированные видеопроцессоры, позволяющие выполнить действия над матрицами изображений: повороты, суммирование, перемножения, прямое и обратное преобразование Фурье и т.д. в реальном масштабе времени.

Функционирование роботов в экстремальных условиях, средах и ситуациях вызывает требования к обеспечению надежности работы вычислительных устройств

(работа при высокой температуре, радиации, ультрафиолетовом излучении, в вакууме и т.д.). Большие объемы информации от различных датчиков требуют организации большого числа каналов или повышенного быстродействия систем ввода-вывода, а также оптимальных по быстродействию алгоритмов и математических программ, написанных на языках, ориентированных специально для решения робототехнических задач.

В настоящее время наибольшее развитие находят системы программирования, в которые включаются средства моделирования окружающей обстановки, описания задания на высоком уровне и планирования движений на уровне робота. Рассмотрим особенности программирования сварочного робота с использованием системы моделирования Autoweld, разработанной университетами Канады [85], которая может быть принята в качестве типовой для роботов, работающих в экстремальных условиях на промышленных предприятиях или крупных объектах.

При создании системы автоматического программирования сварочных роботов Autoweld детально разработан эффективный метод расчета помех движению и планирования безопасных и реализуемых траекторий. Данная система может быть применена и для МРПП, выполняющего работы по резке в противопожарных целях или разборке. Кроме того, в систему была включена простая база данных для автоматического выбора параметров сварки.

При моделировании рабочей зоны необходимо описать геометрические и механические характеристики всех ее компонентов, робота и его рабочего органа, сварочной аппаратуры, деталей, подлежащих сварке, и изменений их пространственных отношений. Для простоты принято объемные тела представлять совокупностями многогранников, которые задаются описанием топологии и указанием размеров. Топологическое представление имеет иерархическую структуру и как минимум включает в себя списки:

- совокупностей объектов в рабочем пространстве;
- выпуклых многогранных объектов в каждой совокупности;
- граней каждого многогранного объекта;
- вершин каждой грани.

Соответствующие данные о размерах содержатся в таблице координат вершин. В целях ускорения расчетов принятое представление содержит избыточную информацию: списки смежных граней; граней, примыкающих к вершинам; соседних

вершин; граней в совокупности объектов; вершин в совокупности объектов; таблицы нормалей к граням. Каждый многогранник задается в системе координат, связанной с соответствующей совокупностью объектов.

Шов, который должен сварить робот, можно разбить на сегменты - пространственные кривые, которые соединяются узлами. Сегменты представляются последовательностями близко расположенных точек, координаты которых заданы в системе координат детали. В каждой точке известны единичные нормали к поверхностям двух свариваемых деталей. По этим данным рассчитывают касательный, нормальный и боковой по отношению к шву векторы, определяющие систему координат в каждой точке траектории. К этому описанию шва добавляется задание параметров процесса сварки для каждого сегмента: типа шва, поперечного сечения разделки, толщины свариваемых элементов. Заданное напряжение сварки, диаметр, тип и скорость подачи проволоки, вид и расход защитного газа, полярность тока хранятся в массиве данных, откуда их легко извлечь с помощью модуля выбора параметров сварки.

Кинематика сварочного робота и позиционирующего стола описывается следующими параметрами: числом степеней подвижности, геометрией и размерами звеньев, типом сочленений (вращательное или призматическое), преобразованиями из системы координат инструмента в систему координат последнего звена и из системы координат, связанной с основанием робота, в абсолютную систему координат, конфигурацией звеньев робота, принимаемой по умолчанию в случае неоднозначного решения обратной кинематической задачи.

В перспективе модели рабочих ячеек будут формироваться с использованием автоматизированного проектирования (САПР).

Алгоритмы предотвращения столкновений робота с препятствиями требуют в простейшем случае лишь двоичного ответа о факте наличия или отсутствия возможного столкновения, а для более точного планирования безопасных траекторий необходимы количественные расчеты мест пересечений объектов и минимальных расстояний ("зазоров") между ними.

Для расчета функции расстояния определим исходную плоскость Π :

$$\Pi(n, p) = (r : (r \cdot n) - p = 0, r \in R^m,$$

где n – единичная нормаль к плоскости, p – расстояние от плоскости до начала координат, $m = 2$ для двумерного пространства и $m = 3$ – для трехмерного. Пусть $K_i \subset R^m, i = 1, \dots, n$ – выпуклые множества, представляющие объекты. Если определить множество всех единичных нормалей в виде $N = \{n : n \in R^m, |n| = 1\}$, то для любого $n \in N$ существует единственное $p_i \in R$ такое, что плоскость $\Pi_i(n, p_i)$ будет касательной к K_i . Существует также единственное $p_j \in R$ такое, что плоскость $\Pi_j(-n, p_j)$ будет касательной к K_j . Нормаль к плоскости в точке касания по определению направлена от объекта.

Таким образом, расстояние между двумя плоскостями задается выражением

$$d(n) = (r_i - r_j) \cdot n, \quad r_i \in \Pi_i, r_j \in \Pi_j.$$

Минимальное расстояние между двумя объектами равно максимальному расстоянию между всеми возможными парами касательных плоскостей для данного множества единичных нормалей

$$d(n^*) = \max$$

$$\{(r_i - r_j)n : r_i \in \Pi_i(n) \in \Pi_j(-n), n \in N\}.$$

Наиболее распространенными роботоориентированными языками являются AL и APL.

Развитие языков программирования должно предусматривать методы искусственного интеллекта и использование знания для планирования и выполнения оперативных задач. Краткая характеристика роботоориентированных языков программирования AL и APL заключается в следующем:

- AL разработан в Стэнфордском университете;
- может быть реализован на ЭВМ типа VAX;
- управление роботом в реальном времени осуществляется с одиночной стойки PDP-11;
- язык программирования высокого уровня с характерными чертами Алгола и Паскаля;
- оснащен спецификациями как на уровне робота, так и на уровне задачи;
- переведен на язык программирования низкого уровня и реализован на машине, осуществляющей управление в реальном времени;

Управление цифровых образовательных технологий

- имеет конструкции языка программирования в реальном времени (синхронизация, совместное выполнение и условные переходы);
- представление данных и структур управления осуществляется, как и в языке Алгол;
- оснащен средствами для моделирования рабочего пространства.

APL разработан фирмой IBM, предназначен для управления роботами типа IBM RS-1 и реализован на ЭВМ SERIES-1 (или I персональном компьютере фирмы IBM), которая также допускает возможность управления роботом. Робот RS-1 представляет собой многозвеновик, работающий в декартовой системе координат и имеющий 6 степеней свободы. Первые три сочленения робота - призматические; три последние - вращательные;

- обеспечивает описание окружающей среды, в которой могут быть построены различные интерфейсы пользователя;
- обладает свойствами и конструкциями, подобными свойствам и конструкциям языка LISP, способен к агрегированию данных;
- может планировать траектории сочленений в пространстве, допускает ограничения по положению и скорости, позволяет описывать абсолютные и относительные движения;
- обеспечивает управление от датчиков для возможного прерывания движения робота.

2. Кинематические соотношения при различном взаимном расположении бортового манипулятора и датчика ИИС

В процессе выполнения бортовым манипулятором различных технологических работ часто бывает необходимо осуществлять контроль над ходом выполнения этих операций. Возможны две схемы взаимного расположения датчика ИИС и схвата бортового манипулятора мобильного робота.

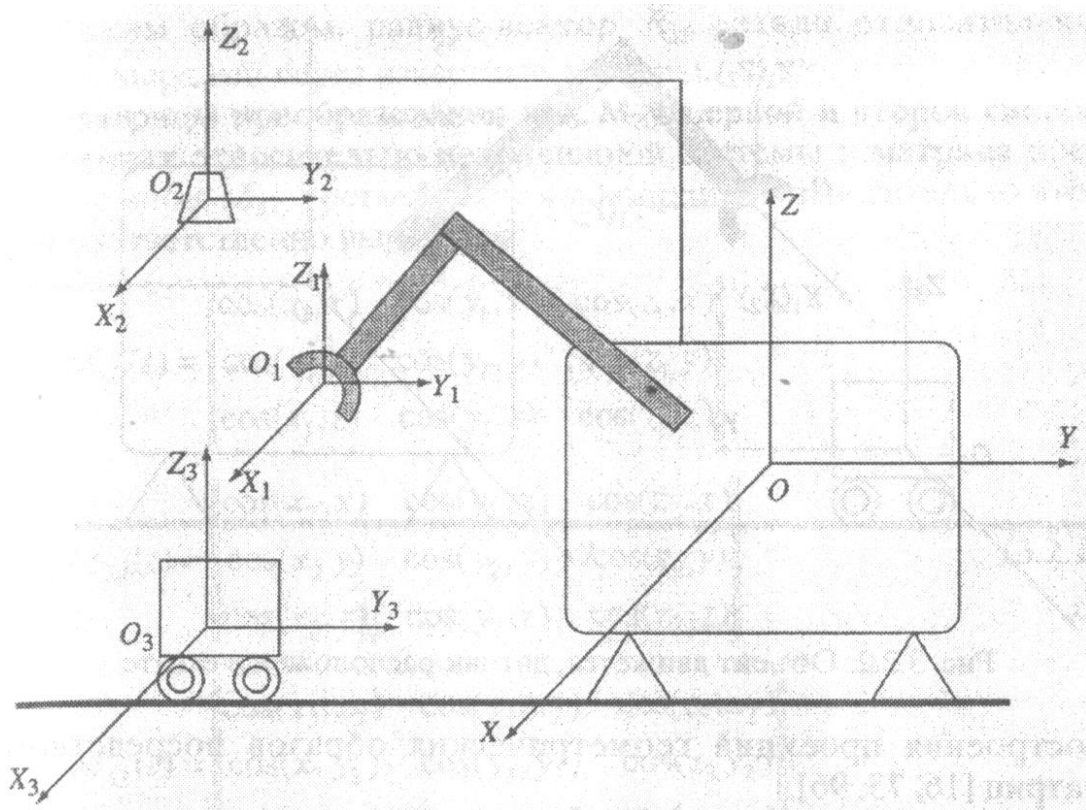


Рис. 3.2.1. Объект движется, датчик не совмещен со схватом и перемещается независимо

Первая схема (рис. 3.2.1) предусматривает расположение датчика на корпусе мобильного робота, не связанного механически с манипулятором. Согласование взаимных движений бортового манипулятора и корпуса робота производится через микропроцессорную систему управления. Команды на выполнение механических движений манипулятора, оперирующего с объектами внешней среды, передаются через систему управления исполнительным приводам звеньев манипулятора. Одно из преимуществ подобной схемы является уменьшение массы движущихся частей вместе со схватом манипулятора, повышение точности измерительных устройств, многоцелевое использование ИИС.

В соответствии с другой схемой (рис. 3.2.2) диагностическая головка с датчиками устанавливается непосредственно в схват или вблизи него. Преимущество такой схемы заключается в более широких возможностях сканирования и переносе измерительных датчиков в произвольные области пространства, в которых необходимо производить измерения. Взаимное расположение датчика и схвата может быть определено на основе теории конечных вращений твердых тел, а расчет контура объекта осуществляется

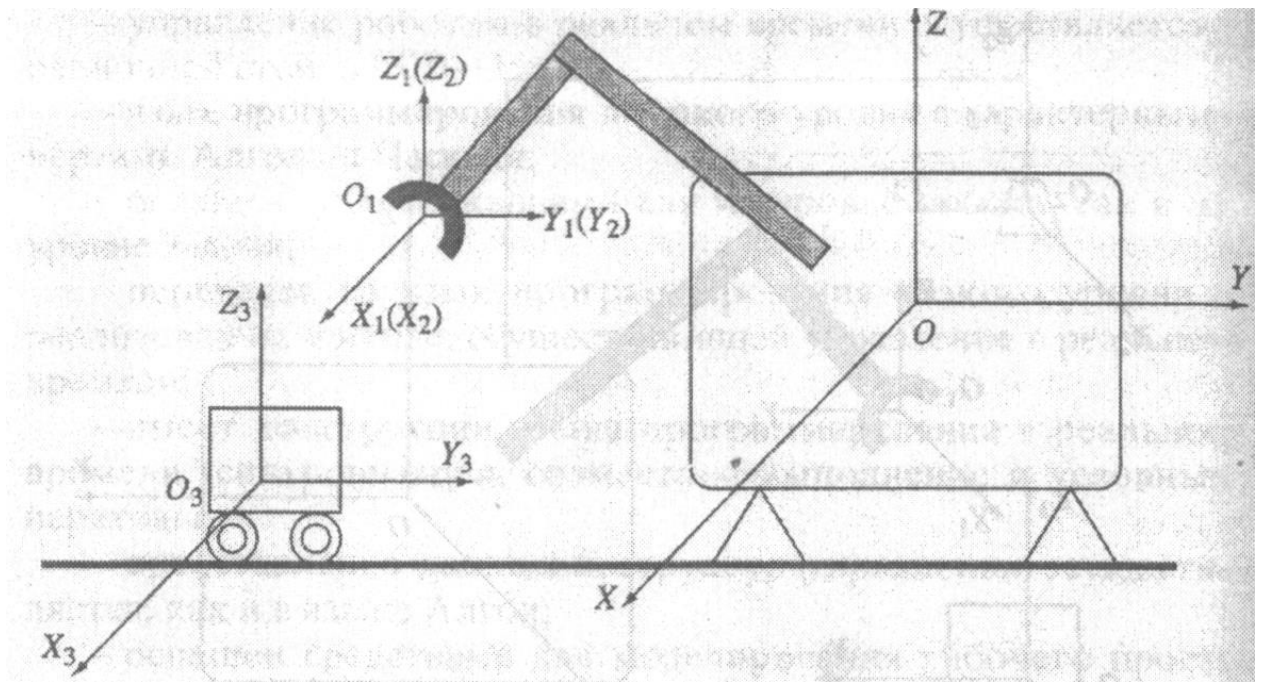


Рис. 3.2.2. Объект движется, датчик расположен в схвате

посредством аналитических методов построения проекций геометрических образов посредством матриц [16, 73, 96].

Рассмотрим вначале общий случай, когда деталь может перемещаться в пространстве, а датчик не совмещен со схватом и перемещается независимо.

Введем следующие системы координат: неподвижную - $OXYZ$, связанную с основанием робота, и подвижные: O_1, X_1, Y_1, Z_1 , связанную с устройством захвата; O_2, X_2, Y_2, Z_2 связанную с датчиком; O_3, X_3, Y_3, Z_3 , связанную с контролируемым изделием. Пусть в каждый момент времени t известно (см. рис. 3.2.1) положение систем координат с центрами в точках O_1 и O_2 относительно неподвижной системы с центром в O и измеряемое датчиком положение системы координат O_3, X_3, Y_3, Z_3 относительно системы O_2, X_2, Y_2, Z_2 . Требуется найти положение системы координат O_3, X_3, Y_3, Z_3 относительно системы O_1, X_1, Y_1, Z_1 , т.е. положение контролируемой детали относительно захвата. Значения радиус-векторов, связывающих центры соответствующих систем координат, будут равны

$$\begin{aligned}\bar{R}_{10} &= \overline{O_1O} = \bar{R}_1(t); \\ \bar{R}_{20} &= \overline{O_2O} = \bar{R}_2(t); \\ \bar{R}_{30} &= \overline{O_3O} = \bar{R}_3(t); \\ \bar{R}_{31} &= \overline{O_3O_1} = \bar{R}_{32} + \bar{R}_{20} - \bar{R}_{10} = \bar{R}_{32}(t) + \bar{R}_2(t) - \bar{R}_1(t).\end{aligned}$$

Таким образом, радиус-вектор $\bar{R}_{31}$ детали относительно схвата выражен через известные векторы.

Матрицы преобразования M_{10} , M_{20} первой и второй систем координат относительно неподвижной системы и матрица преобразования M_{32} третьей системы координат относительно второй соответственно выразятся:

$$\begin{aligned} M_{10}(t) &= \begin{vmatrix} \cos(x_1, x) & \cos(y_1, x) & \cos(z_1, x) \\ \cos(x_1, y) & \cos(y_1, y) & \cos(z_1, y) \\ \cos(x_1, z) & \cos(y_1, z) & \cos(z_1, z) \end{vmatrix} \\ M_{20}(t) &= \begin{vmatrix} \cos(x_2, x) & \cos(y_2, x) & \cos(z_2, x) \\ \cos(x_2, y) & \cos(y_2, y) & \cos(z_2, y) \\ \cos(x_2, z) & \cos(y_2, z) & \cos(z_2, z) \end{vmatrix} \\ M_{32}(t) &= \begin{vmatrix} \cos(x_3, x_2) & \cos(y_3, x_2) & \cos(z_3, x_2) \\ \cos(x_3, y_2) & \cos(y_3, y_2) & \cos(z_3, y_2) \\ \cos(x_3, z_2) & \cos(y_3, z_2) & \cos(z_3, z_2) \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (3.2.1)$$

Радиус-векторы $\bar{R}_{10}(t)$, $\bar{R}_{20}(t)$ и матрицы $M_{10}(t)$, $M_{20}(t)$ определяют конечный поворот и положение устройства захвата и датчика относительно неподвижной системы координат, связанной с основанием робота, а радиус-вектор $\bar{R}_{32}(t)$ и матрицы $M_{32}(t)$ определяют конечный поворот и положение изделия относительно датчика. Для нахождения искомой матрицы $M_{31}(t)$ – конечного поворота изделия относительно устройства захвата, требуется вычислить промежуточную матрицу M_{21} – конечного поворота датчика относительно устройства захвата через известные матрицы M_{20} и M_{10} .

$$M_{21}(t) = M_{20}(t) \cdot M_{10}(t) = M_{20}(t) \cdot M'_{10}(t),$$

где $M'_{10}(t)$ – транспонированная матрица по отношению к $M_{10}(t)$, совпадающая с обратной матрицей $M_{10}^{-1} = M_{10}^1$.

Затем может быть вычислена матрица конечного поворота изделия относительно устройства захвата

$$M_{31}(t) = M_{32}(t) \cdot M_{21}(t) = M_{32}(t) \cdot M_{20}(t) \cdot M'_{10}(t) \quad (3.2.2)$$

Положение захвата относительно изделия будет определяться транспонированной матрицей $M'_{31}(t) = M_{13}(t)$. Выражения (3.2.1) и (3.2.2) отвечают общему случаю.

Рассмотрим частные случаи взаимного расположения датчика по отношению к роботу:

а) датчик неподвижен, механически не связан с роботом (рис. 3.2.1), что характерно для использования в качестве датчика телекамеры, обладающей значительной массой. В этом случае

$$R_{20}(t) = 0; \quad M_{20}(t) = I$$

матрица M_{20} равна единичной матрице.

Искомые радиус-вектор и матрица будут равны

$$\bar{R}_{31}(t) = \bar{R}_{32}(t) - \bar{R}_1(t); \quad M_{31}(t) = M_{32}^*(t) \cdot M'_{10}(t);$$

б) датчик расположен в схвате (см. рис. 3.2.2), и системы координат $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$ совпадают. В этом случае

$$\bar{R}_{31}(t) = 0; \quad \bar{R}_{20}(t) = \bar{R}_{10}(t); \quad \bar{R}_{31}(t) = \bar{R}_{32}(t);$$

$$M_{20}(t) = M_{10}(t); \quad M_{20}(t) \cdot M'_{10}(t) = I;$$

$$M_{31}(t) = M_{32}(t).$$

В измерительных роботах часто целесообразно ориентировать датчик так, чтобы оси системы координат $O_2X_2Y_2Z_2$ были бы параллельны осям системы $O_3X_3Y_3Z_3$, связанной с контролируемой деталью, т.е. чтобы $M_{32}(t) = I$. Такую ориентацию можно осуществить, например, тремя последовательными эйлеровыми поворотами. Выражения матриц направляющих косинусов через углы Эйлера приведены, например, в книге [34].

Вычисление матриц вида M_{10} , M_{20} , M_{32} , M_{31} производится на мини- или микро-ЭВМ по разработанным стандартным программам. Применение микропроцессорной техники открывает возможности реализации программ вычисления матриц схемным путем.

3. Управление на основе информации о силовых воздействиях

Проблема механики управляемых силовых движений схватов роботов различных назначений, включая роботы вертикального перемещения, представляет собой одну из важных проблем робототехники, определяющую эволюцию создания роботов новых поколений и существенного улучшения действующих моделей роботов.

Силовое управление необходимо применять для выполнения задач, которые характеризуются недостаточностью доступной

информации об окружающей среде, таких, как подземная проходка, подводные спасательные работы, обезвреживание мин и других взрывчатых предметов.

Когда робот движется в пространстве, его движение не ограничено и рабочий орган не подвергается воздействию внешних сил. Как только робот начинает контактировать с окружающей средой, рабочий орган стремится вызвать деформацию окружающей среды. Как и в случае надавливания на механическую пружину, между рабочим органом и окружающей средой возникает сила реакции. Целью применения силового закона управления является поддержание силы реакции между рабочим органом и окружающей средой на требуемом уровне. Когда робот начинает контактировать с окружающей средой, жесткость среды может влиять на устойчивость системы силового управления. Имеется ряд работ по синтезу силового управления и исследованию устойчивости замкнутых систем силового управления однозвенными роботами. Однако аспекты управления и устойчивости для многозвенных роботов общего типа в них не рассматриваются.

С концептуальной точки зрения при контакте робота с гладкой жесткой поверхностью невозможно осуществить вертикальное движение рабочего органа внутрь поверхности или развить со стороны рабочего органа горизонтальную силу (параллельную поверхности). Эти позиционные и силовые ограничения называют естественными ограничениями. Согласно концепции естественных и искусственных ограничений, в гибридной системе управления одновременно осуществляется управление по положению и силе. Позиционные и силовые ошибки вначале вычисляются в координатах рабочего пространства, а затем преобразуются к обобщенным координатам для расчета шарнирных моментов. Однако при этом следует учитывать нелинейную динамику робота.

Если имеется хорошее модельное описание динамики робота, то путем приложения нелинейного входного управляющего воздействия можно добиться компенсации влияния взаимосвязи и получить систему линейных уравнений в координатах рабочего пространства. В этом случае появляется непосредственная возможность синтеза линейного управляющего устройства для стабилизации каждой позиционной или силовой переменной в координатах рабочего пространства. Однако в описании робота, датчиков и окружающей среды всегда имеется неопределенность: например, неточная информация об объекте, захваченном схватом робота, переменной жесткости окружающей среды и иногда о не моделируемой динамике датчиков робота и окружающей среды, которой нельзя пренебречь. При

наличии неопределенности такого рода традиционные методы синтеза нелинейного управления могут привести к нежелательным свойствам полученной системы управления роботом.

Чтобы обеспечить удовлетворительное качество силового управления, в законе управления должны быть учтены возможная неопределенность параметров модели и внешние возмущения, т.е. система должна быть робастной. До настоящего времени было сделано только несколько попыток применения концепции робастности при синтезе, законов силового управления. В целях улучшения робастности силового, управления для оценки жесткости рабочей среды может быть применен метод идентификации параметров в реальном времени, с тем чтобы полученные значения параметров жесткости использовать для настройки коэффициентов усиления управляющего устройства. Однако в такой схеме не учитываются неопределенность параметров робота и неизвестные возмущения.

Был предложен также робастный гибридный алгоритм управления. Робастность контура силового управления достигалась путем выбора значений коэффициентов усиления управляющего устройства, минимизирующих показатель качества при заданном диапазоне ошибок модельного описания. Как и при других аналогичных подходах к обеспечению робастности, этот метод может привести к неприемлемому качеству переходного процесса.

В соответствии с принципом синтеза робастного управляющего устройства, обеспечивающего следящее управление и парирование возмущений, должна быть известна модель возмущения. Иначе говоря, управляющее устройство должно "знать", какой эталонный сигнал ему придется отслеживать и какие возмущения парировать. Этот принцип известен в теории многомерных сервосистем и был использован для синтеза позиционного управления роботом в обобщенных координатах.

Вместе с тем развитый подход требует получения модели линеаризованной системы, что в случае многозвенного робота общего типа является исключительно сложной задачей и поэтому неэффективен с вычислительной точки зрения. Наряду с этим нелинейный робастный закон управления синтезируется с использованием методов теории сервосистем, но он свободен от необходимости получения модели и вычислительных трудностей. Опубликованные результаты демонстрируют отличные свойства этого закона, записанного в обобщенных координатах, даже при наличии ошибок модельного описания и внешних возмущений.

В [61] предложен новый нелинейный гибридный закон управления движением робота, который является робастным по отношению к существенным неопределенностям. Управляющее входное воздействие содержит нелинейную и линейную составляющие. Нелинейная компонента обеспечивает декомпозицию и стабилизацию каждой позиционной или силовой переменной в координатах рабочего пространства. Линейная компонента синтезируется на основе применения методов теории сервосистем к каждой паре входов/выходов из условия подавления позиционной или силовой ошибки отслеживания.

Нелинейный робастный гибридный закон управления может обеспечить требуемую точность позиционно-силового отслеживания при наличии вычислительных ошибок, ошибок модельного описания и переменной жесткости рабочей среды.

Методика построения системы управления с силовым очувствлением и применением многокомпонентного датчика силы с учетом динамических и кинематических уравнений движения манипуляционных роботов развита в ряде прикладных научных работ, например в [41, 49]. Исследования по управлению силой сжатия схвата робота часто основываются на использовании тензо- и пьезоэлектрических датчиков.

Рассмотрим управление вакуумным схватом робота вертикального перемещения при его удержании на вертикальной стене с использованием датчиков усилий пневмомеханического типа с упругим чувствительным элементом и полупроводниковым тензорезисторным преобразователем применительно к пневматическому приводу робота. Датчики встроены в управляемый вакуумный схват робота со встроенным преобразователем в электрический сигнал усилия отрыва от поверхности.

Управление процессом соприкосновения пневматического вакуумного схвата с поверхностью, прижимом и фиксацией его на поверхности в целях удержания робота может осуществляться за счет изменения степени вакуума внутри схвата посредством включения или выключения вакуум-насоса или вентилятора. Однако во многих ситуациях бывает необходимо иметь информацию об усилиях, возникающих при соприкосновении схвата с поверхностью, вдоль которой должен перемещаться робот, и о начале проскальзывания схвата вдоль поверхности, если усилие прижима недостаточно.

Система управления усилием отрыва (рис. 3.3.1) содержит датчики, встроенные усилитель, интерфейсные устройства ИБ₁ и ИБ₂ ввода и вывода информации, встроенный микропроцессор МП, электропневматический преобразователь ЭП и

исполнительный механизм ИМ. Контроллер может быть реализован на одном чипе с защитой микропрограммой управления усилием.

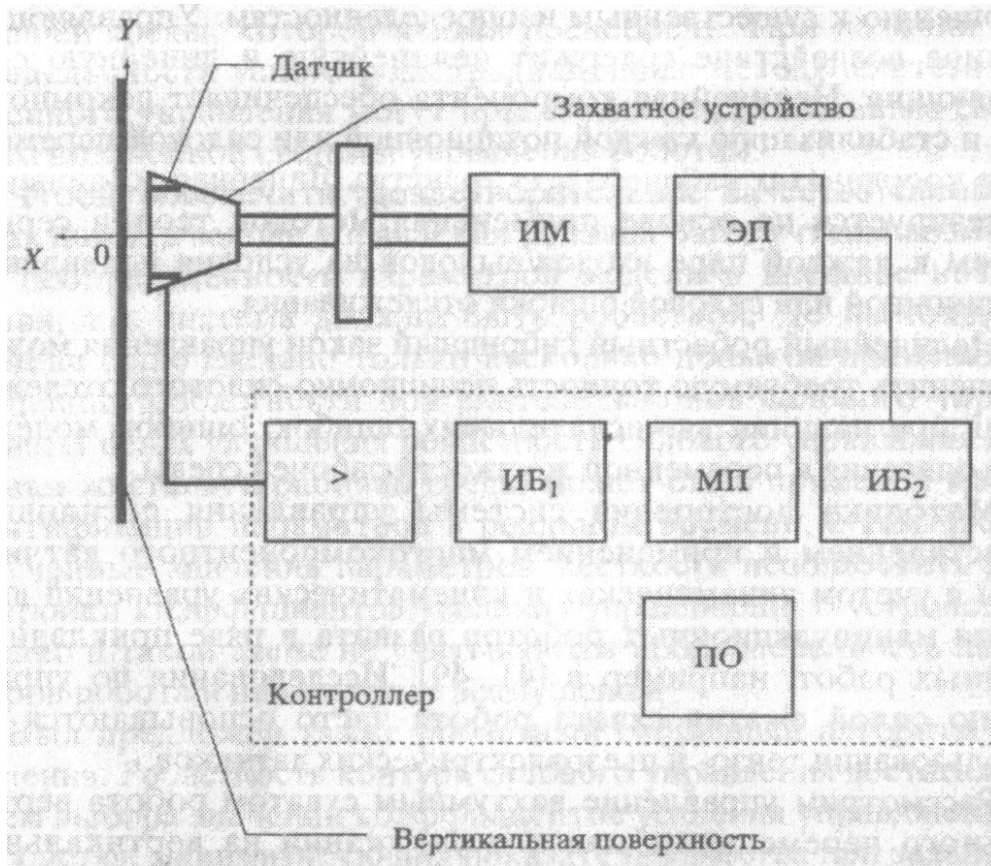


Рис. 3.3.1. Принципиальная схема системы управления по усилию захватными устройствами робота вертикального перемещения

Экспериментальные исследования подтвердили перспективность использования контроллера, формирующего алгоритм управления, построенного на микропроцессоре. При этом микропроцессор, работая в режиме разделения времени, используется и для управления механизмами, осуществляющими транспортные и ориентирующие движения.

Для соприкосновения с вертикальной поверхностью движение схвата и робота осуществляется в направлении оси X , а возможное проскальзывание при недостаточном вакууме или усилии прижима происходит вдоль оси Y .

Постановка задачи механики и управления пневматическим схватом по усилию отрыва состоит в том, чтобы, получая априорную информацию о давлении в зоне схвата и проскальзывании относительно губок схвата, обеспечить необходимое усилие прижима, находящееся в заданных пределах. При этом должна форми-

роваться такая функция управления $\Phi(t)$, при которой пневмопривод схвата развивает заданное усилие прижима $F(t)$. Рассматриваются методы управления, реализующие соответственно линейный, экспоненциальный и дискретный законы

управления:

$$F_T - F(t) = C\lambda t, \quad (3.3.1)$$

$$F_T - F(t) = Ce^{-\lambda t}, \quad (3.3.2)$$

$$F_T - F(t) = \begin{cases} 1, & |x| < a \\ 0, & |x| \geq a \end{cases} \quad (3.3.3)$$

где F_T – требуемое значение силы прижима; $F(t)$ – текущее (формируемое) значение силы; x – текущая координата перемещения площадки соприкосновения схвата с вертикальной поверхностью; a – зона необходимого давления прижима или отрыва; t – время; корни характеристического уравнения движения системы $\lambda < 0$, переходный процесс по ошибке $\delta F(t) = F_T - F(t)$ должен приближаться к требуемой зависимости.

Усилие прижима возникает в результате взаимодействия торцевой поверхности схвата с поверхностью стены, по которой движется робот. Формирование необходимого усилия или давления прижима происходит с момента касания стены торцом схвата при их дальнейшем движении в направлении, перпендикулярном плоскостям торца схвата, т.е. по оси X , в некоторой зоне ($a = a_0 - \delta a$). Величина a_0 соответствует моменту времени начала соприкосновения торцевой поверхности схвата с поверхностью перемещения робота, значение δa представляет собой упругую деформацию торца схвата, измеряемую и преобразуемую в управляющий сигнал. Зона, в которой текущее значение усилия прижима становится равным требуемой или заданной величине, мы назовем зоной необходимого давления прижима. Когда значение координаты x перемещения торца схвата становится меньшим по модулю величины $|x| < a$, текущее значение силы прижима достигает требуемого значения. В этом случае $F_T = F(t)$, дальнейшего движения схвата не должно происходить и выполняется зависимость (3.3.3) при дискретном законе управления.

Для реализации экспоненциального и линейного законов управления структура контроллера строится в соответствии со схемой на рис. 3.3.2. В линейной аппроксимации поведение управляющей части системы характеризуется уравнением третьего порядка при определенных допущениях [20, 6].

При допущениях относительно изотермичности газодинамического процесса в пневматическом приводе движение схвата, закрепленного на штоке поршня пневматического привода, может быть аппроксимировано следующим уравнением

движения:

$$\begin{aligned}
 b_3 \ddot{F}(t) + b_2 \dot{F}(t) + b_1 \dot{F}(t) + b_0 F(t) &= a \Phi(t); \\
 b_0 &= \frac{2 f_{\Pi} p}{f_0 \eta}; \\
 b_1 &= \frac{h^{1/2} v + \zeta_T c_0 h (k p \theta)^{1/2}}{c_0 \eta h (k p \theta)^{1/2}}; \\
 b_2 &= \frac{v \xi_T + m c_0 h (k p \theta)^{1/2}}{c_0 h \eta (k p \theta)^{1/2}};
 \end{aligned} \tag{3.3.4}$$

Здесь R – газовая постоянная; θ, p – температура и давление воздуха в емкости приводного цилиндра; f_{Π}, m, v – площадь поршня, приведенная масса поршня и схвата, объем рабочей полости поршня; η, ξ_T – коэффициенты нагрузки и вязкого трения; h, f_0, μ_0 – ширина и эффективная площадь выходного отверстия сопла в начальный момент.

Следуя работе [41], найдем, что функция управления $\Phi(t)$ или $\Phi(F)$, при которой пневмопривод схвата развивает заданное усилие прижима $F(t)$, соответственно для законов (3.3.1) и (3.3.2) выражается в виде

$$\begin{aligned}
 \Phi_T(F) &= \frac{b_0}{a} F_T - \frac{1}{a} B(\lambda) [F_T - F(t)], \\
 \Phi_T(t) &= \frac{b_0}{a} F_T - \frac{1}{a} B(\lambda) c \lambda t, \\
 \Phi_T(t) &= \frac{b_0}{a} F_T - \frac{1}{a} B(\lambda) c e^{-\lambda t}.
 \end{aligned} \tag{3.3.5}$$

Недостатком пневматических методов управления усилием прижима, реализующих линейный и экспоненциальный зако-

ны согласно (3.3.1) и (3.3.2), является невозможность обеспечения требуемой точности дозирования усилия в основном вследствие сжимаемости воздуха ($\sim 10\%$ по усилию), а реализация пневматического метода, соответствующего соотношению (3.3.3), обеспечивает более высокие показатели. Вместе с тем отметим, что компенсация погрешностей методов (3.3.1) и (3.3.2) и улучшение динамических свойств могут быть достигнуты введением коррекции программным путем с помощью управляющего контроллера.

Метод дискретного управления (3.3.3) реализуется с помощью контроллера по структурной схеме с аperiodическим звеном в обратной связи (рис. 3.3.3), представляющим в первом приближении датчик давления с упругим элементом.

Управление ведется по ошибке рассогласования между требуемым и текущим измеренным значениям усилий в каждый момент времени. Сигнал рассогласования в зависимости от знака осуществляет открытие, закрытие или остановку дискретной подачи воздуха в полость цилиндра исполнительного пневматического органа.

Динамика дискретной части системы в первом приближении может быть представлена в виде уравнения второго порядка с членом в правой части, определяющим дискретно изменяющуюся нагрузку:

$$T_0 \ddot{x} + \dot{x} = k \Phi(t) \operatorname{sign} x \quad (|x| > \Delta x)$$

$$T_0 \ddot{x} + \dot{x} = 0 \quad (|x| \leq \Delta x).$$

В микропроцессоре закон управления на каждом шаге реализуется в форме дифференциально-разностного уравнения:

$$\frac{1}{(\Delta t)^2} (x_n - 2x_{n-1} - x_{n-2}) + \frac{1}{\Delta t} (x_n - x_{n-1}) = k \Phi(t) \operatorname{sign} x.$$

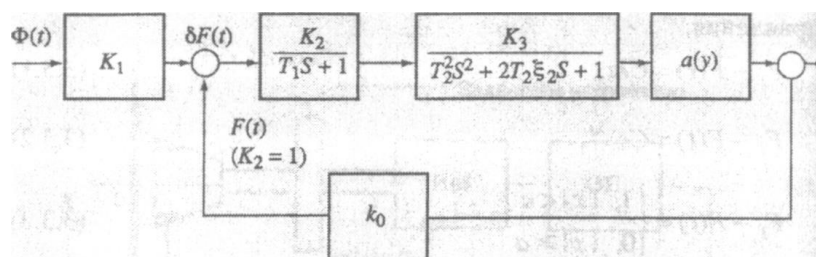


Рис. 3.3.2. Структурная схема контроллера для реализации экспоненциального и линейного законов управлений

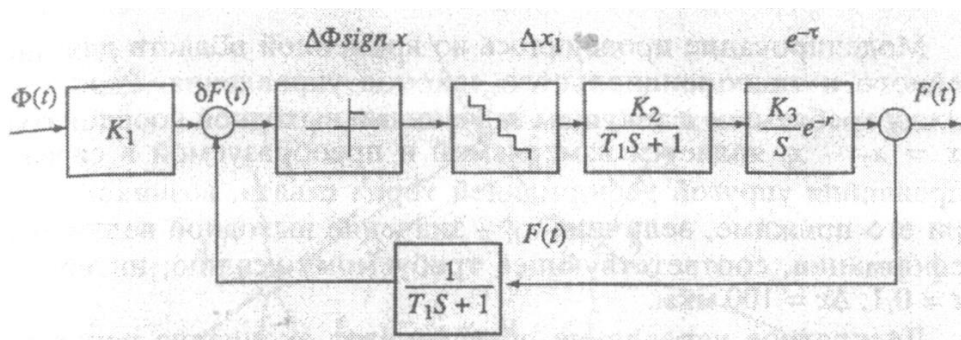


Рис. 3.3.3. Структурная схема контроллера для реализации дискретного закона управления

Моделирование проводилось во временной области для линейного и экспоненциального законов управления. Разность между требуемым и текущим значениями выходной координаты $\Delta x = x_T - x_0$ является измеряемой и преобразуемой в сигнал управления упругой деформацией торца схвата, возникающей при его прижиге, величина x_n - значение выходной величины деформации, соответствующее требуемому усилию; интервал $\Delta t = 0,1$; $\Delta x = 100$ мкм.

Дискретное управление обеспечивает окончание переходного процесса приблизительно в 2 раза быстрее по сравнению с непрерывным линейным и экспоненциальным.

4. Планирование движения робота в динамически изменяющейся среде

Метод планирования и оптимизации траектории движения робота к недетерминированной среде. Рассмотренные выше принципы и методы управления роботами, способными автономно перемещаться в недетерминированной среде, достаточно сложны и предполагают наличие сложного программного продукта и больших вычислительных мощностей. Эти методы ставят своей целью создание полностью автономного робота, который использует при планировании траектории движения цифровую карту местности, или основываются на заложенной в памяти компьютера базе данных об окружающем мире. Таким образом, предполагается использование принципа автоматического управления роботом на стратегическом уровне.

Предлагаемый метод планирования траектории движения робота в недетерминированной среде предполагает переход с командного принципа управления на исполнительном уровне к супервизорному принципу на стратегическом уровне. Основой этого метода является использование оптимального набора датчиков си-

системы очувствления робота и минимальных программных и вычислительных ресурсов. Все указанное позволяет; планировать траекторию движения робота в процессе самого движения. Кроме того, предлагаемые процедуры позволяют оптимизировать планируемые траектории по критериям точности, безопасности, экономичности и быстродействию.

Предполагается, что робот и препятствия движутся вначале с постоянными скоростями по своим собственным траекториям и их встреча предполагается в точке В (рис. 3.4.1). В дальнейшем их скорости могут быть переменными. Сенсорная система робота обеспечивает получение необходимой информации о

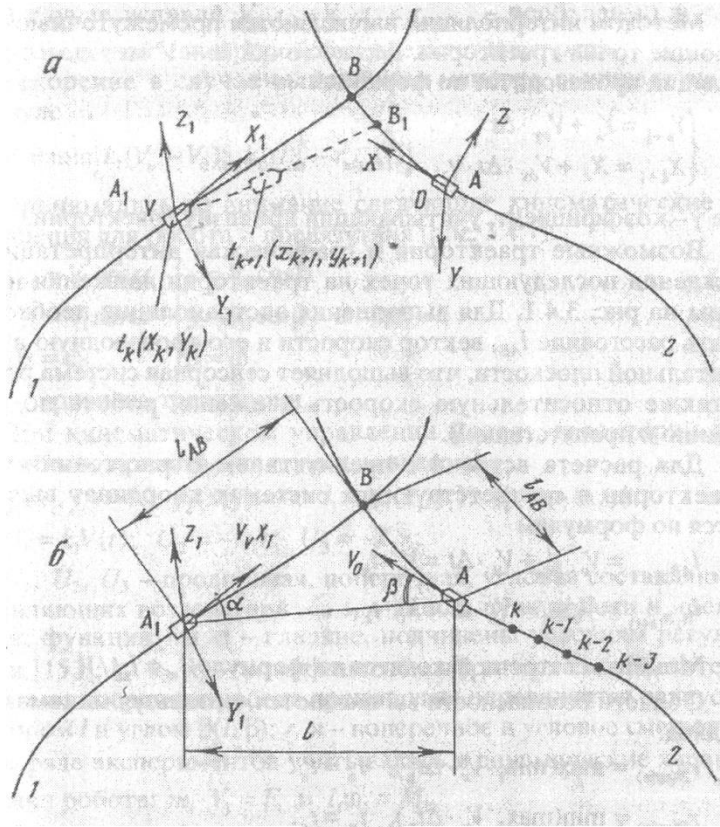


Рис. 3.4.1. Возможные траектории движения робота и препятствия

а - начальное положение; **б** - предсказание точки встречи

навигации: данные об относительных расстояниях, углах наклона к горизонту и скоростях. Введем следующие обозначения (рис. 3.4.1а): 1 - траектория движущегося робота V; 2 - траектория подвижного препятствия B. $A_1 X_1 Y_1 Z_1$ - система координат, связанная с роботом; $AXYZ$ - система координат, связанная с препятствием. Бортовая система навигации и ориентации робота, включая измерительный лазер, осуществляет измерение расстояния между роботом и препятствием в каждый момент времени k ($k-3$; $k-2$; $k-1$) (рис. 3.4.1б). Затем бортовой компьютер рассчитывает траекторию движения препятствия, используя метод интерполяции, и затем выполняет экстраполяцию предполагаемой траектории препятствия. Расстояния L_{AB} в

каждый момент движения k вычисляются на основе метода экстраполяции посредством решения задачи триангуляции.

Методом интерполяции вычисляются промежуточные уточняющие точки траектории. Расчет точки " $k + 1$ " методом экстраполяции производится по формуле

$$\begin{cases} Y_{k+1} = Y_k + V_{oy} \cdot \Delta t \\ X_{k+1} = X_k + V_{ox} \cdot \Delta t \cdot \gamma, \end{cases}$$

где γ – коэффициент, учитывающий кривизну траектории.

Возможные траектории и графическая интерпретация нахождения последующих точек на траектории движения приведены на рис. 3.4.1. Для выполнения экстраполяции необходимо знать расстояние l_{AB} , вектор скорости и его производную в горизонтальной плоскости, что выполняет сенсорная система робота, а также относительную скорость движения робота по отношению к препятствию В.

Для расчета встречи с препятствием В расстояния вдоль траектории в соответствующих системах координат вычисляются по формулам

$$l_{AB(k+1)} = V_v \cdot t_k + V_v \cdot \Delta t = V_v \cdot t_k$$

$$l_{A_1B(k+1)} = V_0 \cdot t_k + V_0 \cdot \Delta t = V_0 \cdot t_k$$

Моменты встречи находятся по формуле $t_b = l_{ab} / V_v$.

Области безопасности вычисляются, используя минимаксный подход:

$$r_{B(\text{safe})} = \max(\min, V_v \cdot \Delta t_b), \quad t_b = t_s$$

$$r_{B(\text{safe})} = \min(\max, V_v \cdot \Delta t_b), \quad t_b = t_s.$$

Выражения $V_v \cdot \Delta t_b$; $V_v \cdot t_b$ и $V_0 \cdot \Delta t_b$; $V_0 \cdot t_b$ вычисляются на каждом шаге "K".

Оценка относительного положения робота и препятствия определяется на основе следующих выражений для случаев:

$$V_v \cdot t_b > V_0 \cdot t_b \text{ или } V_v \cdot t_b < V_0 \cdot t_b$$

$$\begin{cases} V_v \cdot t_b - V_0 \cdot t_b \geq r_{b(\text{safe})} \\ V_0 \cdot t_b - V_v \cdot t_b \geq r_{b(\text{safe})} \end{cases}$$

Если эти условия выполняются, то возможно продолжение движения вдоль базовой траектории.

В случае условий вида $V_v \cdot t_b = V_0 \cdot t_b$, необходимо тормозить и обходить препятствия.

В случае условий $V_v \cdot t_b - V_0 \cdot t_b < r_{b(\text{safe})}$ – необходимо выполнить локальный маневр и обойти препятствие слева.

В случае условий $V_0 \cdot t_b - V_v \cdot t_b < r_{b(\text{safe})}$ – необходимо выполнить локальный маневр и обойти препятствие справа.

Ускорение в случае выполнения маневра вычисляется по формуле

$$\dot{V} = \min[k_1(V_v - V_0); k_2(l_{ab} - r_{b(\text{safe})})].$$

Принимались во внимание следующие кинематические соотношения для робота и препятствия (рис. 3.4.1):

$$\begin{cases} x_1 = V_1 \cos \alpha \\ y_1 = V_1 \sin \alpha \\ \dot{\alpha} = \omega_1 \end{cases} \quad \begin{cases} x = V_0 \cos \beta \\ y = V_0 \sin \beta \\ \dot{\beta} = \omega \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{x} = \gamma(l) \cdot \dot{l} \\ \dot{y} = \gamma(l) \cdot \dot{l} \end{cases}$$

где γ – кривизна траектории.

При кинематическом управлении модель траекторий движения была принята в следующем виде:

$$f_1(x_1, y_1) = 0; \quad f_2(x, y) = 0; \quad l_1 = \varphi_1(x_1, y_1); \quad l_2 = \varphi_2(x, y);$$

$$U_1 = k_1 V(t); \quad U_2 = -k_2 r; \quad U_3 = -k_3 x;$$

где U_1, U_2, U_3 – продольная, поперечная, угловая составляющие управляющих воздействий; l_1, l_2 – длины пути робота и препятствия; функции f и φ – гладкие, подчинены условиям регулярности [153]; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты обратных связей системы; в системе координат робота препятствие определяется радиусом-вектором l и углом $\beta(l, \beta)$; r, κ – поперечное и угловое смещения.

В ряде экспериментов учитывались и динамические характеристики робота: $m_1 \cdot \dot{V}_1 = F_1$ и $I_1 \omega_1 = M_1$.

Предлагаемый метод планирования траекторий допускает следующие ограничения:

- робот движется к препятствию В с постоянной скоростью по базовой траектории;
- траектория робота может корректироваться в процессе движения;
- сенсорная система выдает необходимую информацию для навигации и коррекции базовой траектории;
- движение происходит в плоской системе координат.

Критерии оптимизации траектории движения робота. Полученные отрезки траектории управления должны быть проанализированы и должна быть выбрана наилучшая из возможных траекторий. Для того чтобы это осуществить, для каждого отрезка траектории необходимо вычислить значение специальной функции и затем должна быть выбрана траектория с наименьшим значением.

Эта функция выбирается в качестве критерия оптимизации.

Оптимизация по быстродействию. Для каждого управляемого отрезка траектории должна быть подсчитана конечная позиция. Пусть это будет точка А с координатами x_a, y_a .

Тогда из заданной точки М пути можно выбрать точку, которая находится ближе всего к точке А. Эта точка принимается в качестве текущей точки пути с координатами x_i, y_i .

Следующей после текущей точки является точка, к которой направляется робот. Эта точка принимается за точку отсчета направления с координатами x_{i+1}, y_{i+1} .

Теперь можно подсчитать оставшуюся длину пути. Это будет сумма дистанций между точкой отсчета направления и точкой А и длин всех отрезков пути, которые лежат между точкой отсчета направления и концом пути.

Оставшаяся длина пути является величиной функции критерия по быстродействию.

Таким образом, оптимизируемый функционал можно записать в следующем виде:

$$J = D(x_a, y_a, x_{i+1}, y_{i+1}) + \sum_i D(x_i, y_i, x_{i+1}, y_{i+1}),$$

где D есть функция расстояния между точками.

Оптимизация по точности. Введем функцию L – расстояния между точкой с координатами (x, y) и отрезком, соединяющим точки (x_1, y_1) и (x_2, y_2) – $L(x, y, x_1, y_1, x_2, y_2)$.

Проведем перпендикуляр от заданной точки к линии, содержащей указанный отрезок. Предположим, что C – точка пересечения перпендикуляра и линии. Координаты этой точки:

$$x_c = \frac{(x_2 - x_1) \cdot (y - y_1) \cdot (y_2 - y_1) + x \cdot (x_2 - x_1)^2 + x_1 \cdot (y_2 - y_1)^2}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2};$$

$$y_c = \frac{(y_2 - y_1) \cdot (x - x_1) \cdot (x_2 - x_1) + y \cdot (y_2 - y_1)^2 + y_1 \cdot (x_2 - x_1)^2}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

В случае, если отрезок содержит точку C , функция определяет длину перпендикуляра:

$$L(x, y, x_1, y_1, x_2, y_2) = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}.$$

В других случаях функция определяет по крайней мере расстояние от заданной точки до конца отрезка:

$$L(x, y, x_1, y_1, x_2, y_2) = \min \left(\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2}, \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2} \right).$$

Теперь можно определить функцию изменения расстояния от заданной точки до конца пути. Прежде всего определим текущую точку (x_c, y_c) . Текущая точка является общей для двух соседних отрезков пути. Функция определяет дистанции от заданной точки до этих двух отрезков:

$$P(x(t), y(t), c(x, y)) = \min(L(x, y, x_{c-1}, y_{c-1}, x_c, y_c), L(x, y, x_c, y_c, x_{c+1}, y_{c+1})).$$

Теперь для каждого варианта управления можно подсчитать сумму расстояний между промежуточными позициями робота вдоль пути. Это будет критерием для данного способа оптимизации. Соответствующий функционал равен:

$$J = \sum_{t_0 < t < t_0 + d_t \cdot N} [P(x(t), y(t), c(x, y))].$$

Оптимизация по безопасности. В этом случае критерием служит расстояние между роботом и ближайшим препятствием. Если координатами препятствия k являются (x_k, y_k) , то соответствующий функционал будет выглядеть как:

$$J = \min_{0 \leq k \leq m} (P(x_a, y_a, x_k, y_k)).$$

Оптимизация по экономичности. Предполагается, что расход энергии пропорционален ускорению робота, если оно направлено по движению или равно 0 во всех других случаях. Поэтому критерием является число шагов в контрольной цепи n , которые организуют ускорение робота по ходу движения.

Соответствующий функционал запишется как $J = n$.

Исследования с использованием предложенных критериев оптимизации проводятся на базе разработанной программы планирования и оптимизации траектории движения робота. Программа построена на основе системы предупреждения столкновений роботов, разработанной в Институте проблем механики РАН. В процессе доработки в программу введена кинематическая схема робота, выбранная в процессе проведения исследований. Кроме того, расширены граничные условия использования робота, позволяющие планировать траекторию движения практически в любом направлении. И, наконец, в алгоритм программы включены критерии, позволяющие оптимизировать планируемую в процессе движения робота траекторию.

При этом необходимо учитывать, что оптимизационные критерии являются безразмерными, "весовыми" величинами. Алгоритм программы выполнен таким образом, что сумма указанных критериев равна 1. Таким образом, исследования

можно проводить, меняя значения одновременно всех критериев. Если, например, значение критерия быстродействия задано единицей, то все остальные автоматически становятся нулями. В случае задания некоторых (обязательно меньше 1) значений всех критериев оптимизации они также автоматически юстируются до достижения суммарного значения, равного 1.

Особенности и структура системы планирования траектории движения.

Эффективное управление роботом в значительной степени зависит от качества системы планирования траектории в процессе движения, обеспечивающей выполнение различных маневров, преодоление или обход препятствий, выполнение поставленной технологической задачи. Система планирования траектории предназначена для моделирования движения роботом, строится по модульному принципу

[15] и состоит из программных модулей, предназначенных для реализации алгоритмов управления при выполнении поставленных задач движения роботом в динамически изменяющихся условиях внешней среды. Рассматриваемая система учитывает особенности и требования, предъявляемые к движению робота, использует критерии оптимизации, может быть применена для управления движением, строится по модульному принципу, а программные модули реализуют быстродействующие алгоритмы. Гибкая система программных модулей предусматривает наращивание сложности решаемых задач и введение новых дополнительных требований.

Система моделирования состоит из следующих программных модулей (рис. 3.4.2):

модуль 1 - анализ ситуации в реальном времени;

модуль 2 - коррекция траектории и планирование движения;

модуль 3 - управление с обходом препятствий;

модуль 4 - выполнение маневров;

модуль 5 - программный интерфейс информационных связей. Система построена по иерархическому принципу и имеет два уровня - тактический и стратегический. На стратегическом уровне применяется модуль выполнения маневров и происходит обмен информацией между модулями. Взаимодействие между программными модулями выполняется посредством модуля программного интерфейса. Предполагается, что сенсорная система определяет три линейные координаты x , y , z и три угловые координаты α , β , γ в каждый момент времени t движения робота. Используется также информация об окружающей среде, в которой могут перемещаться объекты с определяемыми в процессе движения параметрами h , m , l , v . Информационный обмен между модулями 1 и 2, 1 и 4, 3 и 5 и другими осуществляется во время мониторинга. Алгоритмы управления

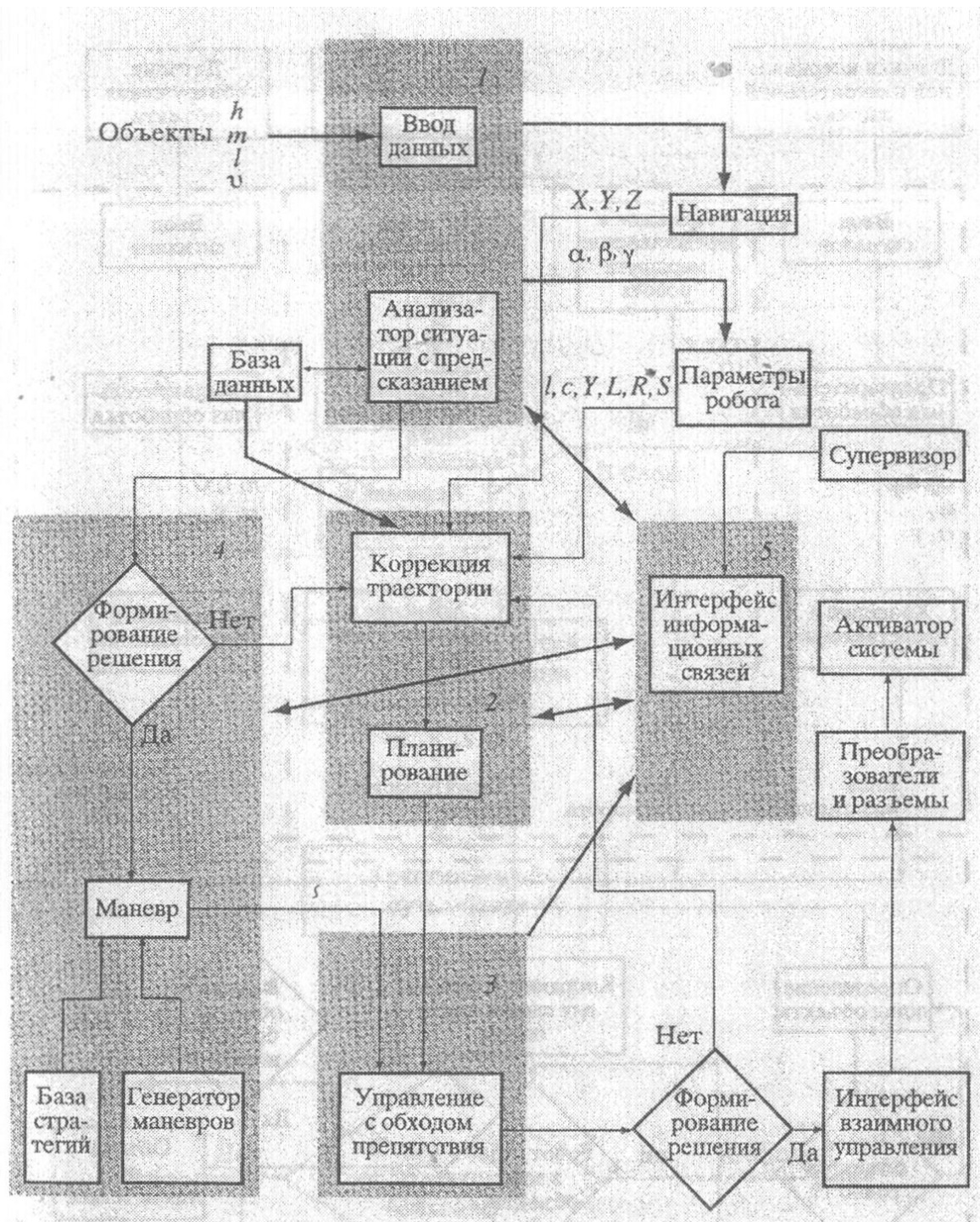


Рис. 3.4.2. Структура программных модулей

движением строятся на основе линейной модели робота и применения обратных связей об исполнении команд на выполнение движения.

Объекты описываются по их принадлежности, геометрии, отношению к другим объектам, нагрузкам, пространственным взаимодействиям и рабочим связям.

Программные модули анализатора ситуации (рис. 3.4.3), коррекции траектории и планирования движения (рис. 3.4.4), управления движением с возможностью обхода препятствий

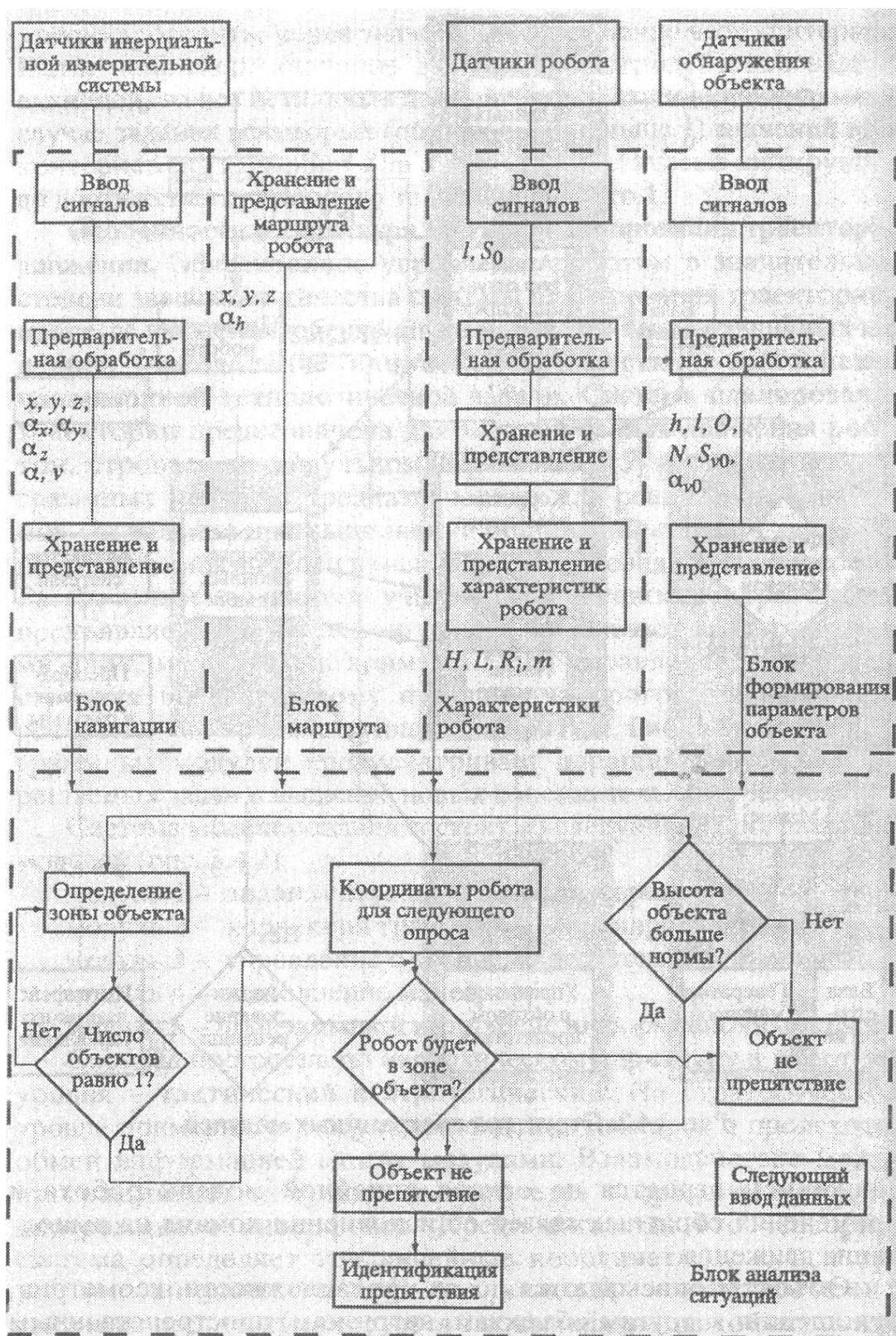


Рис. 3.4.3. Модуль анализатора ситуаций

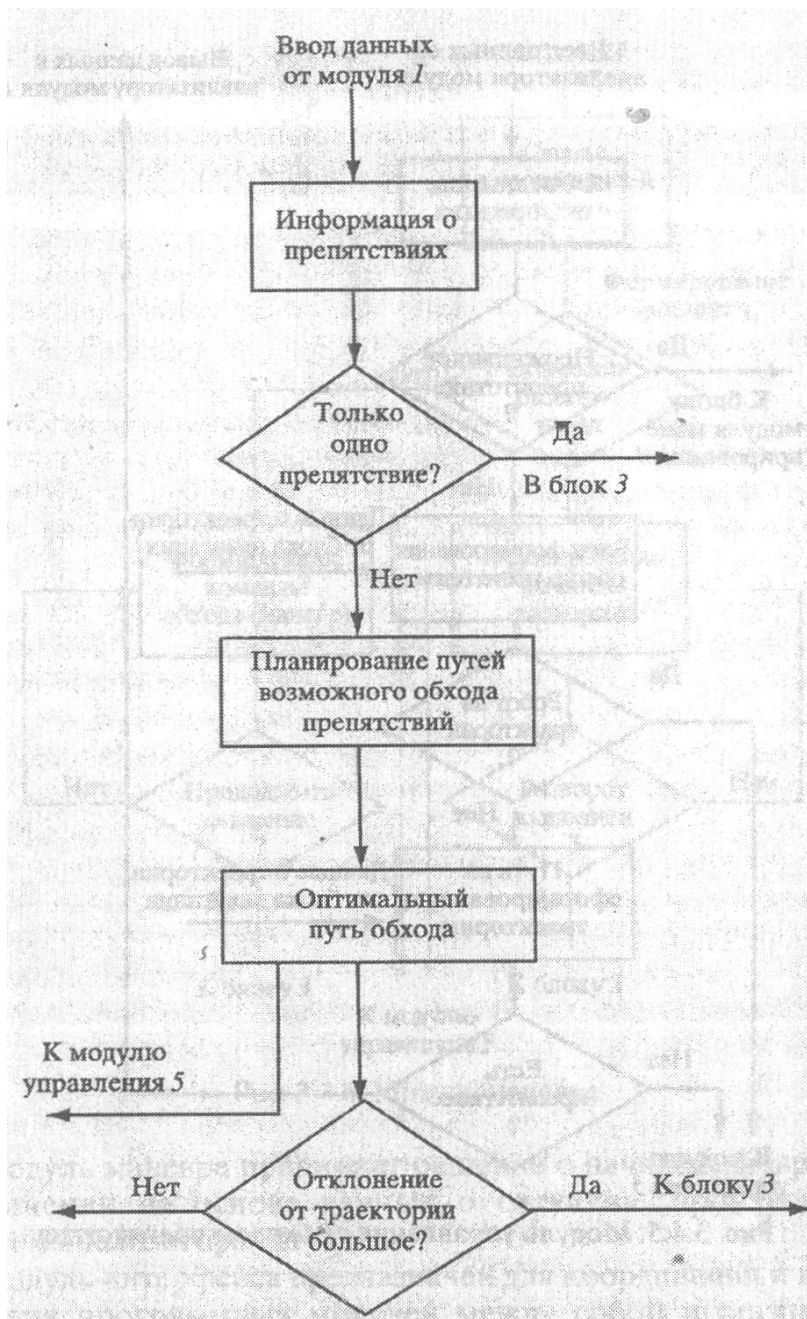
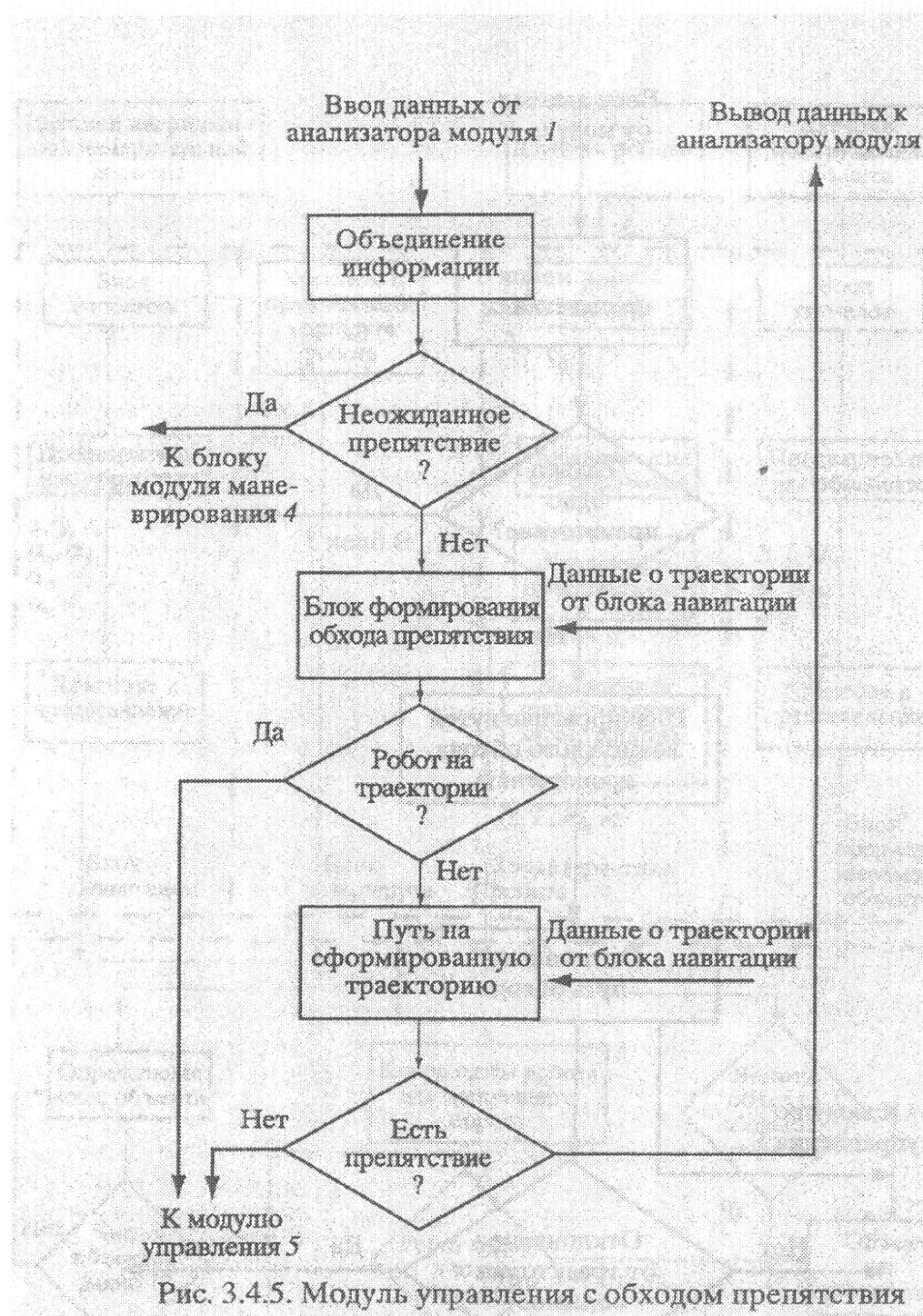


Рис. 3.4.4, Модуль коррекции траектории и планирования

(рис. 3.4.5), маневрирования в случае необходимости (рис. 3.4.6) реализуют соответствующие алгоритмы движения на языке C++.

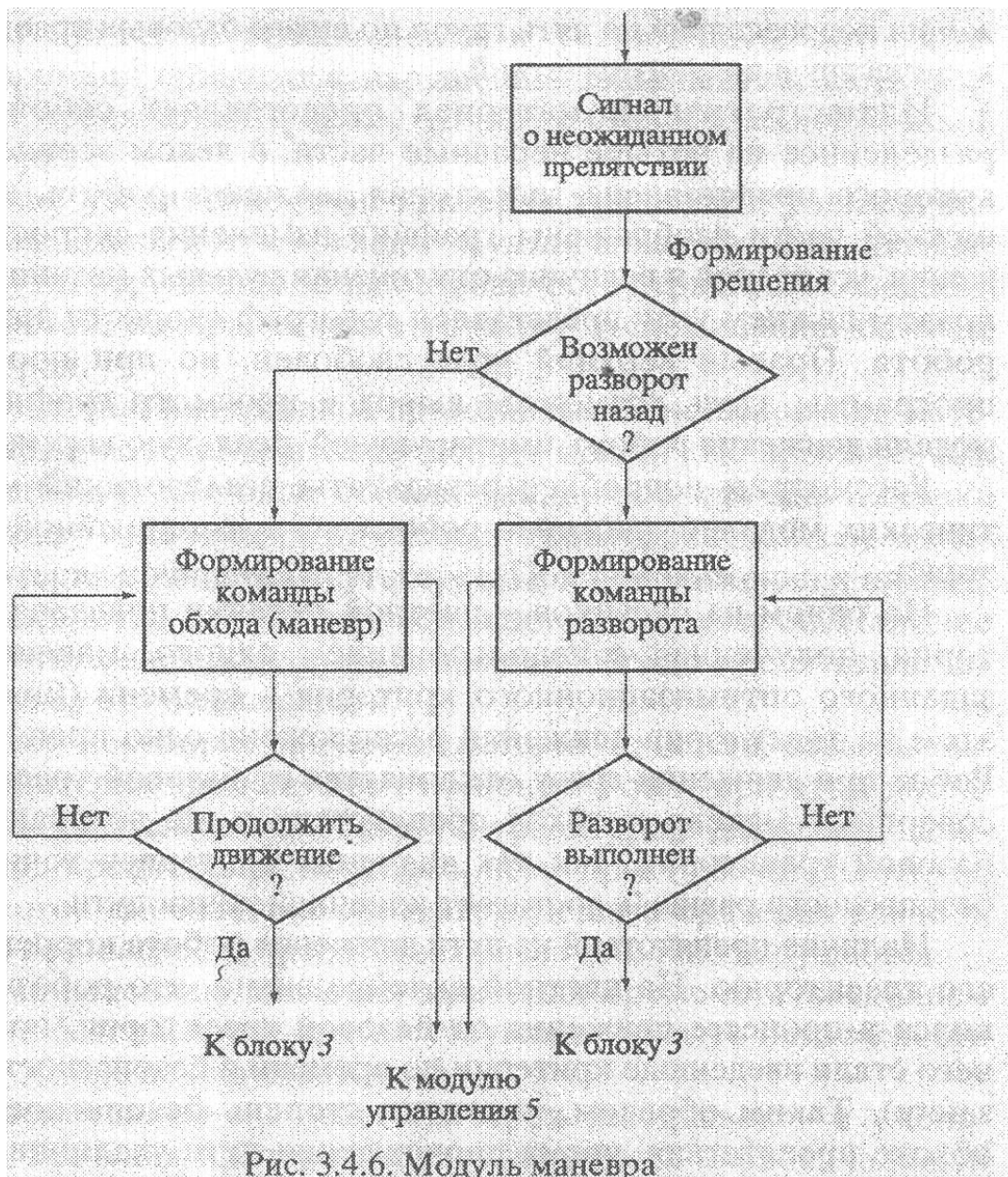
Модуль анализа ситуаций принимает информацию от датчиков и формирует параметры объекта и среды, производит идентификацию объектов и определяет их характеристики.

Посредством модуля планирования и коррекции траектории движения решаются задачи формирования пути, выбора опти-



мального пути, принятия решения о необходимости возвращения на программную траекторию движения или коррекции первоначальной траектории.

Модуль управления с обходом препятствий выполняет задачи анализа временных характеристик при наличии препятствий, принятия решений о необходимости совершения маневров в случае появления препятствий, формирует траекторию обхода препятствий и прокладывает путь возвращения на заданную траекторию.



Модуль маневра принимает решение о начале маневра и его выполнении на основе данных о ситуации, произведенном модулем анализатора ситуаций.

Модуль интерфейса предназначен для координации и взаимодействия программных модулей между собой и организации диалога с пользователем системы моделирования или управления.

Результаты исследования моделей движения робота с обходом препятствий в динамически изменяющейся среде. Математические модели движения робота – это траектории, получаемые в результате проведения исследований с использованием оптимизационных критериев. Инструментом проведения исследований служит программа, выполненная на языке C++ и разработанная специально для этих целей.

Вся программа исследований математических моделей движения подразделена на пять групп по видам базовых траекторий, количеству и виду препятствий.

Иллюстративный материал представляет собой окно, разделенное на четыре неравные части, в левом верхнем углу которого представлена траектория движения робота, в левой, нижней части изображены графики изменения скорости движения, ускорения и величина отклонения рулевых механизмов. В правом нижнем углу представлен годограф скорости движения робота. Правый верхний угол свободен, но при просмотре программы здесь возможны вывод и просмотр графической модели движения робота, имитирующей реальную картину. 1

Рассмотрим подробнее результаты исследований математических моделей движения робота по прямолинейной траектории.

На одном из рисунков - цветной вклейки показана траектория, полученная с использованием одного, максимально заданного оптимизационного критерия - времени (time). При этом на траектории движения расположено одно препятствие. Робот при движении сразу отклоняется от базовой траектории, совершает маневр и обход препятствия и, не возвращаясь к базовой траектории, так как значения критериев точности и безопасности равны 0, достигает конечной точки пути.

Наличие препятствий на пути движения робота корректирует его траекторию. На цветной вклейке видно, что робот отклонился в процессе движения от базовой траектории, причиной чего стали введенные критерии по времени и безопасности (time, safety). Таким образом, увеличив степень безопасности при обходе препятствия, время прохождения пути увеличивается и происходит существенное отклонение от базовой траектории.

При увеличении значения критерия точности (precision) и фиксации значений остальных критериальных оценок и параметров движения робота планируемая траектория приближается к базовой (см. цветную вклейку).

При увеличении количества препятствий картина также изменяется. Введя некоторое значение критерия безопасности, получим более плавное прохождение траектории вдоль соответствующей зоны препятствия при сочетании с точностью движения к базовой траектории.

Увеличение доли критерия безопасности и введение критерия экономичности приводит к более точному отслеживанию планируемой траектории по отношению к базовой, более плавному обходу препятствий и при незначительном увеличении времени прохождения пути.

Дальнейшее увеличение числа препятствий наряду с уменьшением критерия безопасности и увеличением доли критерия времени приводят к нарушению зоны безопасности последнего препятствия и менее точному отслеживанию базовой траектории.

Резкое увеличение доли критерия точности и уменьшение критерия безопасности приводит к увеличению времени прохождения пути, нарушению зоны безопасности первого и последнего препятствий, но практически точному отслеживанию базовой траектории.

Достаточно интересным представляется исследование математических моделей движения робота при обходе протяженных препятствий, в том числе стенок. Так, при обходе одной стенки робот сразу отклоняется от базовой траектории, так как значение критерия точности отсутствует. При приближении к препятствию скорость движения постепенно замедляется. Наличие соответствующего критерия позволяет обойти препятствие, не входя в зону его безопасности.

Введем некоторое значение критерия точности, оставив значение критерия времени без изменения. Робот при этом достаточно четко отслеживает базовую траекторию движения, начиная обход препятствия, подходя к нему практически вплотную. Ввиду того, что значение соответствующего критерия равно 0, область безопасности препятствия незначительно нарушается.

С уменьшением значения критерия времени и введением критерия безопасности соответствующая область безопасности при его обходе не нарушается.

С увеличением значения критерия безопасности и уменьшением значения критерия точности робот в первоначальный момент времени придерживается базовой траектории. Затем происходит обход первого препятствия и последующий резкий срыв с базовой траектории. Робот приближается ко второму препятствию по кратчайшему пути, обходит его и следует к третьему препятствию, все больше удаляясь от базовой траектории. Обход последнего препятствия следует далеко за пределами зоны безопасности.

Угловые Г-образные и П-образные траектории движения с ветвями, сходящимися под углом 90° достаточно часто могут встречаться в практике применения робота. К подобного рода траекториям относятся прежде всего коридоры различных зданий и сооружений.

При движении робота по коридору здания с поворотом под углом 90° задаются некоторые значения всех оптимизационных критериев, за исключением экономичности. Превалируют критерии быстродействия и точности. Поэтому робот

первоначально придерживается базовой траектории и совершает объезд первого препятствия. Затем он сходит с базовой траектории, срезает угол коридора, по кратчайшему пути направляется ко второму препятствию и обходит его. В процессе движения нарушаются области безопасности при обходе препятствий (значение критерия безопасности мало).

Планирование замкнутых траекторий движения представляет большой интерес с точки зрения исследования возможности возвращения робота в исходную точку.

Для случая, когда заданы некоторые значения критериев быстродействия и точности, а значения критериев безопасности и экономичности равны 0, видно, что при планировании робот первоначально придерживается базовой траектории, обходит первое препятствие и, срезая угол коридора, движется ко второму препятствию. Совершив локальный маневр и обойдя второе препятствие, робот возвращается на незначительное время на базовую траекторию, движется по кратчайшему пути к третьему препятствию и обходит его. Обход последнего препятствия происходит по той же схеме. Возвращение к исходной точке траектории осуществляется по базовой траектории. Во время прохождения дистанции нарушается зона безопасности при обходе препятствий (так как значение критерия безопасности равно 0).

Рассмотрим математические модели движения робота при наличии двух препятствий-стенок, расположенных на базовой траектории друг за другом. В случае, когда критерий времени равен 1, а все остальные соответственно равны 0, планируемая траектория начинает плавно отклоняться от базовой, незначительно нарушая область безопасности при обходе препятствия. Скорость движения робота максимальная.

Если ввести некоторое значение критерия точности при соответствующем уменьшении значения критерия времени, робот четко отслеживает базовую траекторию движения, плавно обходит первое препятствие, слегка нарушив область его безопасности (так как значение соответствующего критерия равно 0). Затем планируемая траектория плавно стремится к базовой в промежутке между препятствиями и начинает обход второго препятствия. При этом также незначительно нарушается область безопасности. Уменьшение скорости движения приводит к увеличению времени прохождения траектории.

Дальнейшее уменьшение значения критерия времени и введение значений критериев безопасности и экономичности приводит к увеличению времени прохождения траектории. При этом робот практически не нарушает область безопасности препятствий.

Интересные результаты наблюдаются при дальнейшем увеличении количества препятствий-стенок. Рассмотрим случай, когда препятствия расположены на базовой траектории друг за другом в шахматном порядке.

Когда значение критерия времени максимально, а значение критерия точности минимально, планируемая траектория достаточно плавно отходит от базовой и затем обходит первое препятствие. Стремясь к базовой траектории, робот проходит в имеющийся зазор между вторым и третьим препятствиями, доходит до четвертого и плавно обходит его. При отсутствии критериев безопасности и экономичности робот вторгается в область безопасности препятствий без столкновения с ними.

Дальнейшее повышение удельного веса критериев точности и безопасности при соответствующем снижении значения критерия времени приводит к увеличению времени прохождения траектории. Одновременно отмечается более плавный обход препятствий с незначительным нарушением зоны безопасности препятствий.

Показателен случай, когда значение критерия точности повышается приблизительно втрое, значение критерия времени уменьшено на 20%, а критерии безопасности и экономичности отсутствуют. При этом планируемая траектория робота полностью соответствует базовой, робот плавно обходит первое препятствие и снова выходит на базовую траекторию. Вторгаясь в область безопасности второго и третьего препятствий, робот проходит в зазор между ними, точно придерживаясь базовой траектории, после чего происходит плавный обход последнего препятствия с резким выходом на базовую траекторию.

4. Применение компьютерного моделирования для анализа и управления многозвенным мобильным роботом повышенной проходимости

Моделирование системы распределенного управления МРПП. Моделирование результатов распределенного управления на примере многозвенного МРПП выполняется с применением алгоритмов, обеспечивающих визуальное представление на экране монитора результатов изменения структуры робота при его перемещении в реальном масштабе времени. Для организации перемещения

используются алгоритмы управления на локальном и глобальном уровнях, поскольку система распределения управления является иерархической.

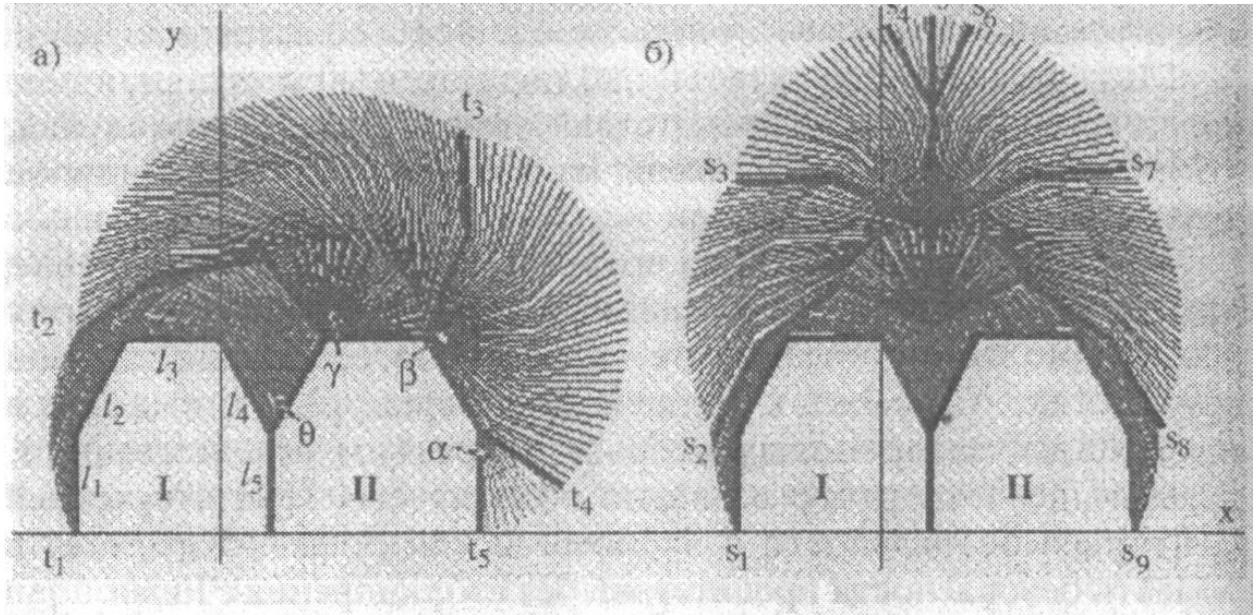


Рис. 3.5.1. Моделирование движений робота путем распределенного поворота звеньев

При этом используются ветвящиеся алгоритмы, а в алгоритмах локального уровня предусматривается оптимизация по конкретным параметрам, определяющим конструкцию или механику движения, а также по функциональному выполнению операций, например, возможность обхода препятствий.

В алгоритмах глобального уровня в ряде случаев предусматривается возможность реализации принятия простейших решений о дальнейшем движении в зависимости от изменения оперативной обстановки, а также выполняется координационное управление. Рассмотрим задачу планирования при распределенном управлении движением многозвенового МРПП.

Внешний вид робота с пятью звеньями представлен на рис. 3.5.1. Отличительной особенностью данного робота является возможность движения по наклонным и вертикальным поверхностям, переход с одной поверхности на другую, если они расположены под углом одна к другой или находятся на некотором расстоянии, преодоление препятствий определенной высоты и ширины в зависимости от размеров робота, движение внутри сложных конструкций (например, трубопроводов).

Робот удерживается на поверхности перемещения захватными устройствами в виде вакуумных присосок, постоянных магнитов, электромагнитов или механических пальцев, обычно расположенных на концах крайних звеньев или опор.

Робот предназначен для выполнения различных технологических операций в сложных и опасных для здоровья человека средах и условиях. Он может работать в супервизорном и автономном режимах на земле, под водой и в космосе.

Движение робота выполняется за счет вращения его отдельных звеньев в шарнирах, которые имеют две степени подвижности, с помощью электродвигателей с редукторами. Например, для робота, который состоит из пяти звеньев и четырех промежуточных шарниров, движение конечного элемента (захвата, технологического инструмента) может быть реализовано с использованием восьми степеней подвижности. Именно эта высокая степень подвижности позволяет перемещаться по поверхностям с довольно сложной конфигурацией, по энергетическим установкам, реакторам, поверхности спутников и т.п. и проникать внутрь изделий.

Конструкция робота позволяет сделать его полностью автономным. Одним из главных условий обеспечения безопасности его работы при надежном удержании на поверхности является создание минимального момента, действующего в точке контакта неподвижной опоры с поверхностью и вызывающего отрыв этой опоры при движении по наклонной или вертикальной поверхности или его опрокидывание при движении по горизонтальной поверхности.

Методами компьютерного моделирования могут быть проведены исследования по выполнению роботом различных способов перемещения ("походок") по различным поверхностям: горизонтальной, вертикальной, по потолку. Для этого разработаны соответствующие алгоритмы с целью обеспечить оптимальные режимы нагрузок на приводные моторы и схваты.

Как указывалось ранее, робот может двигаться по поверхности при транспортном перемещении или переносить в пространстве подвижную опору и расположенный на ней технологический инструмент за счет вращения отдельных звеньев. Выполнение этих вращений в необходимой последовательности, а также при определенном сочетании или распределении, позволяет реализовать как прямолинейные вдоль осей A , Y , Z или под углом к ним движения, так и по сложным пространственным траекториям.

Рассмотрим моделирование движений многозвенового МРПП, которое выполнялось с использованием персонального компьютера и языка программирования C++ для случаев:

- моделирование распределенного управления перемещением;

- моделирование распределенного управления движением по вертикальной поверхности с учетом получения минимально возможного опрокидывающего момента;
- моделирование распределенного управления при перемещении МРВП в трубе.

Моделирование распределенного управления перемещением многозвенного МРПП. Пусть робот занимает исходное положение **1** в плоскости, как это показано на рис. 3.5.1а. Наиболее простым решением по реализации переноса опоры в плоскости из точки t_1 в точку t_5 , т.е. для выполнения одного шага, состоит в последовательном повороте звена l_4 на угол θ , звена l_3 - на угол γ , звена l_2 - на угол β и звена l_1 - на угол α . Последовательность углов поворота можно изменять, а углы поворота разделить на отдельные части. Кроме того, повороты всех звеньев можно выполнить одновременно для сокращения времени транспортировки подвижной опоры, а также распределенно, если того требуют условия движения. В зависимости от этого траектории движения свободной опоры будут самыми различными. Мы не будем останавливаться на подробностях работы алгоритмов, математических программ и используемых формул для расчета конфигурации робота при поворотах звеньев, а представим и обсудим только результаты вычислений, которые : обычно выводятся на экран монитора в графической или цифровой формах. Анализируя эти результаты, не сложно обеспечить в дальнейшем соответствующее распределенное управление приводами для достижения необходимой цели при сложном движении. Например, для первого простого случая при походке "акробат", когда шаг выполняется последовательным поворотом сначала звена l_4 , затем звеньев l_3 , l_2 , моделирование показывает, что это будет кривая $t_1-t_2-t_3-t_4-t_5$. Для второго случая, когда каждый угол поворота разделен на две части, это будет кривая $S_1-S_2-S_3-S_4-S_5-S_6-S_7-S_8-S_9$ (рис. 3.5.1б).

Для сравнения на рис. 3.5.2в показана диаграмма движения робота, когда сначала поворачивается звено 1, затем 2, 3, 4 и 5 и далее в обратном порядке. На рис. 3.5.2 г выполняется одновременный поворот всех звеньев с одинаковой скоростью.

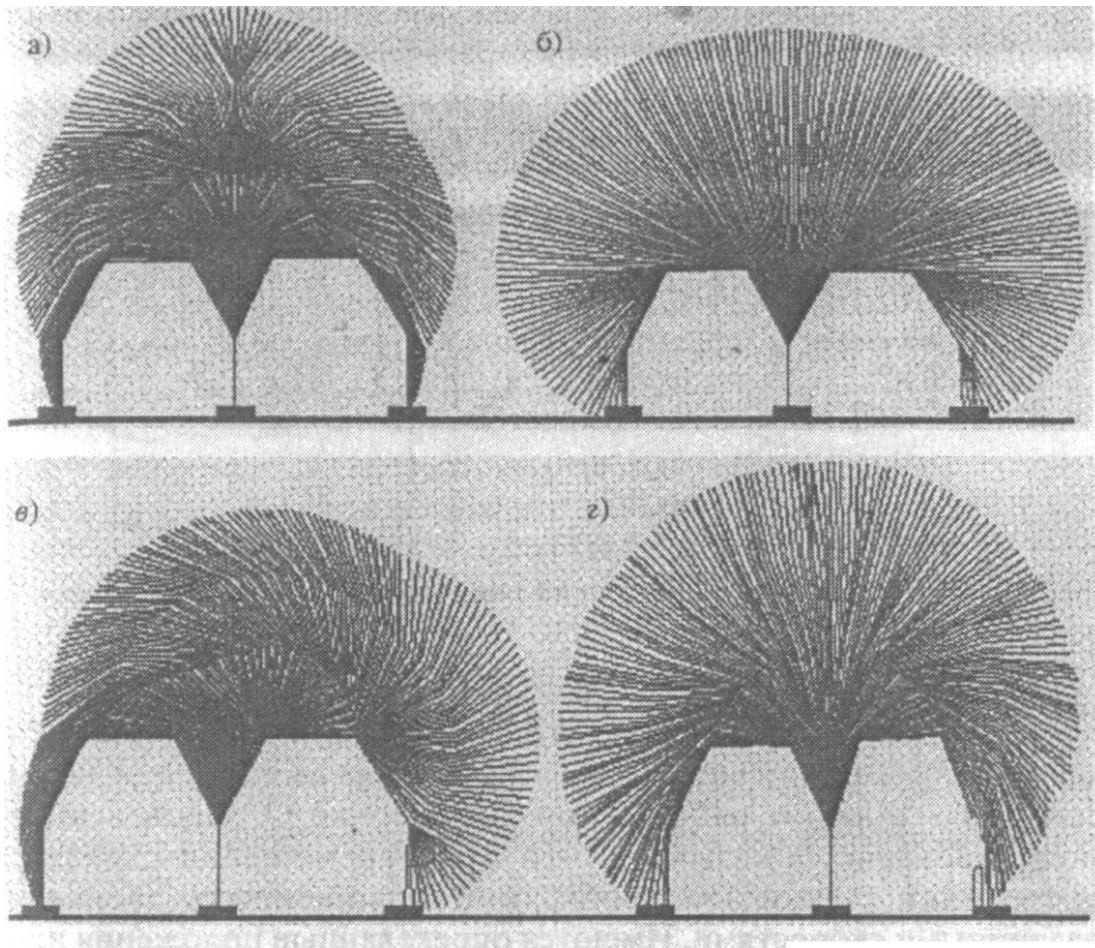


Рис. 3.5.2. Результаты моделирования движений робота при перемещении по горизонтальной поверхности способом "акробат"

Однако с точки зрения оператора, управление роботом путем последовательного или распределенного поворота звеньев за счет включения и выключения моторов в супервизорном или программном режимах не является эффективной задачей. Более эффективно выполнять движения, когда рабочий орган, или схват опоры, находятся в плоскости в базовой системе координат, т.е. влево, вправо, вверх, вниз или выполняет повороты вокруг геометрического центра. Т.е. эти движения, согласно разработанным алгоритмам, должны выполняться автоматически по команде оператора под управлением программы, которая хранится в памяти компьютера.

Вначале представим результаты моделирования распределенного управления при выполнении различных прямолинейных движений. Теоретически возможно рассчитать изменение кинематической структуры пятизвенного робота для каждого момента времени и, соответственно, углов поворота каждого звена, на которые их требуется поворачивать, когда робот закреплен на поверхности с помощью одного схвата, а другой схват перемещается в пространстве по прямой линии.

Проведем анализ ряда алгоритмов для выполнения этих движений, моделирование которых дает возможность выявить их практическую полезность и недостатки.

Для упрощения будем рассматривать результаты моделирования для движения робота в одной плоскости. Движение под углом может быть реализовано как результат сложения двух простых движений в соответствующих расположенных под углом друг к другу плоскостях. Напомним, что для этого каждый шарнир имеет две степени подвижности.

В основу принципа движения по прямой линии, согласно первому алгоритму, положена цель выполнять перемещение рабочего органа с помощью минимально возможного числа двигателей.

Такое перемещение представлено на рис. 3.5.3, где *а* - движение в направлении оси *X*; *б* - движение вдоль направления оси *Y*; *в* - поворот рабочего органа в точке *O*. Проведенное моделирование показывает, что при перемещении схвата с постоянной скоростью необходимо поворачивать звенья с различными скоростями. Имеются определенные положения или точки, в которых для перемещения схвата на данный дискретный шаг требуется резко изменять направления поворота отдельных звеньев. В целом алгоритм позволяет задействовать минимальное число двигателей, что приводит к снижению расхода или экономии энергии. При работе этого алгоритма требуется более строго подходить к учету положения посторонних объектов в целях предотвращения столкновений с ними.

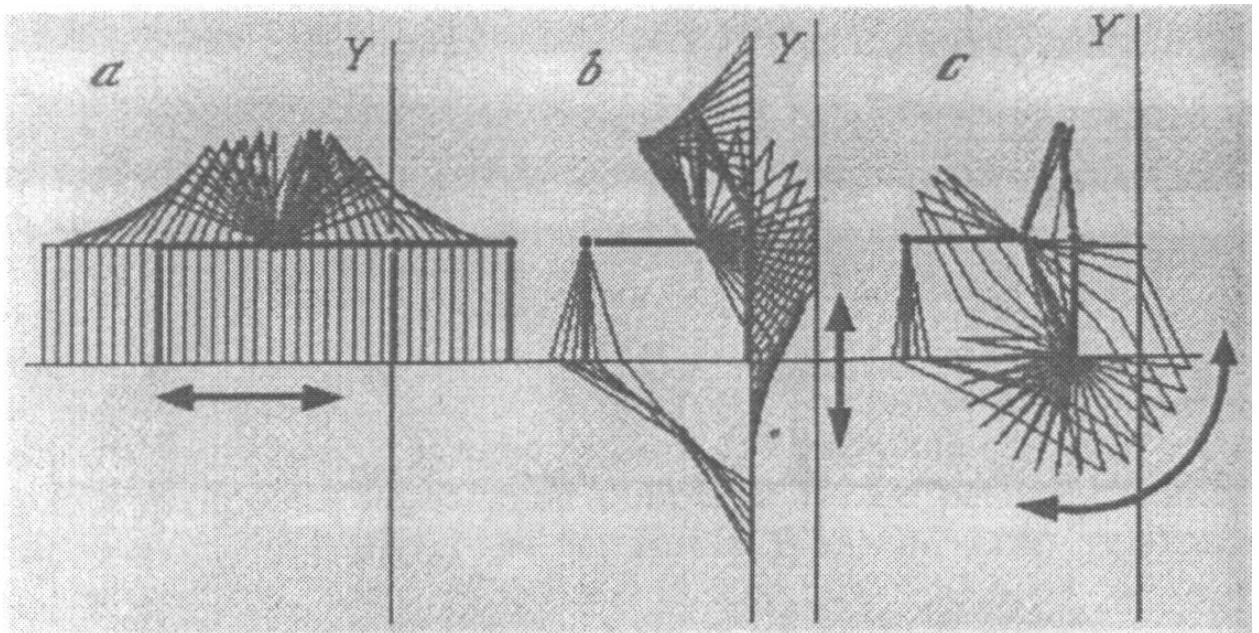


Рис. 3.5.3. Моделирование движений робота с включением минимального числа моторов

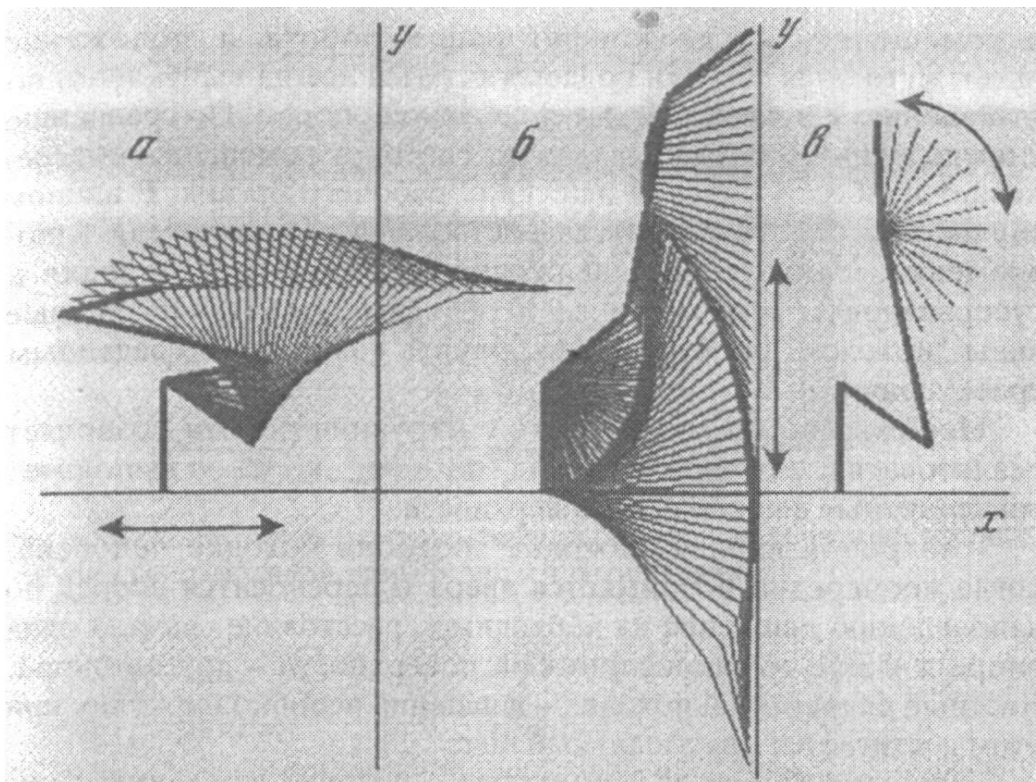


Рис. 3.5.4. Моделирование движений робота с максимальным сжатием звеньев

На рис. 3.5.4 отражены результаты моделирования кинематики МРПП при выполнении аналогичных движений с помощью второго алгоритма. Согласно последнему, конфигурация робота приводится в максимально сжатое состояние, т.е. расстояние от схвата до неподвижной опоры выдерживается минимальным для его соответствующего положения. Данный алгоритм позволяет поддерживать значение момента, возникающего от силы веса робота в точке закрепления неподвижной опоры, минимально возможным. При достижении критического момента происходит отрыв опоры от поверхности и как следствие падение робота. Можно видеть, что движение подвижной опоры выполняется в данном случае достаточно плавно.

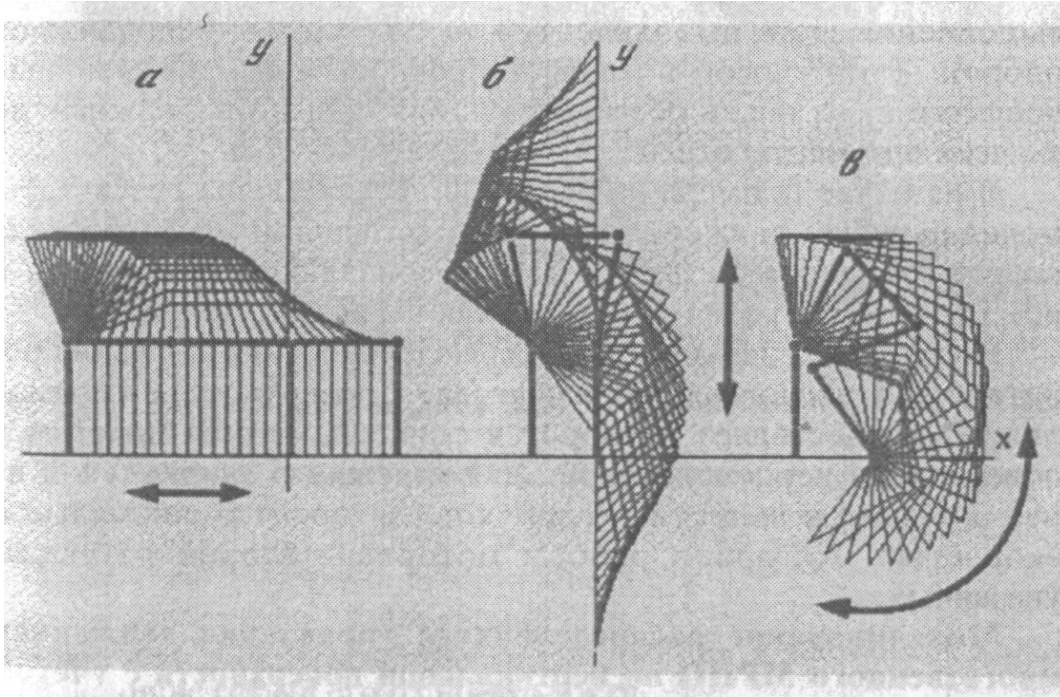


Рис. 3.5.5. Моделирование движений робота с сохранением выпуклой конфигурации

На рис. 3.5.5 представлены результаты моделирования кинематической структуры робота для аналогичных указанных перемещений, когда конфигурация робота и положение промежуточных звеньев поддерживаются всегда выпуклыми по отношению к подвижной и неподвижной опорам. По сравнению с предыдущими алгоритмами этот способ перемещения обеспечивает наиболее плавное движение рабочего органа. В данном случае при работе робота задействованы все двигатели одновременно. Такой режим движения удобен для управления в супервизорном режиме, когда необходимо задавать различные виды "походок" робота или выполнять движение по заданным траекториям.

Необходимо отметить, что конструкция робота позволяет реализовать следующие типовые "походки", когда он выполняет транспортные движения по поверхности:

- антропоморфная "походка" подобна походке человека, когда поочередно поднимается вверх и переносится вперед по направлению движения на необходимое расстояние сначала одна опора и после ее закрепления на поверхности - другая опора. Частный случай этой походки - движение подобно циркулю, при этом достигается максимальный шаг;

- походка приставными шагами - подобна движению гусеницы. Это наиболее простой и быстрый ход движения, позволяющий выполнять скольжение по плоскости;
- способ "акробат", когда перенос подвижной опоры при выполнении шага выполняется в плоскости над неподвижной опорой. Этот способ позволяет преодолевать максимальные препятствия, а также обеспечивать минимально возможные по значению моменты отрыва робота от поверхности.

В качестве примера на рис. 3.5.6 представлены результаты моделирования движения робота приставными шагами, когда подвижная опора движется по синусоидальной траектории и обеспечивается третий алгоритм включения двигателей.

На рис. 3.5.7 даны результаты моделирования движения робота, когда подвижная опора подходит к поверхности по прямой линии, осуществляет разворот в точке А, чтобы подойти к поверхности перпендикулярно для надежного закрепления на ней, и после разворота подходит к поверхности с минимальной скоростью. Алгоритм работы моторов - второй из вышеуказанных.

Моделирование распределенного управления движением многозвенового МРПП по вертикальной поверхности с учетом получения минимально возможного опрокидывающего момента.

Выше отмечалось, что при перемещении МРПП по поверхности важное влияние на его способность к удержанию на ней оказывают силы сцепления с ней за счет вакуума, магнитного

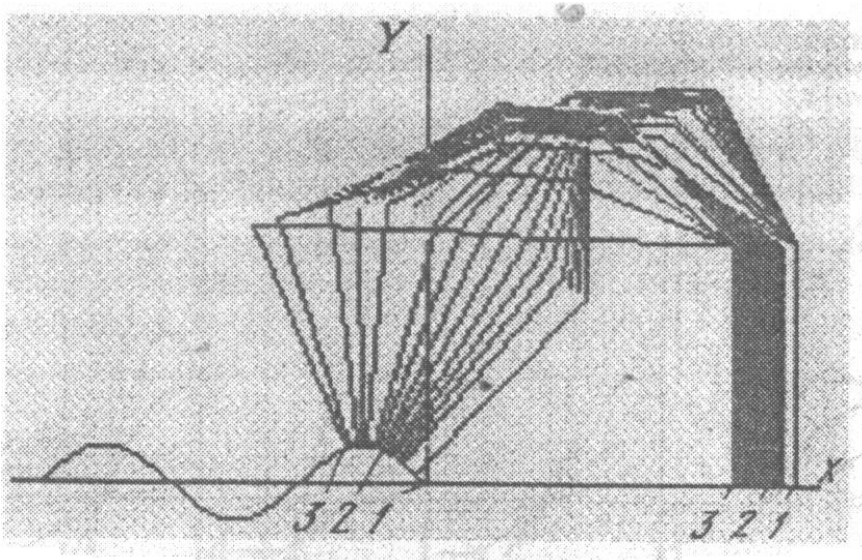


Рис. 3.5.6. Моделирование перемещений робота при движения подвижной опоры по заданной траектории (синусоидальной)

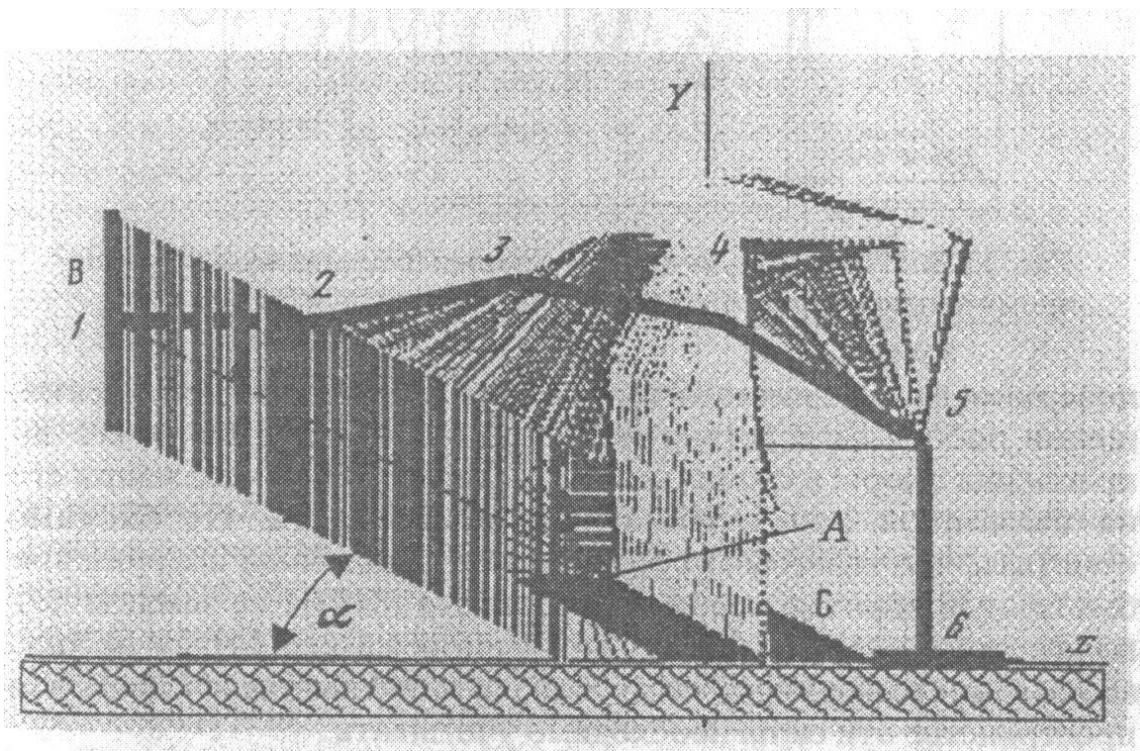


Рис. 3.3.7. Моделирование движений робота с ориентацией опоры параллельно поверхности

1-6 - исходное положение робота; BC - траектория движения центра подвижной опоры; A - точка начала поворота подвижной опоры; α - угол наклона траектории движения

притяжения или механического удержания и наоборот, силы вызывающие отрыв его от поверхности.

Для надежного управления МРПП в первую очередь необходимо выполнить исследования по определению величин моментов, вызывающих опрокидывание робота или его отрыв, когда он находится на горизонтальной плоскости, вертикальной

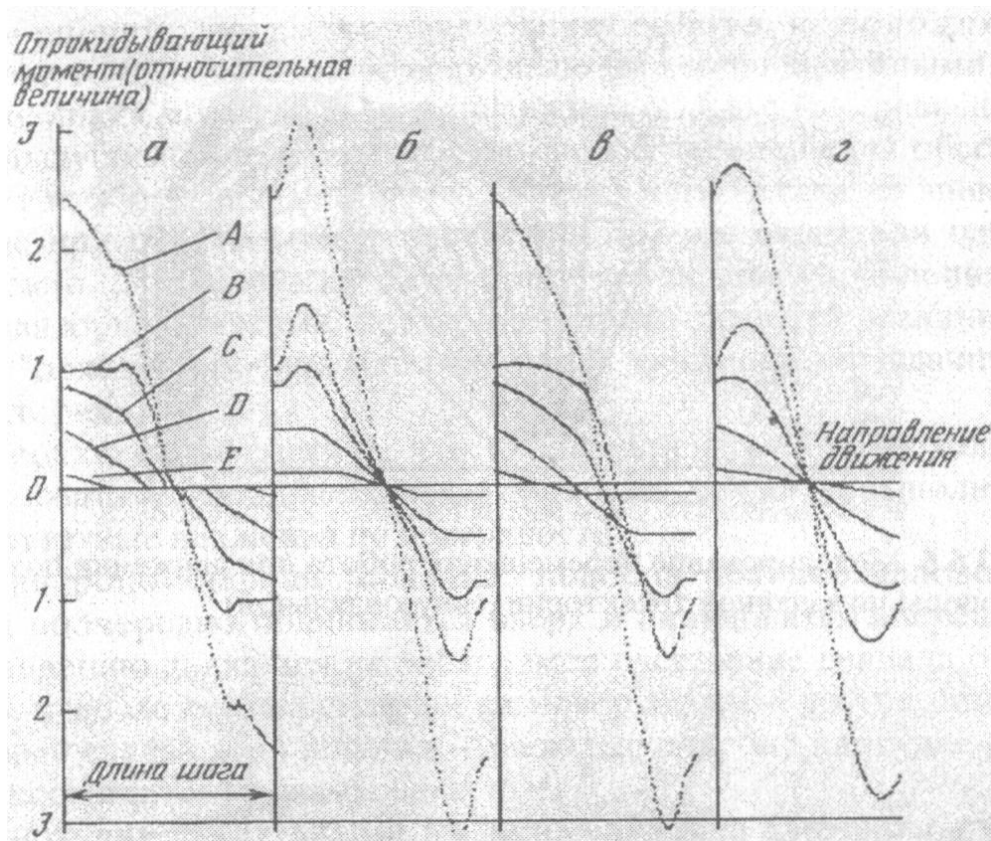


Рис. 3.5.8. Изменения значений опрокидывающих моментов во время движения робота по полу и потолку

поверхности и потолке. Эти моменты возникают при перемещении робота от действия сил веса по отношению к точке закрепления опоры и существенно сказываются при удержании его на наклонной или вертикальной поверхности. Необходимо отметить, что на отрыв робота влияют также силы инерции при быстрых поворотах звеньев. При работе МРПП на земле и под водой силы инерции большого влияния на его отрыв не оказывают по сравнению с весом. Однако при работе в космическом пространстве эти силы необходимо учитывать.

Рассмотрим моделирование движений робота с учетом моментов от сил веса и без учета сил инерции.

На рис. 3.5.8 даны результаты изменения величины опрокидывающего момента, когда робот выполняет шаги по горизонтальной поверхности методом "акробат" для четырех распределенных режимов управления, отраженных на рис. 3.5.2. Точечной линией (кривая А) показано изменение момента, который вызывает опрокидывание робота и создается за счет его полного веса. Соответственно кривые В, С, D и Е представляют изменения моментов, которые создаются весом отдельных звеньев. По графикам рисунка видно, что наибольший опрокидывающий момент создается для случаев переноса б и г.

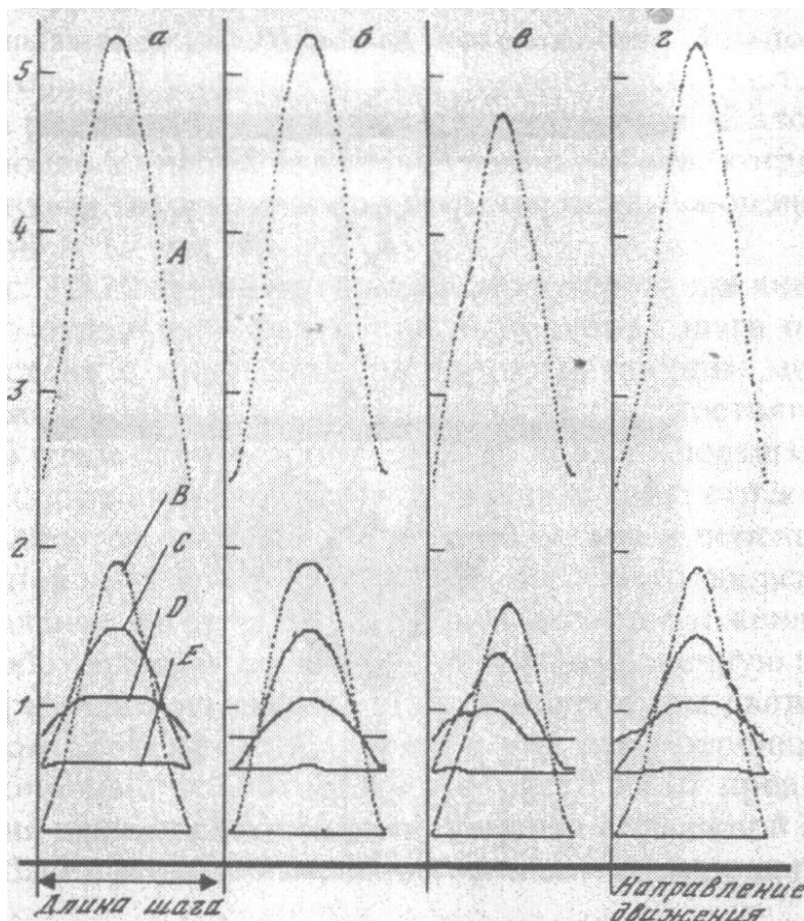


Рис. 3.5.9. Изменения «значений опрокидывающих моментов во время движения робота по вертикальной стене

В центральном положении, когда подвижная опора находится строго над неподвижной (а, б, г) и все звенья вытянуты, момент равен нулю. В данном случае сила веса проходит через точку опоры и прижимает робот к поверхности. Для случая в) момент равен нулю, когда звенья находятся под определенным углом друг к другу.

Рассмотрение этого движения для случая, когда робот находится на потолке, показывает, что характер изменения величины опрокидывающего момента аналогичен выше рассмотренному случаю, а сила веса для центрального расположения робота не прижимает робот, а напротив, вызывает отрыв.

На рис. 3.5.9 представлены графики изменения опрокидывающих моментов для ситуации, когда робот находится на вертикальной стене. В этом случае опрокидывающий момент примерно вдвое больше.

Рассмотрение результатов моделирования движения многозвенного робота по различным поверхностям позволяет сделать вывод, что от конфигурации робота в определенные времена движения зависит величина момента, который действует в

точке опоры и вызывает его отрыв от поверхности. Можно сделать предварительный вывод, что этот момент уменьшается, когда структура робота находится в сжатом состоянии. С этой целью были выполнены расчеты конфигурации робота, когда он движется методом "акробат" и при этом опрокидывающий момент минимален.

На рис. 3.5.10 видны результаты моделирования кинематики робота по отдельным фазам при выполнении шага по вертикальной стене с минимальным опрокидывающим моментом. Центр тяжести робота движется снизу вверх с постоянной скоростью. В этом случае робот сначала должен подтягивать подвижную опору внутрь, как бы сворачивая свою структуру. Затем выполняется разворот подвижной опоры и перенос ее над неподвижной на минимальной высоте, после чего происходит последовательное распрямление звеньев около положения равновесия и робот выходит подвижной опорой на конечную позицию.

Для сравнения на рис. 3.5.11а показаны фазы движения робота в этом случае по отношению к уже рассмотренным переносам (точечные траектории). На рис. 3.5.11б представлена траектория движения конечного элемента подвижной опоры, и на рис. 3.5.12 показано изменение величины опрокидывающего момента.

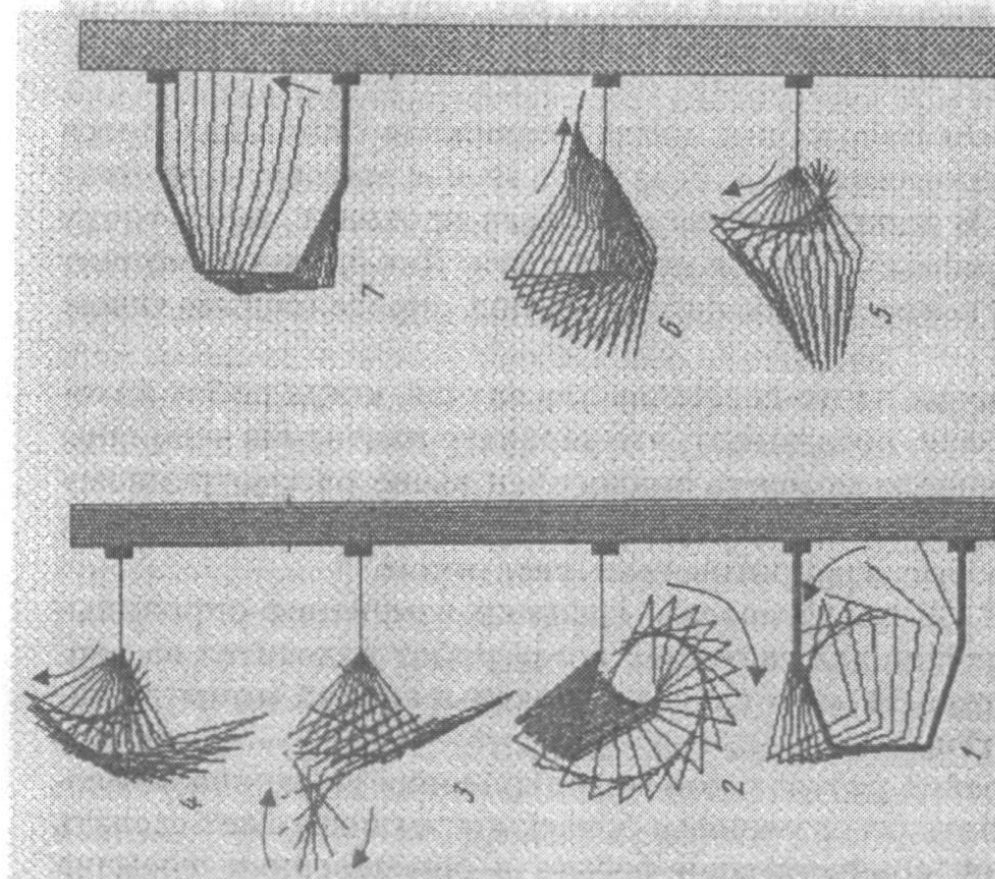


Рис. 3.5.10. Моделирование фаз движений робота по вертикальной стене с минимальным опрокидывающим моментом

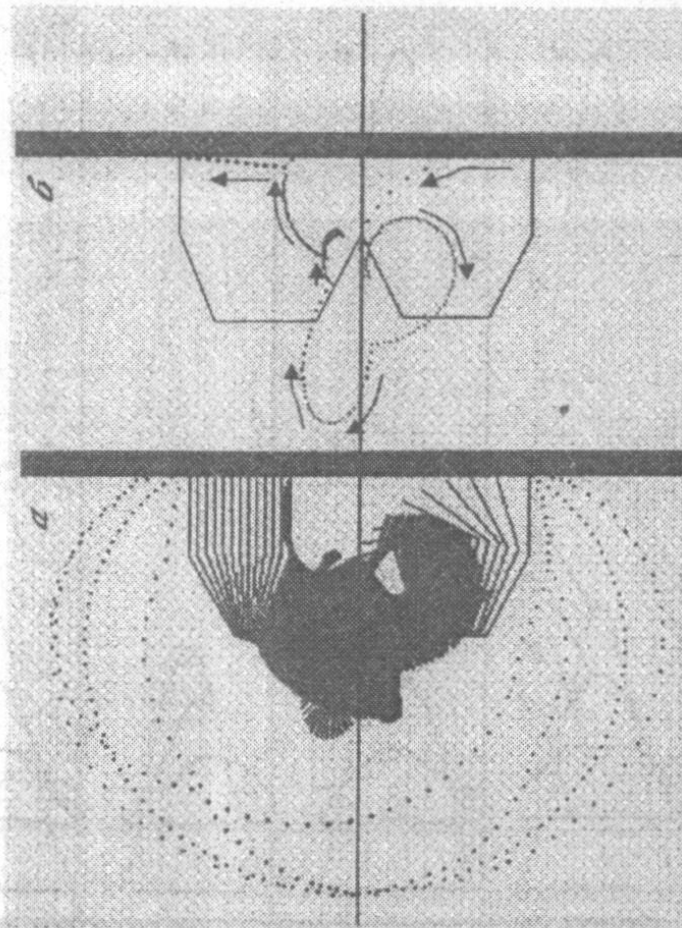


Рис. 3.5.11. Выполнение роботом шага на вертикальной стене
 а – рабочая зона робота при движении по вертикальной стене с минимальным опрокидывающим моментом; б – траектория движения конечного элемента подвижной опоры робота

Из рассмотренного выше можно сделать следующий вывод.

Имеется возможность за счет выполнения распределенного управления работой приводов робота обеспечить оптимальные по надежности удержания режимы движения на различных поверхностях. При этом величина момента может быть значительно снижена и обеспечен плавный режим перемещения. При наличии препятствий на пути движения коррекции в распределенное управление вносятся в качестве оперативных поправок или учитываются соответствующие ограничения, которые предварительно заносятся в память процессора или контроллера управления.

Моделирование распределенного управления при перемещении многозвенного робота в трубе. Как один из вариантов реализации распределенного управления движением многозвенного МРПП рассмотрим моделирование его перемещения внутри трубопроводов или сосудов малого диаметра.

Модель такого робота аналогична уже рассмотренной выше и представляет собой протяженную структуру, состоящую из нескольких звеньев, между которыми находятся шарниры. Вращение каждого звена вокруг шарнира может быть реализовано с помощью электромотора с редукционным приводом.

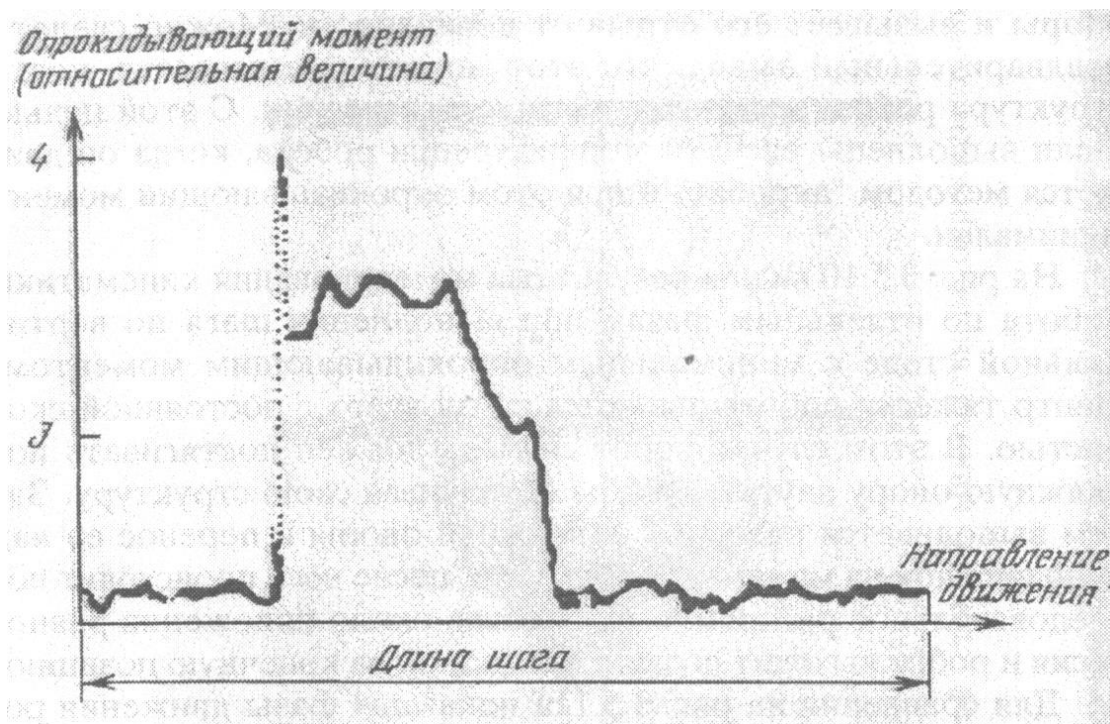


Рис. 3.5.12: Изменение значений минимального опрокидывающего момента

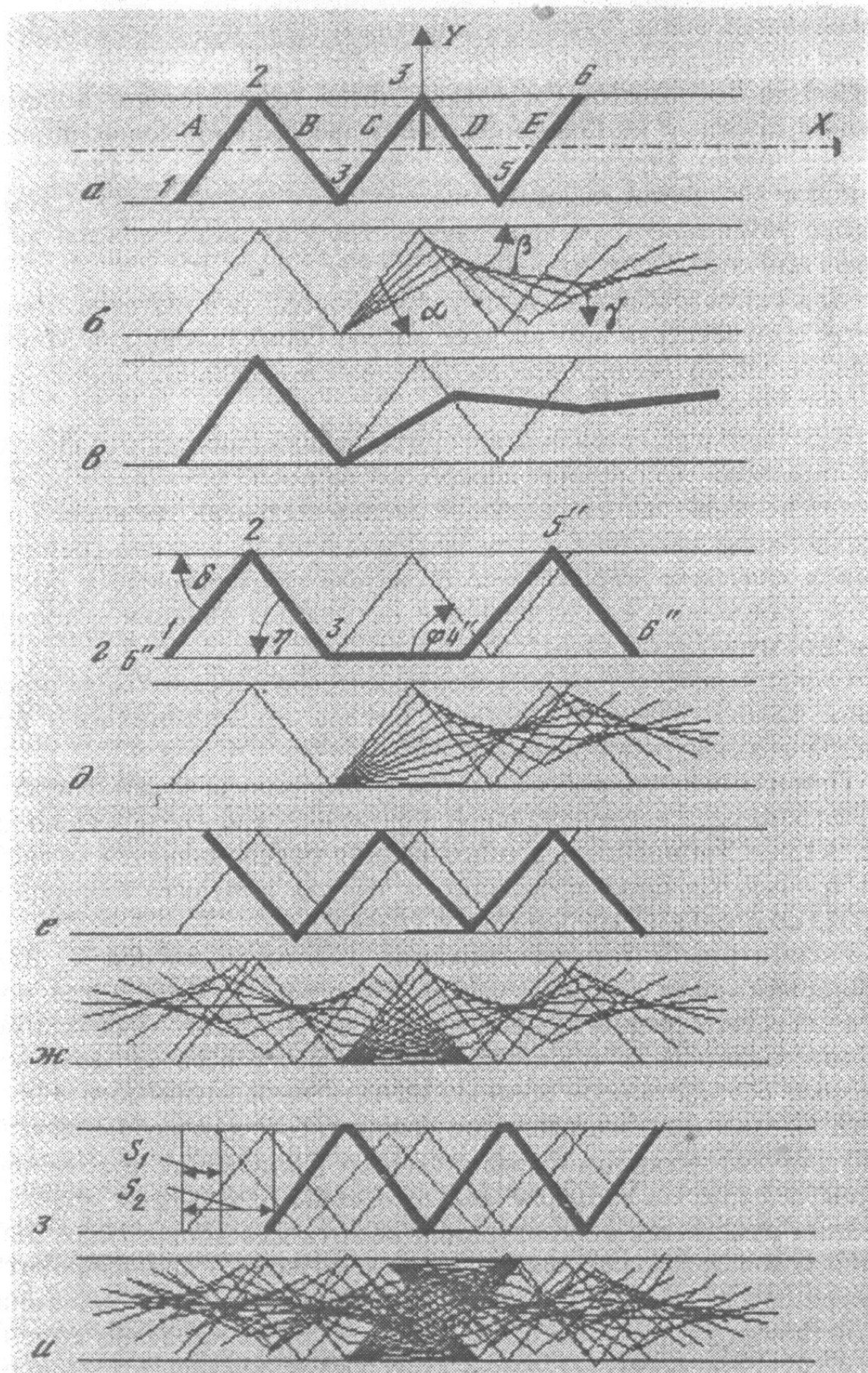


Рис. 3.5.13. Результаты компьютерного моделирования движений многозвенного робота внутри прямолинейного участка трубы

указывалось выше, такая физическая модель была практически реализована для мобильного робота, который мог осуществлять движение по сложным и разделенным между собой поверхностям. Каждый из шарниров имеет две степени подвижности. Общее число электромоторов - 8 (по два мотора для обеспечения вращения каждого звена в двух плоскостях). Схема такого мобильного робота внутри трубопровода малого диаметра или сосуда показана на рис. 3.5.13а.

Движение робота внутри трубопровода реализуется поворотом соответствующих звеньев вокруг своих шарниров. Минимальное число звеньев для выполнения продольного движения по трубопроводу - 5.

Как один из возможных алгоритмов движения робота внутри трубопровода был принят способ, когда после установки на исходной позиции сначала ведущие звенья выдвигаются вперед по направлению движения, затем закрепляются за счет сил трения в точках контакта шарниров со стенками трубопровода и после этого выполняется подтягивание остальных звеньев с последующим их закреплением.

Сначала рассмотрим результаты математического моделирования такого движения робота внутри прямолинейного цилиндрического трубопровода.

При нахождении робота внутри трубопровода будем считать, что он занимает первоначальное положение, как это показано на рис. 3.13а. Стабильность его положения обеспечивается за счет сил трения, которые возникают в точках контакта шарниров робота со стенками трубопровода (точки 1-6).

Рассмотрим алгоритм движения робота вдоль оси X. Для упрощения анализа будем считать, что робот перемещается, поворачивая свои звенья в одной плоскости. Для этого необходимо одновременно (или последовательно) включить те моторы, которые осуществляют поворот пятого, четвертого и третьего (E, D, C) звеньев в направлении углов α , β , γ ; как это представлено для рассчитанных промежуточных дискретных положений на рис. 3.5.13в. На этом рисунке отражены результаты моделирования изменения конфигурации робота для дискретных значений углов α , β , γ , равных 5° . Система позволяет анализировать движения для различных диапазонов и абсолютных значений углов поворота каждого звена. На рис. 3.5.13в показано конечное положение робота (1~2-3~4'-5'-6') по сравнению с исходным (1-2-3-4-5-6) после поворота третьего, четвертого и пятого звеньев на углы 25° .

Для реальной модели момент остановки двигателей, которые поворачивают эти звенья, определяется либо расчетным путем (если известны параметры трубопровода и размеры робота), либо с помощью датчиков обратной связи, которые

измеряют критические нагрузки тока к обмоткам моторов при контакте шарниров с внутренней поверхностью (стенкой трубопровода).

После выполнения полных поворотов третьего, четвертого и пятого звеньев робот занимает положение представленное на рис. 3.5.13г. Результаты математического моделирования промежуточных положений звеньев представлены на рис. 3.5.13 д.

После закрепления робота в том положении (за счет контакта в точках 6", 5" и 4") начинается поворот звеньев А-В-С в направлении углов δ , γ , φ . Промежуточные положения робота, когда углы δ , γ , φ изменялись в диапазоне от 0 до 25", приведены на рис. 3.5.13ж и конфигурация робота по сравнению с предыдущей на рис. 3.5.13е. После окончания поворота робот занимает положение в противофазе относительно исходного и сдвинут на некоторую величину S , которая определяется параметрами робота и диаметром трубопровода.

Для завершения полного цикла одного шага движения выполняются сначала повороты звеньев С-D-E, а затем С-В-А, но в обратную сторону. В результате робот занимает положение, отраженное на рис. 3.5.13 з, длина шага при этом равняется S_2 . Полная модель всех движений робота за один шаг показана на рис. 3.5.13 и.

Результаты моделирования показывают, что предложенная модель робота с пятью звеньями и четырьмя шарнирами с использованием представленного алгоритма может перемещаться внутри прямолинейного трубопровода. На рис. 3.5.14 показана рабочая зона робота при выполнении двух шагов.

Необходимо отметить, что включение электродвигателей приводов в определенной последовательности позволяет изменять ориентацию, плоскости движения робота или даже выполнять его по сложной траектории, например по спирали. Для реализации этого случая рассматриваемая модель движения может быть принята как базовая, а сложное движение представляется как сумма более простых рассмотренных выше, которые выполняются во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Моделирование с использованием данной системы показало, что для движения внутри трубопроводов малого диаметра или сосудов, которые имеют изгибы, наличие пяти звеньев у робота недостаточно для реализации его перемещения. При наличии изгибов, т.е. когда роботу необходимо выполнять повороты, пять звеньев не позволяют жестко зафиксировать конструкцию за счет опоры шарниров на внутренние стенки и одновременно выполнять продвижение, так как происходит либо ограничение

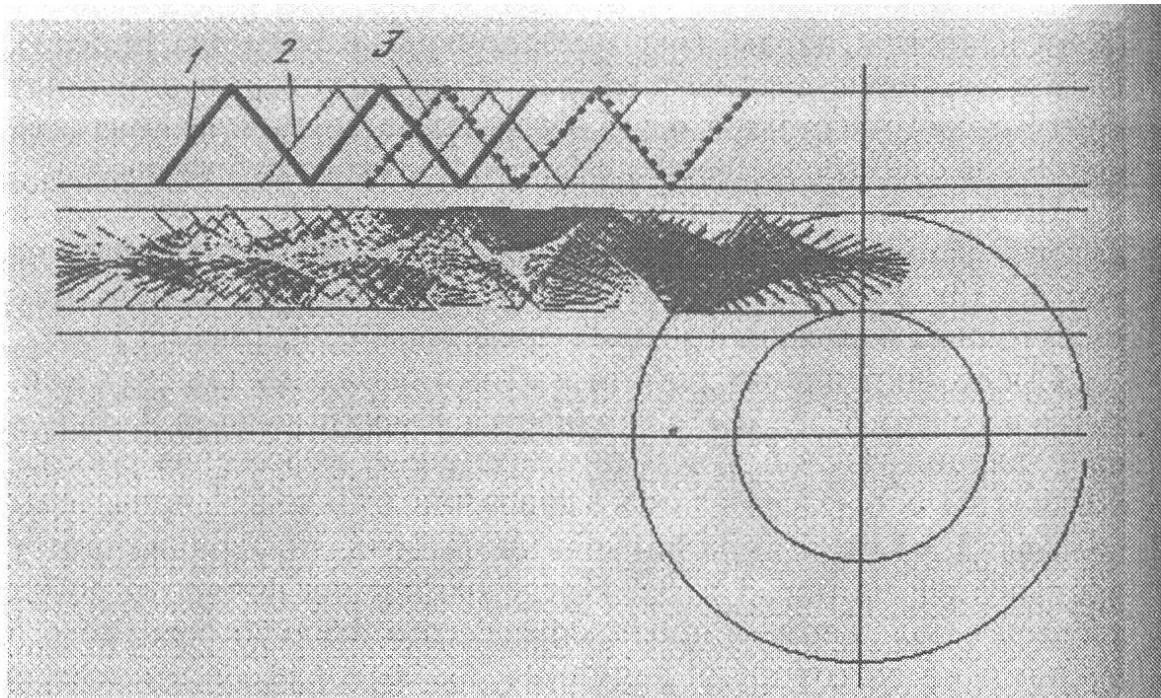


Рис. 3.5.14. Результаты моделирования при выполнении многозвенным роботом двух шагов внутри прямолинейного участка трубопровода
1 – исходное положение робота; 2 – положение робота после выполнения одного шага; 3 – положение робота после выполнения двух шагов

за счет встречи с изогнутой стенкой трубопровода средних частей звеньев (в этом случае опорные конечные точки 1-2-3 или 4-5-6 могут повиснуть в воздухе), либо отсутствует возможность одновременной фиксации крайних звеньев перед изменением направления их вращения. Поэтому для реализации продолжения движения по трубопроводу с изгибом минимальное число звеньев должно равняться 6 и число шарниров - соответственно равняется 5.

В целом работа алгоритма по управлению роботом практически не изменяется по сравнению с представленным выше для пятизвенного робота при движении по прямолинейному участку. Однако в таком случае скорость поворота звеньев должна быть распределена соответственно ситуации. Если для прямолинейного движения скорости поворота всех звеньев равны, то в этом случае они различны по величине и могут отличаться по знаку друг от друга. Например, может оказаться, что скорость поворота третьего звена значительно меньше скоростей поворота остальных звеньев, а скорости пятого и шестого звеньев необходимо изменять еще и в процессе этой фазы движения.

Рис. 3.5.15 демонстрирует результаты моделирования при выполнении многозвенным роботом конечных полушагов внутри изгибающегося трубопровода при выполнении десяти шагов. На определенных этапах отдельных шагов или фаз движения

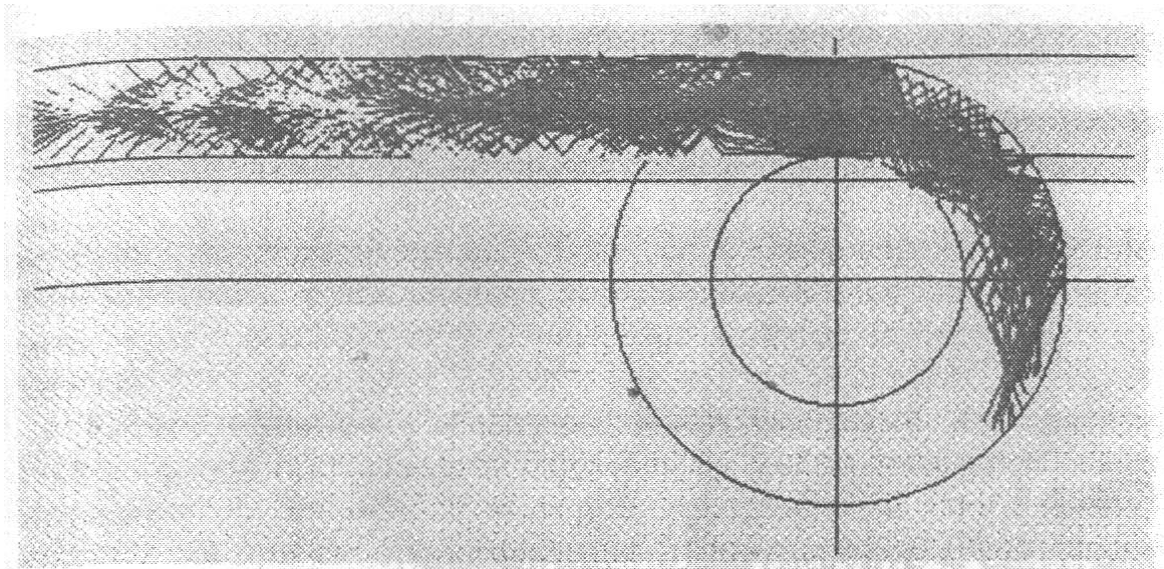


Рис. 3.5.15. Результат моделирования движений многозвенного робота внутри искривленного трубопровода

представление модели робота при использовании данной системы моделирования по желанию оператора сопровождается выводом цифровых значений углов поворота отдельных звеньев в верхней части экрана монитора.

Таким образом, можно сделать вывод, что результаты моделирования показывают принципиальную возможность выполнения перемещения многозвенного робота согласно предложенному алгоритму внутри трубопроводов или сосудов малого диаметра, а разработанная система моделирования дает возможность анализировать ситуации при перемещении и принимать соответствующие решения для реализации управления.

Лекция

Тема 3.3.4. Методы и алгоритмы управления мобильными роботами повышенной проходимости

ВОПРОСЫ

1. Краткая характеристика методов управления.
2. Распределенное управление многозвенными роботами.
3. Адаптивное управление мобильным роботом.
4. Нечеткие системы на основе процессора с весовыми ассоциативными правилами.
5. Интеллектуальное управление на основе нечеткой логики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Градецкий В.Г. и др. Управляемое движение мобильных роботов по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям. М.: Наука. 2001, 360 с. (173-234).

1. Краткая характеристика методов управления

Система управления мобильным роботом должна работать в реальном времени, при этом условия окружающей среды меняются. Объекты окружающей среды, параметры движения которых заранее не известны, могут перемещаться в пространстве. Одна из важных задач управления состоит в том, чтобы система могла генерировать решения на основе анализа окружающей среды, например, должна решить, обойти возникающие препятствия или их преодолевать. Однако решение должен принимать робот, если он движется в автономном режиме. Таким образом, бортовая система управления служит не только для обнаружения локальных препятствий, но и для построения геометрической модели окружающей среды, в которой отображаются динамически изменяющиеся положения препятствий. Если в систему управления заложена карта местности, то одна из ее задач состоит в том, чтобы нанести на эту карты подвижные препятствия и отслеживать их взаимное расположение. Система сравнивает воспринимаемую среду в определенные моменты времени с ранее построенной моделью среды и на основе сравнения может принимать решения о дальнейшем продвижении.

Ранее речь шла о том, что основные направления по созданию систем управления связаны с ее иерархической структурой и относятся к повышению адаптивности, робастности, интеллектуальности управления.

Поэтому далее основное внимание будет уделено методам распределенного, адаптивного и интеллектуального управления, которые наиболее полно соответствуют требованиям и условиям управления такими автономными роботами повышенной проходимости, как многозвенные роботы, роботы вертикального перемещения, интегрированные роботы, способные перемещаться по горизонтальным, наклонным, вертикальным поверхностям и по потолкам с возможностью перехода с одной поверхности на другую.

Распределенное управление многозвенными или расположенными в пространстве отдельными мобильными роботами производится на основе методов локального и глобального управления при скоординированном управлении отдельных механических звеньев транспортной системы робота или отдельных перемещающихся независимо роботов. В этом случае каждый из роботов находится под управлением собственной локальной системы, а стратегия управления вырабатывается более высоким глобальным уровнем. Отдельные звенья или роботы подчиняются общей цели и задачам управления.

Рассматриваемое в последующих разделах адаптивное управление основано на предложенном эффективном алгоритме, который может использоваться для многозвеного робота с замкнутыми цепями при неизвестных собственных массах. Таким образом, адаптивное управление применяется в условиях неполных знаний о динамической модели робота и неопределенности параметров внешней среды. Принимая во внимание, что некоторая информация об эталонной модели может быть известна заранее, отметим, что одним из перспективных может служить подход, основанный на адаптивной самонастраивающейся системе с эталонной моделью.

Разработке основ оптимального управления посвящены многие фундаментальные исследования [74, 88-89]. Здесь кратко остановимся на некоторых особенностях оптимального управления применительно к МРПП.

Проблема построения оптимальных систем управления представляет значительный теоретический и практический интерес. Задача нахождения программного оптимального управления для сложных динамических систем при ограничениях на управление аналитически неразрешима, и поэтому разработано множество итерационных процедур. Еще более актуальна проблема синтеза оптимального управления, так как только при синтезе управления система обладает рядом важных свойств: нечувствительностью к внешним изменениям и параметрическим, случайным и детерминированным возмущениям, к несоответствию объекта принятой математической модели, к неточной реализации моментов переключений управления, к ограничениям фазовых координат и т.п. Проблема синтеза более сложна и до настоящего времени не имеет решения для систем высокого порядка с ограниченным управлением.

Главная трудность проектирования системы управления состоит в согласовании многомерных "размытых" реальных задач с простыми корректными задачами, подвластными теории управления. Хорошее инженерное решение должно

удовлетворять большому числу требований, и нередко эквивалентных решений бывает много.

Приоритетные задачи, которые должны решать такие системы автоматического управления, основанные на методах теории оптимального управления и нейροкомпьютерах, включают в себя:

- формирование сигналов управления на основе оптимального управления на данном или близком к нему режимам, заложенным в память компьютера;
- самообучение на базе запомненного опыта управления;
- использование информации нетрадиционных (для прежних САУ - систем автоматического управления) датчиков типа оптических систем и т.п.;
- применение нетрадиционных принципов формирования сигналов управления;
- выбор самой системой автоматического управления оптимального в данных условиях способа управления и формирования сигналов управления.

Рассмотрим один из подходов к формированию оптимального управления на примере задачи комплексирования навигационных систем (НС) [208]. В настоящее время для эффективного решения этой задачи применяется аппарат оптимальной калмановской фильтрации (ОФК). Возможности такого аппарата позволяют:

- объединять разнородные измерительные средства в единую структуру и на этой основе повышать точность и надежность навигационных определений;
- обеспечивать взаимную поддержку НС в интересах сохранения их целостности;
- унифицировать процедуры комплексной обработки информации (КОИ);
- оценивать параметры НС по косвенным измерениям и через корреляционные связи.

Однако эффективность применения ОФК как ядра системы КОИ существенно зависит от уровня статистической, параметрической и структурной неопределенности. Поэтому актуальной остается проблема защиты целостности самой системы КОИ. Под целостностью системы КОИ в данном случае понимается такое ее состояние, при котором обеспечивается требуемая достоверность оценивания навигационных параметров. Достоверность, в свою очередь, характеризуется отсутствием расходимости ОФК, т.е. адекватностью получаемых оценок их прогнозируемым среднеквадратическим значениям. Это дает основание рассматривать известные подходы (адаптивный, робастный, гарантирующий) к предотвращению

расходимости ОФК как средство защиты целостности системы КОИ. Ретроспективный анализ данных подходов указывает на преимущественно независимое их развитие. Поэтому конструкции, получаемые на их основе, являются, как правило, слабо связанными между собой и не объединяют возможности каждого из подходов. Представляется, что такое объединение может уменьшить негативное влияние априорной неопределенности на целостность системы КОИ.

В этих целях предлагается структура системы КОИ с многоуровневой защитной оболочкой. Технология синтеза такой системы сводится к следующему:

- формируется обобщенный параметр, характеризующий как точность оценивания, так и целостность системы КОИ;
- обобщенному параметру ставится в соответствие функционал качества процесса комплексной обработки информации;
- для полученного функционала решается оптимизационная задача.

В результате определяется конструкция как системы КОИ, так и ее защитной оболочки.

Эффективность такого подхода определяется возможностью задания обобщенного параметра и корректностью построения соответствующего целевого функционала. При решении подобной задачи отметим следующее:

- в качестве базового параметра первого уровня оптимизации, характеризующего точность оценивания, выбрана нормированная невязка между реальным и прогнозируемым значениями наблюдений;
- в качестве обобщенного параметра второго уровня оптимизации, характеризующего устойчивость оценивания, выбран квадрат указанной нормированной невязки;
- учтено необходимое условие отсутствия расходимости ОФК $-\chi^2$ - распределение обобщенного параметра.

пропущено две страницы

действие входного сигнала на уровень активации узла. При этом веса могут быть как положительные, так и отрицательные, значения которых определяются процедурой обучения нейросетей.

В нейросети каждый выход узла соединяется через ассоциативный вес с другими узлами или с самим собой, что определяет структуры нейросети и ее особенности построения, в том числе слевые структуры узлов, которые могут быть со-

единены между собой, образуя многослоевую структуру. Нейросеть может включать от нуля до нескольких промежуточных слоев, не связанных с внешней средой. Замкнутые обратными связями нейросети называются рекуррентными.

Каждая нейросеть имеет свою схему обучения, которая может быть схемой параметрического и структурного обучения. При структурном обучении может меняться структура нейросети, включая узлы и типы их соединений. Среди видов обучения получили развитие супервизорное, подкрепляющее и несупервизорное.

Нейросети делятся на несущие и поддерживающие, или питающие. Генетические алгоритмы являются важным инструментарием в обучении структуры и параметров нейросетей. Эти алгоритмы базируются на механике естественной селекции, или выбора, и натуральной генетике, которые используются прежде всего для оптимизации и решения проблем машинного обучения. Генетические алгоритмы имеют три основных оператора: оператор репродукции решений в зависимости от назначения, оператор генного перехода и оператор мутации для случайного изменения в генах [151].

Имеется также оператор выбора, который осуществляет естественный отбор в генетических алгоритмах. Оператор репродукции генетического алгоритма осуществляет поиск наилучших существующих решений, но не создает каких-либо новых ветвей, оператор перехода исследует различные структуры посредством изменения связей между двумя ветвями в позиции перехода. Алгоритм мутации вводит различие в популяции, внося изменения в дискретное положение выбранной ветви. Оператор мутации применяется для того, чтобы избежать локального минимума в пространстве поиска. Совместное действие операторов репродукции и генного перехода приводит к возрастанию эффективности поиска посредством генетического алгоритма. Совместное действие операторов репродукции и мутации приводит к формированию параллельных, помехоустойчивых ветвящихся алгоритмов [151]. Структура и параметры задач обучения нейросетей кодируются в форме ген или хромосом [151], а генетические алгоритмы используются для достижения наилучших решений, т.е. оптимальных структур или параметров в нейросетях. Более того, генетические алгоритмы могут быть использованы для нахождения функций принадлежности и нечетких правил в системах нечеткой логики.

Нейронные сети обладают следующими полезными для системотехники свойствами:

- возможностью воспринимать нелинейные входные функции:

- способностью обобщать, интерполировать и приспосабливать ранее неизвестные входные данные к требуемым функциям;
- автоматически устанавливать весовые коэффициенты и структуры цепи, в том числе изменять количество узлов или соединений в целях оптимизации выполняемых операций, такими устройствами, как контроллеры, распознаватели образов, формирователи принимаемых решений и др.;
- возможностями избыточности и независимости функционирования узлов, способствующих высокой надежности нейросетей.

Учитывая перечисленные выше свойства, нейросети могут применяться в разработке алгоритмов и систем программного и адаптивного управления при движении МРПП, действующих в недетерминированных сложных, динамически изменяющихся условиях окружающей обстановки. На их основе могут быть построены системы управления, распознавания речи и образов, формирования оптимальных движений и расписаний путей и траекторий.

Моделирование движений МРПП на основе нейросетей можно производить, используя, например, пакет прикладных программ MATLAB Fuzzy Logic and Neural Networks [151].

2. Распределенное управление многозвенными роботами

Метод распределенного управления. Распределенное управление вследствие своих возможностей имеет непосредственное отношение к мобильным многозвенным роботам вертикального перемещения. Посредством распределенного управления можно осуществлять координационные автоматические действия как на расстоянии, используя радиоканалы связи, так и непосредственное автоматическое управление механических систем со многими степенями подвижности, применяя наиболее адекватный критерий или несколько критериев управления.

Рассмотрим теоретические аспекты распределенного управления на примере многозвенного робота при изменении взаимного расположения поверхности, по которой он движется и ориентации плоскости опоры по отношению к нормали на эту поверхность. Распределенное управление позволяет значительно повысить точность позиционирования опоры при достижении конечного положения перед установкой на поверхность за минимальное время с учетом обхода препятствий на пути движения.

Для манипулятора с избыточностью степеней подвижности метод распределенного управления был рассмотрен в [135, 15, 90] с учетом взаимодействия скоростей между соседними звеньями, когда требуемая скорость каждого звена и конечного элемента постоянно пересчитывается в направлении к удаленным звеньям в зависимости от задаваемой. Метод распределенного управления на основе уравнений Лагранжа более популярен для анализа обычных манипуляционных роботов [76]. Метод оптимального движения манипулятора с избыточностью, представленный в [89], может быть использован для многозвенной системы.

Для многозвенной системы [9] проблема управления состоит в реализации распределенной и согласованной работы шарнирных приводов с одновременной ориентацией конечного звена (опоры) по отношению к нормали к поверхности, на которой предполагается закрепление. В [9] проблема оптимизации рассматривалась по отношению к задаче оптимального по времени движения системы вдоль заданной траектории и к задаче планирования периодических походок, когда обеспечивается минимальное время для движения от исходного состояния в требуемое положение.

С учетом кинематической структуры системы сделаем следующие допущения:

- все звенья имеют одинаковую длину $l = l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5$;
- каждый шарнир имеет две степени подвижности, которые могут управляться независимо;
- метод управления - распределенный, независимый и координированный;
- возможно реализовать согласованное движение более чем по двум степеням с помощью распределенного управления.

Введем следующие координаты:

- 1) шарниры имеют угловые координаты; у каждого шарнира по две угловые координаты α_i и β_i , где $i = 1, 2, \dots, 4$ - номер координаты шарнира.
- 2) так как каждый шарнир обладает двумя степенями подвижности, то есть 4 шарнира с координатами $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ и $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$.

Уравнения Лагранжа в векторно-матричной форме описывают движение робота [8, 9]:

$$\begin{cases} D(\alpha)\ddot{\alpha} + h(\alpha, \dot{\alpha}) + c(\alpha) = U(t) \\ \bar{D}(\beta)\ddot{\beta} + \bar{h}(\beta, \dot{\beta}) + \bar{c}(\beta) = \bar{U}(t). \end{cases} \quad (4.2.1)$$

Здесь $U(t)$ и $\bar{U}(t)$ – векторы управляющих моментов для встроенных в шарниры моторов размерностью 4×1 ; $\alpha(t)$ и $\beta(t)$ – векторы угловых положений; $\dot{\alpha}(t)$ и $\dot{\beta}(t)$ – векторы угловых скоростей; $\ddot{\alpha}(t)$ и $\ddot{\beta}(t)$ – векторы угловых ускорений размерностью 4×1 ; $c(\alpha)$ и $\bar{c}(\beta)$ – векторы сил гравитации размерностью 4×1 ; $h(\alpha, \dot{\alpha})$ и $\bar{h}(\beta, \dot{\beta})$ – векторы кориолисовых и центробежных сил размерностью 4×1 ; $D(\alpha)$ и $\bar{D}(\beta)$ – матрицы инерции размерностью 4×4 .

Раскрывая матрицы, получим следующую систему:

$$\begin{bmatrix} D_{11} & L & D_{14} \\ M & & M \\ D_{41} & L & D_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\alpha}_1(t) \\ \vdots \\ \ddot{\alpha}_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1(\alpha, \dot{\alpha}) \\ \vdots \\ h_4(\alpha, \dot{\alpha}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1(\alpha) \\ \vdots \\ c_4(\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1(t) \\ \vdots \\ U_4(t) \end{bmatrix} \quad (4.2.2)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{D}_{11} & L & \bar{D}_{14} \\ M & & M \\ \bar{D}_{41} & L & \bar{D}_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\beta}_1(t) \\ \vdots \\ \ddot{\beta}_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{h}_1(\beta, \dot{\beta}) \\ \vdots \\ \bar{h}_4(\beta, \dot{\beta}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{c}_1(\beta) \\ \vdots \\ \bar{c}_4(\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{U}_1(t) \\ \vdots \\ \bar{U}_4(t) \end{bmatrix}$$

Так как каждая матрица $D(\alpha)$ и $\bar{D}(\beta)$ – всегда невырожденные и не равны нулю, то возможно выделить, очевидно, векторы координат шарниров:

$$\begin{cases} \ddot{\alpha}(t) = -D^{-1}(\alpha)[h(\alpha, \dot{\alpha}) + c(\alpha)] + D^{-1}(\alpha)U(t) \\ \ddot{\beta}(t) = -\bar{D}^{-1}(\beta)[\bar{h}(\beta, \dot{\beta}) + \bar{c}(\beta)] + \bar{D}^{-1}(\beta)\bar{U}(t). \end{cases} \quad (4.2.3)$$

Последние два выражения представляют дифференциальные уравнения второго порядка для переменных в шарнирах.

Принимая во внимание невырожденности матриц $D(\alpha)$ и $\bar{D}(\beta)$, следующий подход был разработан в [9], который позволил представить уравнения относительно базовых координат в форме

$$\begin{cases} \ddot{\alpha}_i(t) + a_{li}\dot{\alpha}_i(t) + a_{0i}(t) = \lambda_i w_i(t) \\ \ddot{\beta}_i(t) + b_{li}\dot{\beta}_i(t) + b_{0i}(t) = \bar{\lambda}_i \bar{w}_i(t). \end{cases} \quad (4.2.4)$$

Здесь, $i = 1, 2, 3, 4$; параметры a_{li} , a_{0i} , b_{li} , b_{0i} , λ_i – скалярные величины, вычисляемые на основе данных по конфигурации

многозвенного робота и обеспечивающие стабильность движения.

Выполняя разделение на входные и выходные звенья и представляя многозвенный робот как восемь независимых звеньев, можно записать в явной форме и инвариантной по отношению ко времени систему второго порядка. В этом случае можно получить переменные управления $U(t)$ и $\bar{U}(t)$ на основе динамических уравнений робота, а используя подход, представленный в [8, 9], открыть закон управления. Сформированный для i -го соединения, он будет иметь вид:

$$U_i(t) = h_i(\alpha, \dot{\alpha}) + c_i(\alpha) - [D_{i1} \dots D_{i4}] \times \\ \times \begin{bmatrix} \gamma_{11}\dot{\alpha}_1(t) + \gamma_{01}\alpha_1(t) - \lambda_1\omega_1(t) \\ \gamma_{14}\dot{\alpha}_4(t) + \gamma_{04}\alpha_4(t) - \lambda_4\omega_4(t) \end{bmatrix} \quad (4.2.5)$$

$$\bar{U}_i(t) = \bar{h}_i(\beta, \dot{\beta}) + c_i(\beta) - [D_{i1} \dots D_{i4}] \times \\ \times \begin{bmatrix} \bar{\gamma}_{11}\dot{\beta}_1(t) + \bar{\gamma}_{01}\beta_1(t) - \bar{\lambda}_1\bar{\omega}_1(t) \\ \bar{\gamma}_{14}\dot{\beta}_4(t) + \bar{\gamma}_{04}\beta_4(t) - \bar{\lambda}_4\bar{\omega}_4(t) \end{bmatrix}$$

Т.е. можно найти независимый закон управления $U(t)$ для системы в форме

$$U(t) = F(x) + G(x) * W(t), \quad (4.2.6)$$

где $W(t)$ – m -мерный входной вектор; $F(x)$ – вектор обратной связи размерностью $m \times l$, определяемый разделением и распределением полюсов, $G(x)$ – входная передаточная функция размерностью $m \times m$, которая удовлетворяет входным и выходным звеньям всей системы.

Этот закон управления и алгоритм движения могут быть представлены в векторной форме для α и β координат шарниров:

$$U(t) = h(\alpha, \dot{\alpha}) + C(\alpha) - D(\alpha)[N(x) - LW(t)]; \\ \bar{U}(t) = \bar{h}(\beta, \dot{\beta}) + \bar{C}(\alpha) - D(\beta)[N(x) - LW(t)]. \quad (4.2.7)$$

Из уравнений следует, что управления $U(t)$ и $\bar{U}(t)$ зависят только от текущих динамических переменных и входной переменной $W(t)$.

Если полученные значения углов α и β , которые являются координатами шарниров $q_i(t)$, то можно получить моменты на грузок каждого мотора на основе рекурсивного закона управ-

ления:

$$\ddot{q}_i(t) = \ddot{q}_{i0}(t) + \sum_{j=1}^n K_v^y [\dot{q}_{j0}(t) - \dot{q}_i(t)] + \sum_{j=1}^n K_p^y [q_{j0}(t) - q_j(t)]. \quad (4.2.8)$$

Здесь K_j^y и K_p^y – положение и скорость для коэффициентов обратной связи i -го соединения, где $e_j(t) = q_{j0}(t) - q_j(t)$ – ошибка позиционирования для j -го соединения.

Это рекурсивный пропорционально-дифференциальный закон управления предназначен для компенсации реакций в соединениях и сил гравитации. Чтобы получить необходимые демпфирование и стабильный режим, надо выбрать коэффициенты K_j и K_p обратной связи матрицы, которая является диагональной [9].

В то же время некоторые отклонения от заданной траектории могут возникнуть как результат существования таких нелинейностей, как трение в редукторе, люфты, проскальзывания, колебания нагрузки и задержки.

Рассмотрим подробнее пример распределенного управления многозвездным роботом.

Распределенное управление многозвездным роботом при переходе с одной поверхности на другую. Метод распределенного управления может быть использован в режиме, когда робот переходит с одной поверхности на другую, которые располагаются под различными углами (рис. 4.2.1). Чтобы использовать уравнения Лагранжа, необходимо рассчитать кинетическую и потенциальную энергии системы, вставить данные в уравнения Лагранжа и найти требуемый закон управления.

Введем следующие обозначения: m – масса шарнира с двигателем; M_1 – масса последнего звена с опорой; M_2 – масса промежуточного звена; l_1 – длина крайнего звена с опорой; l_2 – длина промежуточного звена; I_1 – момент инерции крайнего звена; I_2 – момент инерции промежуточного звена; I – момент инерции ротора мотора; L – коэффициент индукции мотора; R – омическое сопротивление обмотки; V – управляемое напряжение; S – расстояние между центром опоры и вертикальной стеной; S_0 – расстояние между центрами опор; K – коэффициент, зависящий от входного напряжения; n – коэффициент передачи редуктора.

Угол положителен, если вращение выполняется против часовой стрелки.

Введем стабильную систему координат с началом в точке 0, которая неподвижна. Во время различных остановок движения стабильная система координат будет всегда связана с непо-

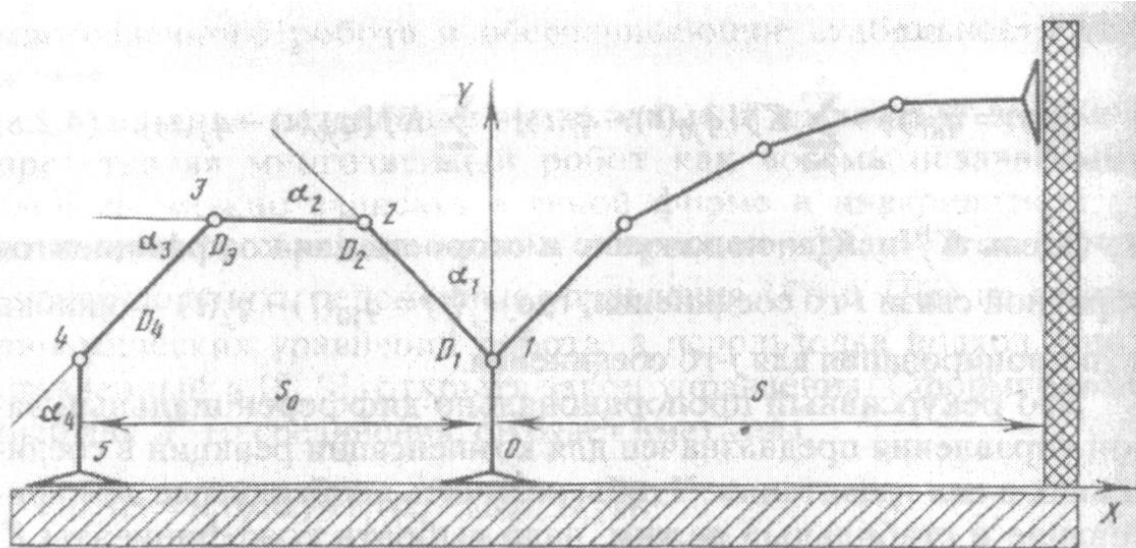


Рис. 4.2.1. Схема перехода с одной поверхности на другую

движной точкой, либо точкой 0, либо точкой S. Соответственно все точки меняют свои индексы: $0 \leftrightarrow 5$, $1 \leftrightarrow 4$, $2 \leftrightarrow 3$.

Подвижная система координат связана с каждым звеном и имеет исходное положение в предыдущем шарнире.

Радиус-вектор "исходного положения" подвижной системы координат относительно неподвижной системы координат записывается следующим образом:

$$(x_1^0)_0 = (0, 0)^T$$

$$(x_2^0)_0 = (0, l_1)^T$$

$$(x_3^0)_0 = (-l_2 \sin \alpha_1, l_1 + l_2 \cos \alpha_1)^T$$

$$(x_4^0)_0 = (-l_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + \sin \alpha_1, l_1 + l_2 (\cos(\alpha_1 + \alpha_2) + \cos \alpha_1))^T$$

$$(x_5^0)_0 = (-l_2 (\sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + \sin(\alpha_1 + \alpha_2) + \sin \alpha_1)$$

$$l_1 + l_2 (\cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + \cos(\alpha_1 + \alpha_2) + \cos \alpha_1))^T.$$

Радиус-векторы центров масс звеньев в подвижной системе координат (предполагая, что центры масс находятся в центре каждого звена):

$$x_1^0 = (0, l_1 / 2)^T$$

$$x_2^0 = (-0,5 l_1 \sin \alpha_1, 0,5 l_2 \cos \alpha_1)^T$$

$$x_3^0 = (-0,5 l_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2), 0,5 l_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2))^T$$

$$x_4^0 = (-0,5 l_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3), 0,5 l_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3))^T$$

$$x_5^0 = (-0,5 l_1 \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4), 0,5 l_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4))^T$$

Кинетическая энергия для j -го звена:

$$T_j = 0,5M_j((\alpha_j)_0)^2 + 0,5(J_j\overline{\Omega}_j, \overline{\Omega}_j) + M_j((\alpha_j)_0, (\dot{\alpha}_j)_0),$$

где $j = 1, 2, 3, 4, 5$.

Кинетическая энергия для ротора мотора D:

$$E_i = 0,5J_i n_i^2 \Omega_i^2, \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

Потенциальная энергия звеньев:

$$\Pi_1 = 0,5M_1gl_1$$

$$\Pi_2 = M_2g(l_1 + 0,5l_2 \cos \alpha_1)$$

$$\Pi_3 = M_2g(l_1 + 0,5l_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) + \cos \alpha_1)$$

$$\Pi_4 = M_2g(l_1 + l_2(0,5 \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + \cos(\alpha_1 + \alpha_2) + \cos \alpha_1))$$

$$\Pi_5 = M_2g(l_1 + l_2(0,5 \cos(\alpha_4 + \alpha_3 + \alpha_2 + \alpha_1) + \cos(\alpha_3 + \alpha_2 + \alpha_1) + \cos(\alpha_2 + \alpha_1) + \cos \alpha_1))$$

Потенциальная энергия шарниров:

$$E_{p1} = mgl_1$$

$$E_{v2} = mg(l_1 + l_2 \cos \alpha_1)$$

$$E_{p3} = mg(l_1 + l_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) + \cos \alpha_1)$$

$$E_v = mg(l_1 + l_2(\cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + \cos(\alpha_2 + \alpha_1) + \cos \alpha_1)).$$

Перейдем к базовым координатам, тогда выражение всех величин " α " будет:

$$\alpha = \alpha_1 \quad \alpha_1 = \alpha$$

$$\beta = \alpha_1 + \alpha_2 \quad \alpha_2 = \beta - \alpha$$

$$\gamma = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad \alpha_3 = \gamma - \beta$$

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 \quad \alpha_4 = \delta - \gamma.$$

Подчеркнем, для удобства:

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \end{pmatrix}$$

Уравнение Лагранжа может быть представлено в ранее указанной форме:

$$A(\alpha)\ddot{\alpha} + B(\alpha)\dot{\alpha}^2 + C(\alpha) = n\mu,$$

где

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \alpha_{14} \\ \alpha_{12} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \alpha_{24} \\ \alpha_{13} & \alpha_{23} & \alpha_{33} & \alpha_{34} \\ \alpha_{14} & \alpha_{24} & \alpha_{34} & \alpha_{44} \end{pmatrix} = A_1 + A_2(\alpha)$$

и A_1 не зависит от α .

Матрица B есть:

$$B = \begin{pmatrix} 0 & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ -b_{12} & 0 & b_{31} & b_{24} \\ -b_{13} & -b_{23} & 0 & b_{34} \\ -b_{14} & -b_{24} & -b_{34} & 0 \end{pmatrix}.$$

И колонка C :

$$C = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{pmatrix}.$$

Теперь рассмотрим, как принять в расчет электромеханические моменты. Предположим, что все моторы одинаковы:

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu$$

$$n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = n$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L$$

$$k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = k.$$

Пусть $L \ll 1$, тогда имеем систему:

$$R\mu - nk^2 \begin{pmatrix} \dot{\alpha}_1 \\ \dot{\alpha}_2 \\ \dot{\alpha}_3 \\ \dot{\alpha}_4 \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix}.$$

Исключая μ и $V_1/kn = U$, $|U| \leq 1$ из предыдущих соотношений, получаем решение основной задачи:

$$\frac{R}{k^2 n^2} A(\alpha) \cdot \begin{pmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{\gamma} \\ \ddot{\delta} \end{pmatrix} + \frac{R}{k^2 n^2} B(\alpha) \cdot \begin{pmatrix} \dot{\alpha}^2 \\ \dot{\beta}^2 \\ \dot{\gamma}^2 \\ \dot{\delta}^2 \end{pmatrix} + D \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \\ \delta \end{pmatrix} + C(\alpha) \cdot \frac{R}{kn} = U,$$

$$D = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\alpha(0) = \alpha^0, \quad \beta(0) = \beta^0, \quad \gamma(0) = \gamma^0, \quad \delta(0) = \pi.$$

Когда $\cos \alpha_0 + \cos \beta_0 + \cos \gamma_0 = 0$, две опоры робота находятся на горизонтальной поверхности.

В это время:

$$\delta(T) = -0,5\pi$$

$$(\sin \alpha + \sin \beta + \sin \gamma)_{t=T} = \frac{S - l_1}{l_2}$$

$$T \rightarrow \min.$$

Примем во внимание конструктивные параметры робота. Для нашей экспериментальной конструкции они равны:

$$l_1 = 0,132m \quad J_1 = 7,9 \cdot 10^{-3} kg \cdot m^2$$

$$l = 0,198m \quad J_2 = 0,01 kg \cdot m^2$$

$$m_1 = 2,7kg \quad J = 3,6 \cdot 10^{-6} kg \cdot m^2$$

$$m_2 = 2,7kg \quad k = 1$$

$$m = 0,2kg \quad R = 10^3.$$

Если мы не принимаем в расчет все коэффициенты, которые много меньше, чем 1, мы будем иметь систему:

$$A\ddot{\alpha} + D\alpha = U, \quad \text{где} \quad A = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{44} \end{pmatrix},$$

где

$$\frac{R}{kn} \alpha_{11} = J_2 + J(n^2 + 2n + 1) + M_2 l_2^2 \approx 391,796$$

$$\frac{R}{kn} \alpha_{22} = J_2 + J(2n^2 + 2n + 1) + M_2 l_2^2 \approx 783,497$$

$$\frac{R}{kn} \alpha_{33} = J_2 + J(2n^2 + 2n + 1) + M_1 l_1^2 \approx 783,491$$

$$\frac{R}{kn} \alpha_{44} = J_1 + Jn^2 = 391,732$$

и D – предыдущая матрица.

Выполним оптимизацию:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha \\ \dot{\alpha} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ A^{-1}(U - Dx_2) \end{pmatrix}$$

$$H = (p_1 x_2) + (p_2 A^{-1}(U - Dx_2))$$

$$\begin{cases} \dot{p}_1 = 0 \\ \dot{p}_2 = -p_1 + A^{-1}(p_2 D), \end{cases}$$

где x_1 , x_2 , p_1 , p_2 – четырехмерные колонки-векторы.

Теперь мы имеем систему из 8 уравнений с восемью неизвестными.

Чтобы решить эту систему, примем во внимание принцип максимума и условие трансверсальности. Тогда получим:

$$U = \text{sign}(p_2) = -1.$$

Следовательно, все звенья должны вращаться по часовой стрелке, чтобы решить проблему быстрого распределения.

Число работающих моторов зависит от S_0 и S .

Для нашей задачи:

$$\begin{cases} l_1 \leq S_0 \leq 3l_2 \\ 0 \leq S \leq 3l_2 + l_1. \end{cases}$$

Если $0 \leq |S - S_0| < l_1 + l_2$ работают два мотора;

$l_2 + l_1 \leq |S - S_0| < 2l_2 + l_1$ – работают три мотора;

$2l_2 + l_1 \leq |S - S_0| \leq 3l_2$ – работают четыре мотора.

Следует, что D_4 мотор будет работать всегда.

Число остальных работающих моторов зависит от формы кривой $T_1 = T_1(\Delta\alpha_1)$, которая может быть найдена экспериментально.

Рассмотрим задачу распределенного управления при работе двух двигателей.

Примем, что постановка подвижной опоры на вертикальную стену выполняется с помощью двух моторов; l_1 , l_2 , S_0 , S могут иметь произвольные размеры.

Граничные условия:

$$(\cos \alpha + \cos \beta + \cos \gamma)_{t=0} = (\cos \alpha^0 + \cos \beta^0 + \cos \gamma^0) = 0$$

$$(\sin \alpha + \sin \beta + \sin \gamma)_{t=T} = \sin \alpha^T + \sin \beta^T + \sin \gamma^T = \frac{S - l_1}{l_2}$$

$$\delta(0) = \delta^0 = \pi \quad \delta(T) = \delta^T = -\frac{\pi}{2} \Rightarrow \Delta \delta = -\frac{3\pi}{2}$$

Для случая, когда работают двигатели D_4 и D_1 :

$$\begin{cases} \Delta \alpha_1 = 0 \\ \Delta \alpha_2 = 0 \\ \Delta \alpha_3 = \Delta \gamma \\ \Delta \alpha_4 = \Delta \delta - \Delta \gamma \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta \alpha = 0 \Rightarrow \alpha^0 = \alpha^T \\ \Delta \beta = 0 \Rightarrow \beta^0 = \beta^T \\ \Delta \gamma = \Delta \alpha_3 \\ \Delta \delta = \Delta \alpha_3 + \Delta \alpha_4 \end{cases}$$

$$\sin \alpha^T + \sin \beta^T + \sin \gamma^T = \sin \alpha^0 + \sin \beta^0 + \sin \gamma^0 = \frac{S - l_1}{l_2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sin \gamma^T = \frac{S - l_1}{l_2} - (\sin \alpha^0 + \sin \beta^0).$$

Принимая во внимание, что вращение выполняется по часовой стрелке, мы имеем:

$$\gamma^T = \arcsin \left(\frac{S - l_1}{l_2} - (\sin \alpha^0 + \sin \beta^0) \right)$$

и можно найти $\Delta \alpha_3$ и $\Delta \alpha_4$.

Возможна схема, когда:

$$\left| \frac{S - l_1}{l_2} - (\sin \alpha^0 + \sin \beta^0) \right| \leq 1$$

Когда D_4 и D_2 -двигатели работают:

$$\begin{cases} \Delta \alpha_1 = 0 \\ \Delta \alpha_2 = \Delta \beta \\ \Delta \alpha_3 = 0 \\ \Delta \alpha_4 = \Delta \delta - \Delta \beta \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \Delta \alpha = 0 \Rightarrow \alpha^0 = \alpha^T \\ \Delta \beta = \Delta \alpha_2 \Rightarrow \beta^T - \beta^0 = \gamma^T - \gamma^0 \\ \Delta \gamma = \Delta \gamma_2 \\ \Delta \delta = \Delta \alpha_2 + \Delta \alpha_4 = -\frac{3\pi}{2} \end{cases}$$

$$\Delta \beta = \Delta \gamma \Rightarrow \beta^T - \beta^0 = \gamma^T - \gamma^0 \Rightarrow \beta^T - \gamma^T = \beta^0 - \gamma^0$$

$$\begin{aligned}\sin \alpha^T + \sin \beta^T + \sin \gamma^T &= \sin \alpha^0 + 2 \sin \frac{\beta^T + \gamma^T}{2} \cos \frac{\beta^T - \gamma^T}{2} \\ &= \sin \alpha^0 + 2 \sin \frac{\beta^T + \gamma^T}{2} \cos \frac{\beta^0 - \gamma^0}{2} = \frac{S - l_1}{l_2}\end{aligned}$$

$$\sin \frac{\beta^T + \gamma^T}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{S - l_1}{l_2} - \sin \alpha_0 \right) \cos^{-1} \frac{\beta^0 - \gamma^0}{2}$$

$$\begin{cases} \beta^T + \gamma^T = 2 \arcsin \left(\frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{\beta^0 - \gamma^0}{2} \cdot \left(\frac{S - l_1}{l_2} - \sin \alpha_0 \right) \right) \\ \beta^T - \gamma^T = \beta^0 - \gamma^0. \end{cases}$$

Решая систему, найдем β^T и γ^T и затем $\Delta \alpha_2$ и $\Delta \alpha_4$.

Отметим, что $(\beta^0 - \gamma^0)/2 \neq 0$, с другой стороны $\beta \Rightarrow \alpha_3^0 = -\pi$, что невозможно.

Таким образом:

$$\left| \left(\frac{S - l_1}{l_2} - \sin \alpha_0 \right) \cos^{-1} \frac{\beta^0 - \gamma^0}{2} \right| \leq 2.$$

Когда моторы D_1 и D_2 работают:

$$\begin{cases} \Delta \alpha_1 = \Delta \alpha \\ \Delta \alpha_2 = 0 \\ \Delta \alpha_3 = 0 \\ \Delta \alpha_4 = \Delta \delta - \Delta \alpha \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta \alpha = \Delta \alpha_1 \\ \Delta \beta = \Delta \alpha_1 \\ \Delta \gamma = \Delta \alpha_1 \\ \Delta \delta = \Delta \alpha_4 + \Delta \alpha_1 = -\frac{3\pi}{2} \end{cases} \begin{cases} \Delta \alpha = \Delta \alpha_1 \\ \alpha_0 + \Delta \alpha \\ \beta_0 + \Delta \beta \\ \gamma_0 + \Delta \gamma \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sin \alpha^T = \sin(\alpha^0 + \Delta \alpha) = \sin \alpha^0 \cos \Delta \alpha + \cos \alpha^0 \sin \Delta \alpha \\ \sin \beta^T = \sin(\beta^0 + \Delta \beta) = \sin \beta^0 \cos \Delta \beta + \cos \beta^0 \sin \Delta \beta = \\ = \sin \beta^0 \cos \Delta \alpha + \cos \beta^0 \sin \Delta \alpha \\ \sin \gamma^T = \sin \gamma^0 \cos \Delta \gamma + \cos \gamma^0 \sin \Delta \gamma = \\ = \sin \gamma^0 \cos \Delta \alpha + \cos \gamma^0 \sin \Delta \alpha \end{cases}$$

$$\begin{aligned}\sin \alpha^T + \sin \beta^T + \sin \gamma^T &= \\ &= \cos \Delta \alpha (\sin \alpha^0 + \sin \beta^0 + \sin \gamma^0) + \\ &+ \sin \Delta \alpha (\cos \alpha^0 + \cos \beta^0 + \cos \gamma^0) = \frac{S - l_1}{l_2}\end{aligned}$$

$$\cos \Delta \alpha = \frac{S - l_1}{l_2} \cdot \frac{1}{\sin \alpha^0 + \sin \beta^0 + \sin \gamma^0}.$$

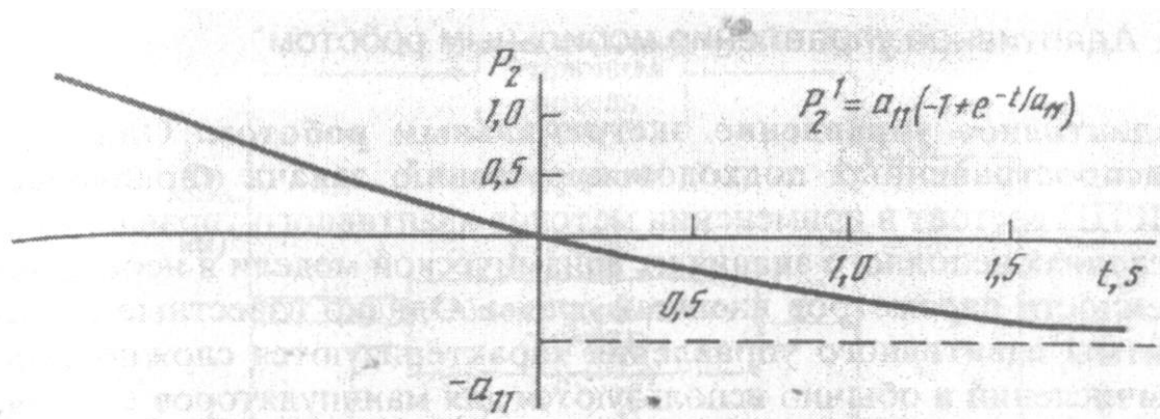


Рис. 4.2.2. Расчетное изменение положения последнего звена робота в зависимости от времени, когда работают моторы D_1 и D_2

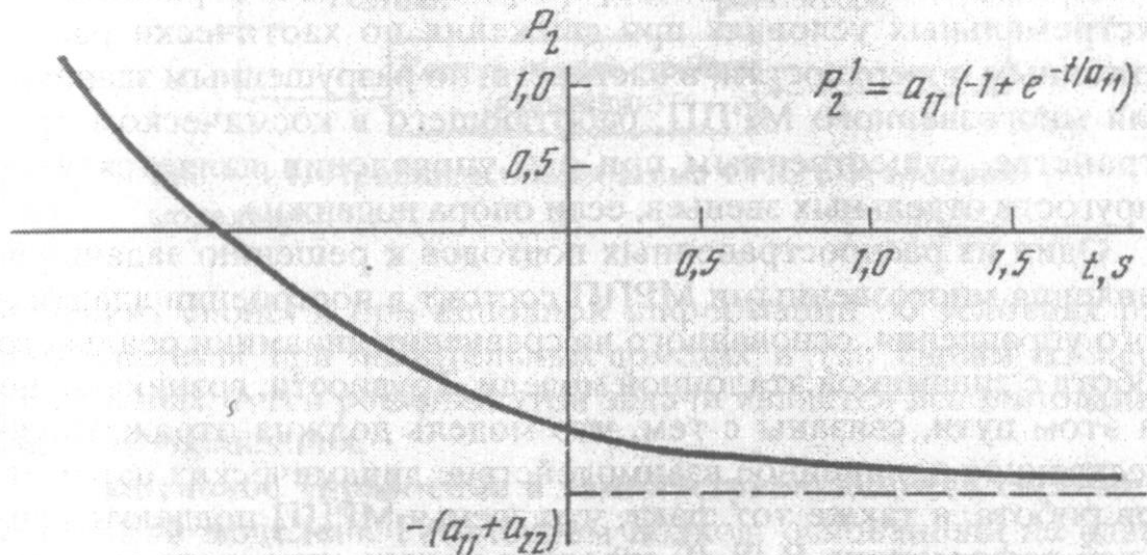


Рис. 4.2.3. Расчетное изменение положения последнего звена робота в зависимости от времени, когда работают моторы D_3 и D_4

Зная $\Delta\alpha$, находим $\Delta\alpha_1$ и $\Delta\alpha_4$.

Отметим, что $(\sin\alpha^0 + \sin\beta^0 + \sin\gamma^0) \neq 0$, потому что $(\cos\alpha^0 + \cos\beta^0 + \cos\gamma^0) = 0$.

Ограничение есть:

$$\left| \frac{S - l_1}{l_2} \cdot \frac{1}{\sin\alpha^0 + \sin\beta^0 + \sin\gamma^0} \right| \leq 1.$$

Расчетные изменения в положении последнего звена робота в зависимости от времени, когда моторы D_1 и D_2 работают, представлены на рис. 4.2.2, и когда работают моторы D_3 – D_4 – на рис. 4.2.3.

3. Адаптивное управление мобильным роботом

Адаптивное управление экстремальным роботом. Один из распространенных подходов к решению задачи управления МРПП состоит в применении методов адаптивного управления в условиях неполного знания их динамической модели и неопределенности параметров внешней среды. Однако известные алгоритмы адаптивного управления характеризуются сложностью вычислений и обычно используются для манипуляторов с двумя или тремя степенями подвижности. В работе [66] предложен эффективный в вычислительном отношении адаптивный алгоритм, который может использоваться для многозвенного МРПП с замкнутыми цепями при неизвестных собственных массах. Такая задача возникает, например, когда робот работает в экстремальных условиях при движении по хаотически расположенным поверхностям, в частности, по разрушенным зданиям. Для многозвенного МРПП, работающего в космическом пространстве, существенным при его управлении является учет упругости отдельных звеньев, если опора подвижна.

Один из распространенных подходов к решению задачи управления многозвенными МРПП состоит в построении адаптивного управления, основанного на сравнении динамики реального робота с динамикой эталонной модели. Трудности, возникающие на этом пути, связаны с тем, что модель должна отражать существенное нелинейное взаимодействие динамических параметров робота, а также тот факт, что звенья МРПП поддаются упругой деформации. В [8, 9] строится модель двурукого манипулятора, в которой, хотя каждая рука и представляется как цепочка твердых тел, не оказывающих друг на друга инерционного влияния, тем не менее его движение описывается достаточно адекватно, так как модель имеет те же положения равновесия, что и реальный манипулятор. Модель учитывает параметры робота, значения которых могут быть неизвестны, или известны неточно. На основании этой модели строится адаптивная система управления (СУ) с обратной связью, основанная на принципе сравнения с эталонной моделью. Эта СУ организует согласованное движение звеньев, отслеживающее движение эталонной модели.

Современное развитие робототехники поставило перед теорией автоматического регулирования задачу качественного управления объектами с широким диапазоном изменения дина-



Рис. 4.3.1. Принципиальная схема СНС с эталонной моделью

мических свойств, при неполной информации об условиях работы системы, при значительных помехах и т.д. Одним из перспективных путей решения этой задачи является использование методов управления.

Адаптивное управление в самонастраивающейся системе с эталонной моделью. Рассмотрим подход, основанный на адаптивной самонастраивающейся системе с эталонной моделью (**СНС**) на основе информации о параметрах внешних воздействий и динамических характеристиках МРПП, получаемых в процессе работы. После этого осуществляется активное изменение параметров регулятора. Самонастраивающаяся система с эталонной моделью в простейшем случае может быть описана структурной схемой, изображенной на рис. 4.3.1 [28].

Пусть МРПП (в дальнейшем объект) описывается линейным дифференциальным уравнением n -го порядка с постоянными, заранее неизвестными коэффициентами, которые могут меняться в широких пределах

$$x''(t) + \sum_{i=1}^n [a_i + \Delta a_i + \delta a_i(t)] x^{(n-i)}(t) = f(t), \quad (4.3.1)$$

где Δa_i – постоянные, априори неопределенные коэффициенты, $\delta a_i(t)$ – коэффициенты, вырабатываемые контуром самонастройки.

Эталонная модель описывается уравнением:

$$y^n(t) + \sum_{i=1}^n a_i y^{(n-i)}(t) = f(t),$$

где $t(t)$ – выход модели, $f(t)$ – управляющее воздействие (входной сигнал). Предполагается, что эталонная модель асимптотически устойчива.

Целью СНС с эталонной моделью является построение такого контура самонастройки, т.е. определение алгоритма изменения $\delta a_i(t)$, при котором $x(t) \rightarrow y(t)$, $t \rightarrow \infty$.

Запишем уравнения объекта и эталонной модели в матричной форме

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + [\Delta A + \delta A(t, x, y)]x(t) + f(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad (4.3.2)$$

$$\dot{y}(t) = Ay(t) + f(t), \quad y(t_0) = y_0. \quad (4.3.3)$$

Здесь $x(t)$, $y(t) \in R^n$ – векторы фазовых координат объекта и эталонной модели, A – вещественная постоянная гурвицева матрица вида

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_n \end{bmatrix}. \quad (4.3.4)$$

ΔA – вещественная постоянная матрица с априори неизвестными коэффициентами, зависящими от объекта управления, $\delta A(t, x, y)$ – матрица параметров, изменяемых контуром самонастройки. Матрицы ΔA и δA имеют вид

$$\Delta A = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \\ \Delta a_1 & \dots & \Delta a_n \end{bmatrix}, \quad \delta A(t, x, y) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 \\ \delta a_1 & \dots & \delta a_n \end{bmatrix}. \quad (4.3.5)$$

Вектор управляющих воздействий имеет вид $f^T(t) = (0, \dots, 0, f_n(t))$, где верхний индекс T здесь и далее означает операцию транспонирования.

Для вектора координатного рассогласования $\epsilon(t) = x(t) - y(t)$, вычитая из (4.3.2) уравнение (4.3.3), получим

$$\dot{\epsilon}(t) = A\epsilon(t) + [\Delta A + \delta A(t, x, y)]x(t), \quad \epsilon(t_0) = \epsilon_0, \quad (4.3.6)$$

или в более удобном для дальнейшего виде

$$\dot{\epsilon}(t) = A\epsilon(t) + X(t)\alpha(t, x, t), \quad \epsilon(t_0) = \epsilon_0. \quad (4.3.7)$$

Здесь $X(t)$ – матрица, у которой последняя строка совпадает с вектором $x^T(t)$, а $\alpha(t, x, y)$ – вектор параметрического рассогласования

$$\alpha^T(t, x, y) = (\Delta a_1 + \delta a_1(t, x, y), \dots, \Delta a_n + \delta a_n(t, x, y)).$$

Для синтеза контура самонастройки используем второй метод Ляпунова. Выберем функцию Ляпунова в виде квадратичной формы

$$V(t, \varepsilon, \alpha) = \varepsilon^T \Gamma \varepsilon + \alpha^T \alpha, \quad (4.3.8)$$

где положительно определенная матрица Γ удовлетворяет матричному уравнению

$$A^T \Gamma + \Gamma A = -CE.$$

Известно, что такая матрица Γ существует.

Уравнение контура самонастройки

$$\dot{\alpha}(t) = \theta(t, \varepsilon, x, y)$$

берут таким, чтобы производная выбранной функции V была не положительна

$$\frac{dV}{dt} \leq 0.$$

Производная функции (4.3.8) в силу системы (4.3.7) равна

$$\dot{V} = -C|\varepsilon|^2 + \alpha^T X^T \Gamma \varepsilon + \varepsilon^T \Gamma X \alpha + \dot{\alpha}^T \alpha + \alpha^T \dot{\alpha} = -C|\varepsilon|^2 \leq 0. \quad (4.3.9)$$

если принять, что контур адаптации описывается уравнением

$$\dot{\alpha}(t) = -X^T(t) \Gamma \varepsilon(t). \quad (4.3.10)$$

Алгоритм (4.3.10) охватывает большинство известных в настоящее время алгоритмов адаптации. Считая векторы $x(t)$, $y(t)$, $\varepsilon(t)$ измеряемыми, видим, что алгоритм (4.3.10) в принципе может быть реализован. При этом автоматически из способа синтеза вытекает, что СНС (4.3.7), (4.3.10) будет устойчива по $\varepsilon(t)$ и $\alpha(t)$.

На практике часто встречаются объекты, в которых матрица коэффициентов зависит от некоторого числа параметров.

Пусть объект описывается уравнением

$$\dot{x}(t) = A(q)x(t) + \delta Z(t) + f(t), \quad x \in R^n, \quad (4.3.11)$$

а эталонная модель – уравнением

$$\dot{y}(t) = A(q^0)y(t) + f(t), \quad y \in R^n, \quad f(t) \in R^n. \quad (4.3.12)$$

Здесь $q \in R^m$ – вектор параметров, от которых зависит матрица объекта, $A(q^0)$ – гурвицева матрица, $\delta Z(t)$ – вектор, вырабатываемый контуром самонастройки. Задача состоит в определении структуры и алгоритма изменения вектора $\delta Z(t)$, при котором $\varepsilon(t) = x(t) - y(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$. Вектор фазовой ошибки $\varepsilon(t)$ удовлетворяет уравнению

$$\dot{\varepsilon}(t) = A(q^0)\varepsilon + [A(q) - A(q^0)]x(t) + \delta Z(t). \quad (4.3.13)$$

Разлагая $A(q)$ в ряд, получим

$$A(q) - A(q^0) = \sum_{i=1}^m \Delta q_i \frac{\partial A(q)}{\partial q_i} + O(|\Delta q|),$$

$$q - q^0 = \Delta q, \quad \Delta q \in R^m, \quad (4.3.14)$$

где значения производных в (4.3.13) вычисляются при $q = q^0$.

Введем вектор $\delta Z(t)$, вырабатываемый контуром самонастройки

$$\delta Z(t) = \sum_{i=1}^m \delta q_i(t) B_i(t), \quad B_i(t) = \left. \frac{\partial A(q)}{\partial q_i} \right|_{q=q^0} x(t). \quad (4.3.15)$$

Здесь $\delta q_i(t)$ – скалярные функции, алгоритм изменения которых будет определен ниже.

С учетом (4.3.14), (4.3.15) уравнение (4.3.13) можно переписать в виде

$$\dot{\varepsilon}(t) = A(q^0)\varepsilon(t) + \sum_{i=1}^m (\Delta q_i + \delta q_i) \frac{\partial A}{\partial q_i} x(t) + O(|\Delta q|)x(t). \quad (4.3.16)$$

Предположим, что матрица $A(q)$ линейно зависит от параметра q . Тогда последний член в уравнении (4.3.16) отсутствует и (4.3.16) принимает вид

$$\dot{\varepsilon}(t) = A(q^0)\varepsilon(t) + \sum_{i=1}^m \beta_i(t) \frac{\partial A}{\partial q_i} x(t),$$

$$\beta_i(t) = \Delta q_i + \delta q_i(t). \quad (4.3.17)$$

Дальнейший синтез контура самонастройки произведем, используя функцию Ляпунова. Выберем функцию Ляпунова в виде

$$V(t, \varepsilon, \beta) = \varepsilon^T \Gamma \varepsilon + \sum_{i=1}^m \beta_i^2(t), \quad \Gamma > 0, \quad \Gamma = \Gamma^T, \quad (4.3.18)$$

где матричная функция Γ в общем случае имеет вид $\Gamma = \Gamma(t, x, y)$.

Полная производная этой функции в силу уравнений (4.3.17) равна

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & \varepsilon^T (A^T(q^0) \Gamma + \Gamma A(q^0) + \dot{\Gamma}) \varepsilon + \\ & + \sum \beta_i(t) (B_i^T \Gamma \varepsilon + \varepsilon^T \Gamma B_i + 2\dot{\beta}_i(t)). \end{aligned} \quad (4.3.19)$$

Так как матрица Γ симметрическая, то имеем $B_i^T \Gamma \varepsilon = \varepsilon^T \Gamma B_i$. Возьмем следующий алгоритм настройки параметров $\delta q_i(t)$

$$\frac{d}{dt}(\delta q_i(t)) = \dot{\beta}_i(t) = -B_i^T \Gamma \varepsilon = -x^T(t) \left(\frac{\partial A}{\partial q_i} \right)^T \Gamma \varepsilon; \quad (4.3.20)$$

$$\beta_i(0) = \Delta q_i, \quad \delta q_i(0) = 0.$$

Пусть матрица $\Gamma(t, x, y)$ удовлетворяет условиям

$$\begin{aligned} C_1 |p|^2 & \leq p^T \Gamma(t, x, y) \leq C_2 |p|^2, \\ p^T (A^T \Gamma + \Gamma A + \dot{\Gamma}) & \leq -C_3 |p|^2, \end{aligned} \quad (4.3.21)$$

в которых положено $A = A(q^0)$; матрица $A(q)$ линейно зависит от параметров и $A(q^0)$ – гурвицева матрица. Тогда можно показать, что (4.3.17), (4.3.20) устойчивы по $\varepsilon(t)$ и $\beta'(t)$, а также асимптотически устойчивы в целом по фазовой ошибке.

Для общего случая матрицы $A(q)$, произвольно зависящей от параметров устойчивости, может не быть. Однако полученная СНС обладает следующим свойством. Если управляющее воздействие ограничено, то фазовая ошибка также ограничена, причем она может быть сделана сколько-угодно малой, если только параметрическое рассогласование объекта и эталонной модели достаточно мало. Доказательство этого свойства получается как следствие общих теорем об устойчивости.

4. Нечеткие системы на основе процессора с весовыми ассоциативными правилами

Повышение уровня интеллектуальности систем методами нечеткого управления. Применение и развитие метода управления на базе нечеткой логики (fuzzy logic) – одна из возможностей увеличить интеллектуальный уровень систем автоматического управления автономных мобильных роботов различных типов, в том числе и МРПП.

Такие системы дают возможность работать в реальном масштабе времени и принимать простые решения в процессе движения. Они должны быть оборудованы сенсорными устройствами на базе нечеткой логики, специальными процессорами с встроенным программным обеспечением, блоками памяти и т.д.

Нечеткие системы получили различные применения с тех пор, как профессор Л. Заде представил концепцию [202] нечетких множеств. Методы проектирования и аппаратные устройства, включая нечеткие логические контроллеры, использовались для самых различных управляющих структур [60-61, 147, 148, 151,159].

Несмотря на пригодность различных прототипов автоматических нечетких систем управления, в этой области есть много нерешенных проблем, связанных с дополнительными требованиями к автономным робототехническим системам и отдельным устройствам.

Одна из проблем связана с развитием нечетких систем управления сложными нелинейными механическими системами типа многозвенного автономного МРПП, предназначенного для работы в неструктурированных средах с возможностью движения по нерегулярным и разделенным друг от друга поверхностям. В такой работе для перемещения отдельных звеньев применяются электродвигатели постоянного тока и требуется их согласованная работа друг с другом, чтобы выполнять координированное движение механической системы в целом. Обычный метод управления может быть использован для такой цели, но он имеет низкое эффективное приложение для этого вида машин. Дополнительные требования к таким роботам более сложны в сравнении с требованиями к роботам, предназначенным только для движения по горизонтальным поверхностям. Они связаны с специальным управлением устройствами, обеспечивающим прикрепление робота к стене, с высокой мощностью локальных систем приводов и с координированным распределенным и локальным управлением. Предложенный мехатронный подход [104] основан на распределенном управлении различными локальными системами, когда каждая из них включает интегрированные датчики, привода, клапаны, преобразователи, работающие под программным обеспечением управления.

Система должна базироваться на организации многоуровневой структуры и первичных задач перераспределения, когда нечеткое логическое навигационное управление использует информационные данные от датчиков. Дополнительные подходы требуются, чтобы найти разумное решение при создании механической, транспортной, сенсорной и управляющей систем робота. При таком комплексном управлении обычное нечеткое логическое решение не может быть эффективным,

поэтому чтобы получить высокий результат, в предложенном ранее методе "от ячейки к ячейке" для формирования структуры устройства управления с нечетким алгоритмом [116, 170] в случае комплексного управления правилами и функции принадлежности были реализованы через аппаратное решение - процессор с **весовыми** ассоциативными правилами W.A.R.P-процессор (Weight Associative Rules Processor) [195]. Создание интегрированной структуры комплексных систем с высокими возможностями и гибкостью логического вывода основано на модульной архитектуре параллельных блоков памяти для уменьшения времени расчетов и способности W.A.R.P-процессора обрабатывать большое количество информации с помощью методов таблиц поиска, причем с большей эффективностью, чем через интерактивное вычисление [159]. Эти факторы более эффективны именно при использовании W.A.R.P-процессора для нечетких систем.

Нечеткий процессор получает информацию от датчиков, установленных на роботе, и выполняет логическую обработку для управления движением робота под определенной программой согласно режиму, заданному с пульта оператора. Подключение датчиков, установленных на роботе, и пульта оператора к нечеткому процессору выполняется с помощью модуля интерфейса, который разработан для этой цели.

Интерфейс обеспечивает согласование сигналов от датчиков углов поворота (аналогового типа, 9 датчиков), датчиков предельных углов поворота (дискретного типа 8 датчиков) и от кнопок панели оператора (дискретного типа 8 кнопок) с уровнем входных сигналов нечеткого процессора.

С использованием W.A.R.P-процессора предполагается выполнять такие режимы движения, как:

- ходьба робота путем поворота над закрепленной опорой (подобно акробату);
- антропоморфная ходьба (типа движения человека);
- ходьба робота последовательным придвижением одной опоры к другой (так перемещается насекомое гусеница);
- движение свободной опоры в пространстве базовой системы координат;
- движение свободной опоры в инструментальной системе координат;
- движение свободной опоры за счет последовательных или одновременных поворотов соответствующих звеньев.

При этом тип режима может быть установлен с помощью пульта оператора, который через интерфейс связывается с нечетким процессором.

Конфигурация W.A.R.P-процессора в нечетких системах

Аппаратная и программная структуры W.A.R.P. обеспечиваются высокой эффективностью и надежностью функционирования нечетких систем. Концепция гибкости и модульности внутренних и внешних связей обеспечивает широкие потенциальные возможности для прикладных применений.

Новейшие модели W.A.R.P-систем позволяют принимать различные структуры данных для представления функций принадлежности, характеризующих нечеткие переменные и последовательности правил, таким образом, что архитектора W.A.R.P. позволяет хранить информацию в двух устройствах блоков памяти - отдельно для функций принадлежности левых и правых частей правил [171]. Так, для наиболее часто возникающей необходимости типичного процесса регулирования частоты вращения двигателя, системы управления формирует одну степень свободы и с одним или несколькими параметрами управления.

Для одного из важных применений W.A.R.P. при проектировании системы нечеткого управления электродвигателями постоянного тока для степеней подвижности МРПП, основная схема такой нечеткой системы (рис. 4.4.1) включает аналого-цифровой и цифро-аналоговые преобразователи, привод, обратную связь и устройства ввода.

Следующие уравнения описывают нечеткую систему для управления скоростью вращения электродвигателя постоянного тока:

$$\varepsilon(t) = V_r(t) - V_{\text{out}}(t);$$

$$d[\varepsilon(t)] = d[V_r(t) - V_{\text{out}}(t)] = d(\Delta V);$$

$$V_c(T) = V_c(T-1) + \Delta V_c(T);$$

$$V_{\text{out}} = K_1 \cdot \omega,$$

где $V_r(t)$ – рекомендуемое входное напряжение; $V_{\text{out}}(t)$ – выходное напряжение, заданное тахогенератором; $d[\varepsilon(t)]$ – производная ошибки; V_c – конечное значение напряжения управления в момент T , которое является равным сумме напряжения управления в момент $(T-1)$ и значения, полученного нечетким выводом $V_c(T)$. Входы $\varepsilon(t)$ и $d[\varepsilon(t)]$ вычисляются в момент T . При этом характеристики нагрузки очень важны, так как разным нагрузкам соответствуют различные значения скорости оборотов на выходе, которые регулируются с помощью изменения тока в обмотке двигателя и/или напряжения, которые учитываются при анализе в системе.

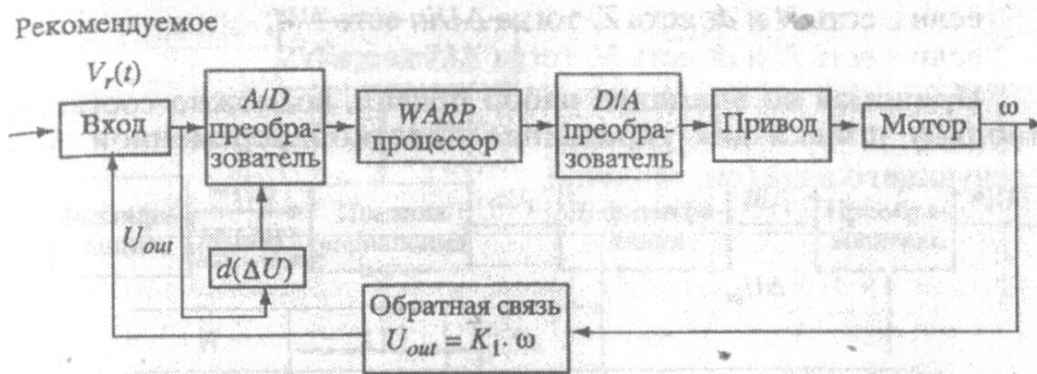


Рис. 4.4.1. Конфигурация WARP системы управления скоростью вращения мотора постоянного тока

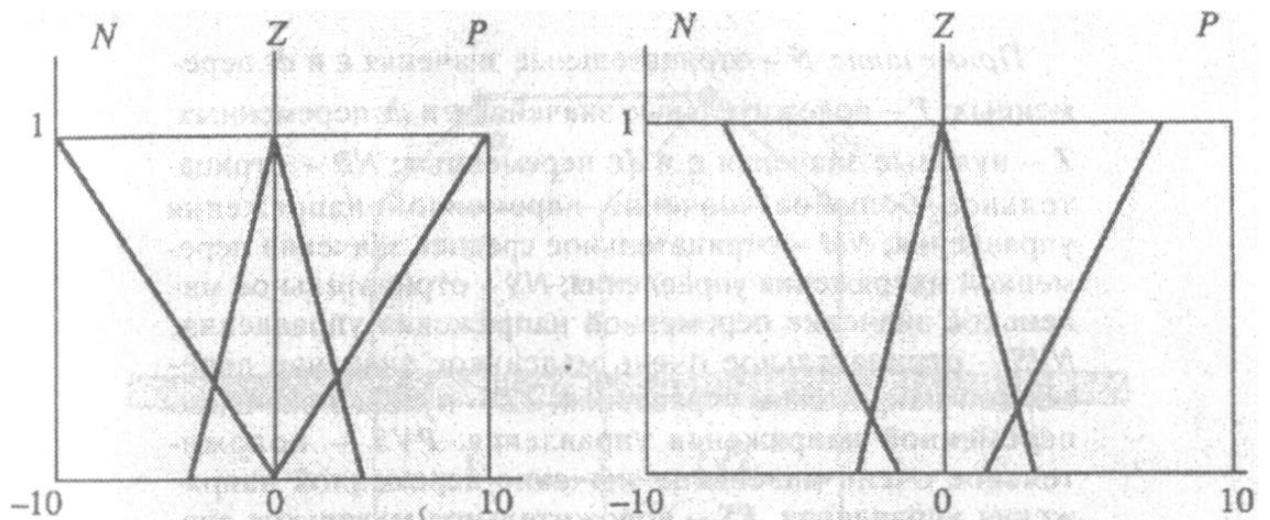


Рис. 4.4.2. MF для ε входной переменной

Рис. 4.4.3. MF для $d\varepsilon$ входной переменной

Функции принадлежности для входных переменных ε и $d[\varepsilon(t)]$ имеют значения скоростных вариаций относительно устойчивой позиции, а именно отрицательное (N), нулевое (Z) и положительное (P) и таким способом формируют три функции принадлежности для каждой из входных переменных. Девять правил устройства управления с нечетким алгоритмом могут быть созданы посредством всевозможных комбинаций набора функций принадлежности (рис. 4.4.2, 4.4.3).

Набор правил имеет следующее представление, получаемое комбинацией изображенных функций принадлежности:

если ϵ есть P и $d\epsilon$ есть P , тогда ΔU_{in} есть PS ;
если ϵ есть P и $d\epsilon$ есть Z , тогда ΔU_{in} есть PVS ;
если ϵ есть P и $d\epsilon$ есть N , тогда ΔU_{in} есть PB ;
если ϵ есть Z и $d\epsilon$ есть P , тогда ΔU_{in} есть NVS ;
если ϵ есть Z и $d\epsilon$ есть Z , тогда ΔU_{in} есть ZZ ;
если ϵ есть Z и $d\epsilon$ есть N , тогда ΔU_{in} есть PVS ;
если ϵ есть N и $d\epsilon$ есть P , тогда ΔU_{in} есть NB ;

если ϵ есть N и $d\epsilon$ есть Z , тогда ΔU_{in} есть NM ;
если ϵ есть N и $d\epsilon$ есть N , тогда ΔU_{in} есть NS .

Принимая во внимание набор правил, возможно составить таблицу поиска для управления нечеткой переменной ΔU_{in} следующего вида (см. таблицу).

ΔU_{in}		d		
		P	Z	N
ϵ	N	NB	NM	NS
	Z	NVS	ZZ	PVS
	P	PS	PM	PB

Примечание. N – отрицательные значения ϵ и $d\epsilon$ переменных; P – положительные значения ϵ и $d\epsilon$ переменных; Z – нулевые значения ϵ и $d\epsilon$ переменных; NB – отрицательное большое значение переменной напряжения управления; NM – отрицательное среднее значение переменной напряжения управления; NS – отрицательное маленькое значение переменной напряжения управления; NVS – отрицательное очень маленькое значение переменной напряжения управления, ZZ – нулевое значение переменной напряжения управления, PVS – положительное очень маленькое значение переменной напряжения управления, PS – положительное маленькое значение переменной напряжения управления, PM – положительное среднее значение переменной напряжения управления, PB – положительное большое значение переменной напряжения управления.

Такой подход требуется во многих случаях для того, чтобы управлять объектами, имеющими не только одну степень свободы, например, такими видами механической системы, как мобильные роботы. В этом случае конфигурация W.A.R.P. системы может быть представлена подобно мультивходной нечеткой системе (рис. 4.4.4), которая обладает возможностями изменять правила управления в зависимости от алгоритмов координации и при нахождении соответствующей базы правил. Эту схему удобно использовать для реализации распределенного управления между различными степенями подвижности сложных механических систем и для применения к нечеткому управлению многозвенных МРПП.

Нечеткая система управления многозвенным МРПП. Мобильный робот с многозвенной кинематической структурой предназначен для перемещения по нерегулярно расположенным

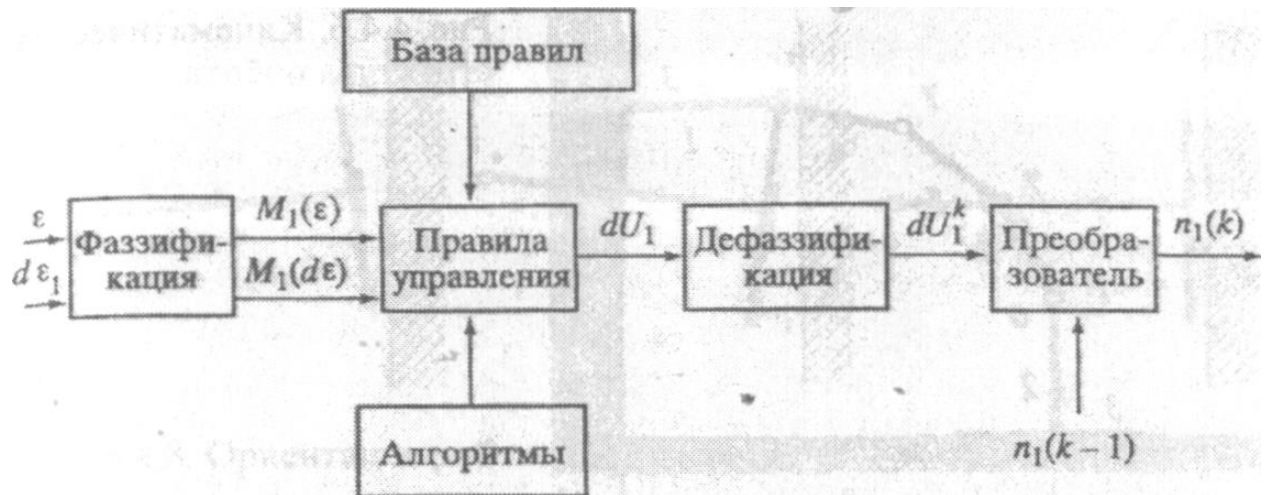


Рис. 4.4.4. Конфигурация **WARP** системы управления многозвенным МРПП

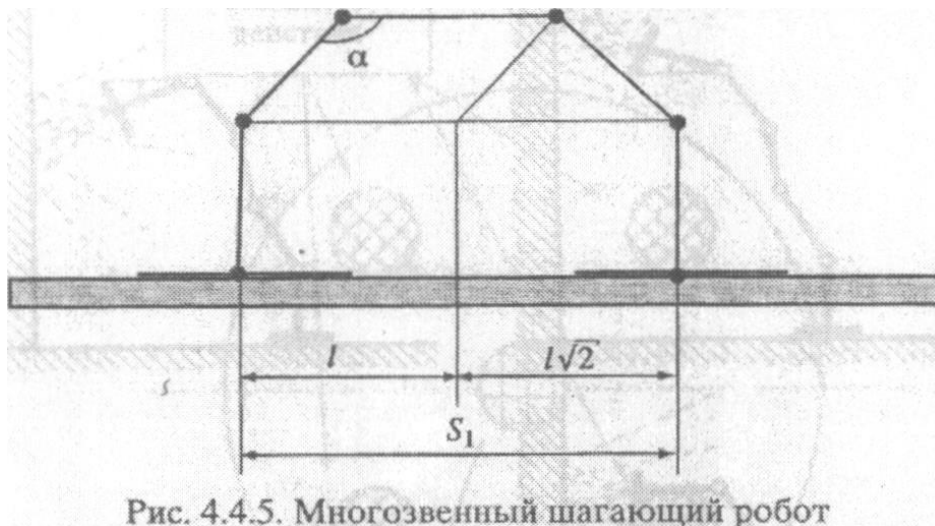
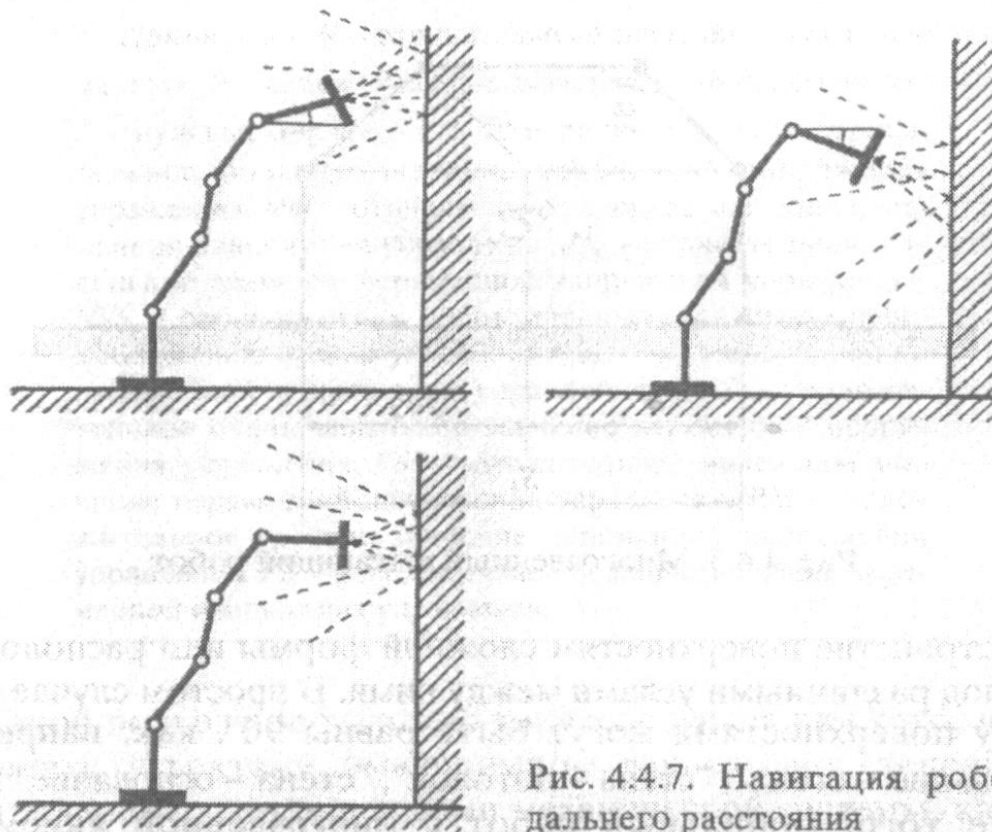
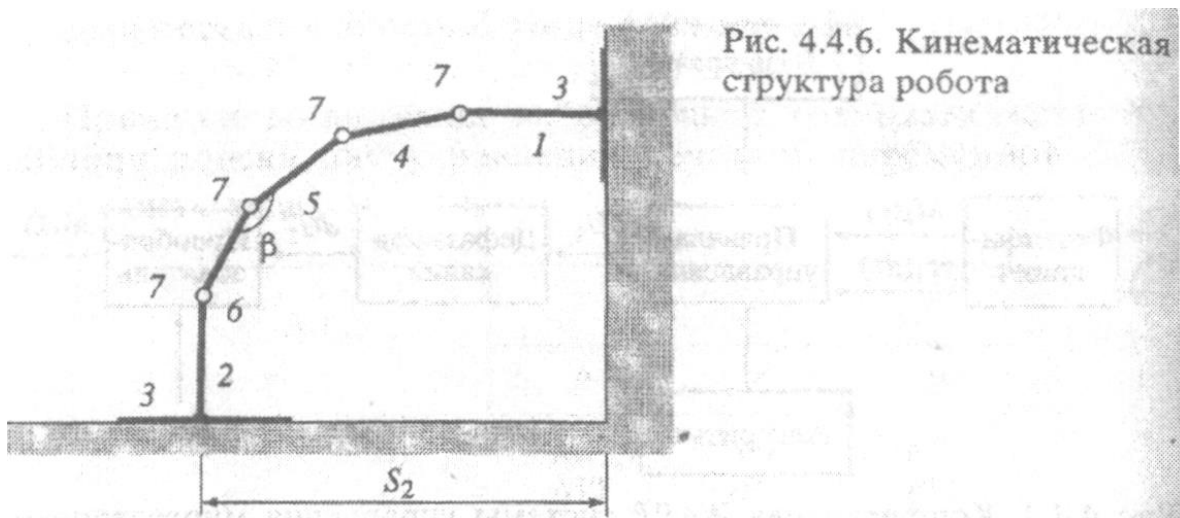


Рис. 4.4.5. Многозвенный шагающий робот

в пространстве поверхностям сложной формы или расположенным под различными углами между ними. В простом случае углы между поверхностями могут быть равны 90° , как, например, "основание - стена", "стена - потолок", "стена - основание" и т.д. Кроме того, мобильный робот с многозвенной кинематикой может перемещаться по поверхностям, пересекающимся под углом 270° и больше, что трудно реализовать, используя другие механические системы [81, 82]. Такой робот (рис. 4.4.5, 4.4.6) состоит из двух 1 и 2 конечных звеньев с фиксаторами (например, вакуумные механизмы захвата) 3 и промежуточных звеньев 4, 5 и 6, связанных между собой с помощью шарниров 7 (рис. 4.4.6).

Каждый шарнир имеет две степени свободы, которые реализуют вращение звеньев с помощью встроенных двигателей постоянного тока. Во время движения

одно из конечных звеньев с фиксатором (например, 1) закрепляется на поверхности за счет создания вакуума схватом. Другое устройство фиксации в это



время может перемещаться в пространстве за счет поворота остальных звеньев. Пример конфигурации механической системы многозвенного МРПП при подходе к поверхностям под различными углами показан на рис. 4.4.7.

При рассмотрении работы робота мы принимаем модель с четырьмя шарнирами, каждый из которых имеет две степени свободы.

Основная концепция нечеткой системы управления робота заключается в решении и исследовании двух основных проблем:

- перемещение с дальнего расстояния до поверхности фиксации (см. рис. 4.4.7);

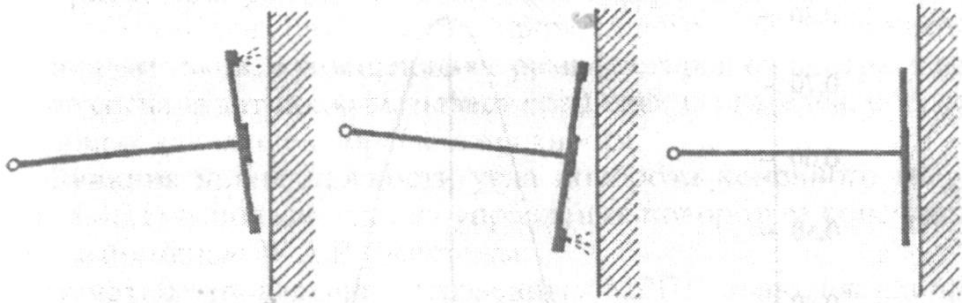


Рис. 4.4.8. Ориентация робота при близком расстоянии от поверхности

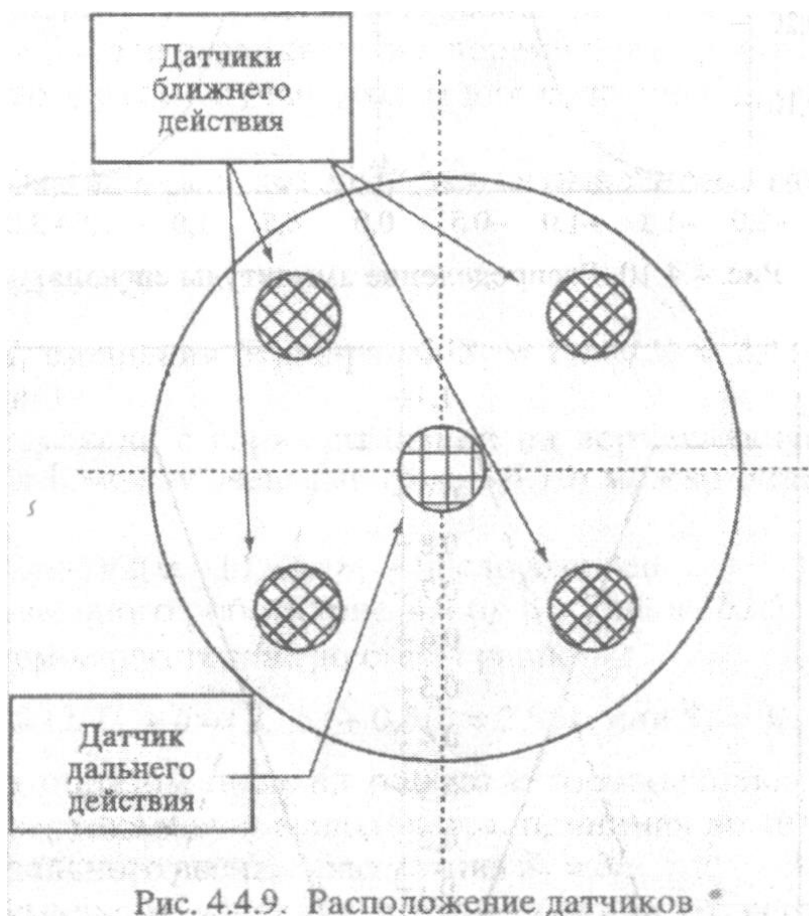


Рис. 4.4.9. Расположение датчиков *

- ориентация в близко расположенной зоне к поверхности фиксации (рис. 4.4.8).

Движение робота от сравнительно далекого расстояния до поверхности реализуется электродвигателями постоянного тока, встроенными в звенья, и корректируется ультразвуковыми датчиками, установленными в центре конечных фиксаторов (рис. 4.4.9). Двигатели действуют в согласованном совместном режиме и все

звенья поворачиваются под управлением W.A.R.P. системы, представленной на рис. 4.4.4. Отраженный сигнал датчика имеет вид, распределенный в соответствии с нормальным

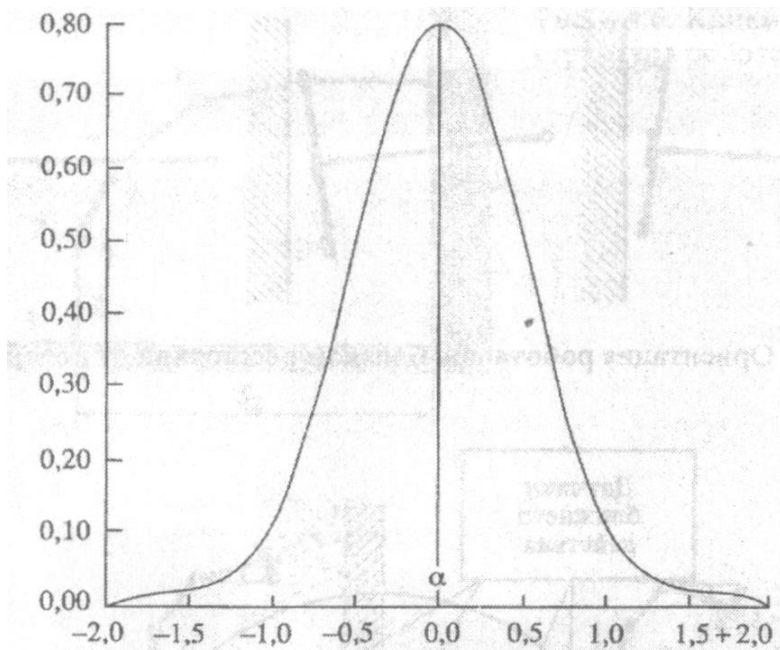


Рис. 4.4.10. Распределение амплитуды сигнала

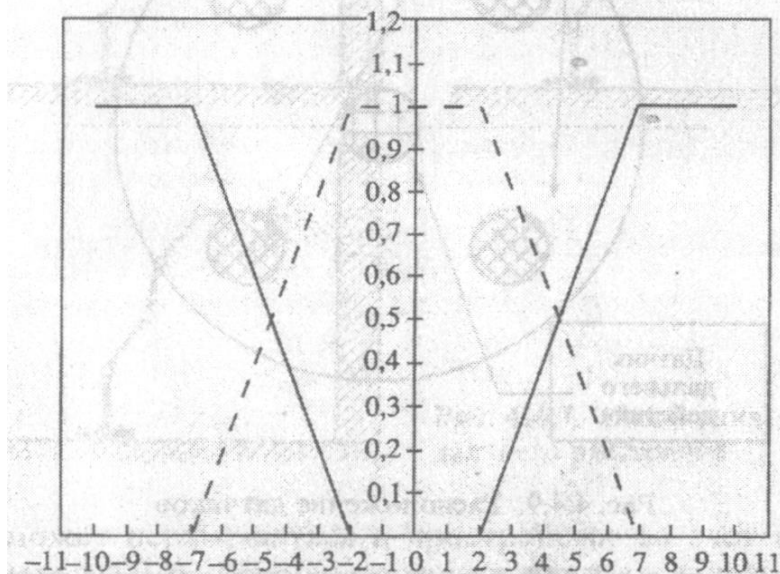


Рис. 4.4.11. Функция принадлежности для угла поворота конечного звена законом (рис. 4.4.10). Задача состоит в сканировании поверхности фиксаторами, чтобы получить максимальный уровень сигналов, который соответствует направлениям движения вперед.

Расположение датчиков на конечном фиксаторе показано на рис. 4.4.9. Ультразвуковые датчики дальней навигации располагаются по центру, а четыре датчика ближней зоны располагаются симметрично с двух сторон.

Ориентация робота в ближней к поверхности зоне выполняется путем движения опоры, приводящего к выравниванию сигнала датчиков, размещенных с разных сторон от центра. Снижение сигнала датчиков вызывает вращение двигателей, обеспечивающих движение опоры к поверхности.

Функция принадлежности угла поворота конечного звена (рис. 4.4.11) используется для управления поворотом конечного звена с помощью W.A.R.P-системы.

Нечеткое управление пятизвенным МРПП выполняется при следующих условиях: движение робота на горизонтальных или вертикальных поверхностях реализуется при равной нагрузке на каждом звене и равных углах между каждой парой звеньев.

Предполагая, что углы между звеньями равны α для горизонтального и β - для вертикального перемещения робота, соответственно, то в этом случае угол α для m -звенного робота будет равен

равен $\alpha = \pi(m-2)/(m-1)$, и который для пятизвенного робота имеет значение:

$$\alpha = 3\pi/4 = 135^\circ.$$

Шаг S_1 смещения будет равен $S_1 = l + \sqrt{2}l = 2,41l$ (здесь l - длина звена).

Для перехода с горизонтальной на вертикальную поверхность угол β между звеньями (рис. 4.4.10) можно определить из условия:

$$\beta = \pi(2m-3)/2(m-1), \text{ где } m - \text{число звеньев.}$$

$$\text{Для 5-звенного робота (рис. 4.4.6): } \beta = 7\pi/8 = 157,5^\circ.$$

Требуемое расстояние до стены равно:

$$S_2 = \sqrt{2} (2/2l + l \cos 22,5^\circ + 0,5l) = 2,96l, \text{ или } S_2 = 3l.$$

Таким образом переход робота с горизонтальной поверхности на вертикальную выполняется, принимая во внимание нагрузку отдельного звена, с расстояния $S_2 = 3l$.

Максимальное удаление в этой позиции от вертикальной поверхности (рис. 4.4.12) будет равно $S_3 = 4l$, и ограничения будут $2l < S_2 < 4l$.

Если робот переходит на вертикальную поверхность из начальной позиции, то он должен повернуться на угол γ , чтобы оказаться от этой поверхности на расстоянии $S_2 = 3l$.

Нечеткое управление движением робота по вертикальной поверхности выполняется с использованием следующих нечетких правил и функций принадлежности (рис. 4.4.13):

- если X мало, выполнять программу перехода на вертикальную поверхность;

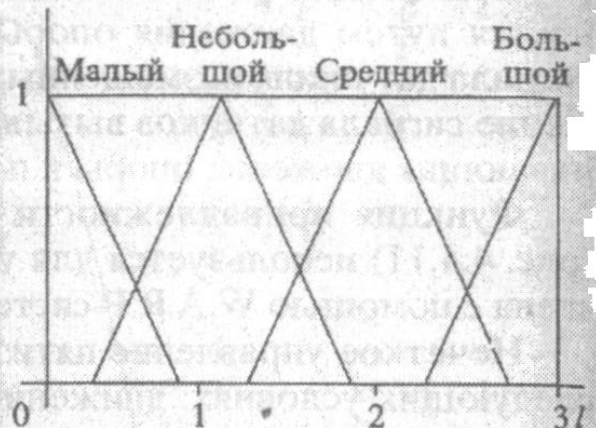
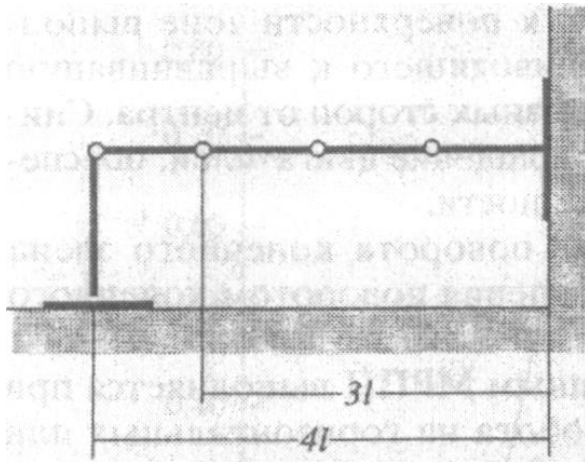


Рис. 4.4.12. Максимальное расстояние до вертикальной поверхности Рис. 4.4.13. Функция принадлежности для движения робота

- если X не мало, делать следующий шаг с поворотом на угол γ , равный значению "большой";
- если X средний, делать следующий шаг с поворотом на угол γ , равный значению "мало";
- если X большой, делать следующий шаг в направлении к вертикальной поверхности ($\gamma = 0$).

Функция принадлежности для этого случая имеет треугольную форму (см. рис. 4.4.13), и рекомендации реализуются соответственно упомянутых выше правил.

Интерфейс для W.A.R.P-процессоров разработан для быстрой и оптимальной адаптации к специфической области исследования (3000 схем, 3 мкм технология CMOS, частота - 10 МГц, число выходов - 64).

Этот интерфейс позволяет создавать обратную связь на базе W.A.R.P-процессора. Т.е. информация от датчиков преобразуется в переменные для ввода в W.A.R.P-систему и затем, после завершения нечеткого вычисления, сигналы управления распределяются согласно имен переменных вывода.

Для организации интерфейсов в W.A.R.P-системе была выбрана широтно-импульсная модуляция; т.е. информация от датчиков преобразуется в интервалы времени. Конвертор "время- число" является частью интерфейса.

Интерфейс для многозвенного МРПП содержит одну интегральную схему FUZ-3. Интерфейс опрашивает 10 аналоговых датчиков и преобразовывает информацию в переменные ввода W.A.R.P. (разрешающая способность - 128 бит). В специфической области W.A.R.P-процессор определяет углы поворота для всех соединений

робота. Интерфейс корректирует углы поворотов для всех электродвигателей постоянного тока и определяет минимальный и максимальный углы вращения для всех соединений, а также отслеживает состояние вакуума и контролирует угол наклона поверхности.

Нечеткий процессор получает информацию от датчиков, установленных на роботе, и выполняет логическую обработку для управления движением робота под определенной программой согласно режиму, заданному с пульта оператора. Подключение датчиков, установленных на роботе, и пульта оператора к нечеткому процессору выполняется с помощью модуля интерфейса, который разработан для этой цели.

Интерфейс обеспечивает согласование сигналов от датчиков углов поворота (аналогового типа, 8 датчиков), датчиков предельных углов поворота (дискретного типа, 8 датчиков), от датчиков касания с поверхностью (дискретного типа, 8 датчиков) и от кнопок панели оператора (дискретного типа, 8 кнопок) с уровнем входных сигналов нечеткого процессора.

С использованием W.A.R.P-процессора могут выполняться рассмотренные нами ранее режимы движения.

При этом тип режима может быть установлен посредством пульта оператора, который через интерфейс соединяется с нечетким процессором.

5. Интеллектуальное управление на основе нечеткой логики

Управляемые движения МРПП. Существенное значение для реализации движений мобильных роботов повышенной проходимости имеет *интеллектуальное управление*, под которым будем подразумевать применение таких алгоритмов управления, которые предусматривают возможность автоматического принятия решений, в том числе простейших решений по выполнению движений в зависимости от быстро меняющейся оперативной обстановки. когда невозможно или затруднительно задание всего многообразия движений в четкой форме. В подобных случаях требуется разработка специальных алгоритмов интеллектуального управления, которые могут быть построены на различных теоретических базах, в том числе на основе экспертных систем, нейросетей и нечеткой логики.

Вместе с тем в каждом конкретном случае *разработка алгоритмов интеллектуального управления определяется особенностями функционального назначения объекта управления, поставленных задач, спецификой обстановки, в которой эти задачи должны выполняться.*

При необходимости применения методов нечеткой логики следует оценить формулировки разрабатываемых нечетких правил адекватности выполняемых функциональных задач определенным роботом.

Для конкретности представления данной проблемы рассматривается интеллектуальное управление на основе нечеткой логики применительно к многозвенному роботу вертикального перемещения (МРВП), предназначенному для передвижения по произвольно ориентированным в пространстве поверхностям, модель которого разработана в Институте проблем механики РАН. Его конструкция реализуется в виде многозвенной структуры, каждое звено которой разделяется шарниром, а крайние звенья выполнены в виде опор с элементами, обеспечивающими прочное сцепление с поверхностью (см. цветную вклейку).

Такая конструкция робота позволяет ему перемещаться как по наклонным, так и вертикальным поверхностям, а также преодолевать определенную высоту и ширину препятствия (трещины, уступы и т.п.), возникающие на пути его движения. Оборудование и приборы при этом могут быть установлены на корпусе отдельных звеньев или на опорах робота, а необходимые технологические операции выполняются как во время остановки, так и во время перемещения робота.

Многозвенная структура и подвижные шарниры дают возможность управлять маневренностью робота в широких пределах, что обеспечивает его перемещение в условиях недетерминированной обстановки или при возникновении неожиданных препятствий.

Возможность изготовления промежуточных частей в виде однотипных звеньев и шарниров позволяет унифицировать структуру робота и наращивать ее в случае необходимости для повышения его маневренности, если требуется двигаться в сложной обстановке, например, при хаотичном расположении элементов или даже внутри трубопровода. Размеры мобильного робота также благодаря этой унификации могут варьироваться в довольно широких пределах в зависимости от поставленной задачи.

Рассматриваемая модель МРВП (рис. 4.5.1), состоит из трех средних (2, 3, 4) и двух крайних звеньев (1, 2), на концах которых находятся устройства фиксации с поверхностью (6, 7). Между всеми звеньями находятся шарниры (8, 9, 10, 11), выполненные в виде расположенных перпендикулярно одна к другой полушестерен, которые обеспечивают поворот каждого звена посредством двух электромоторов, снабженных редукторами, через которые осуществляется связь осей электромото-

ров с полушестернями. Электромоторы и редукторы располагаются в корпусах каждого звена. Общее количество электромоторов - 8. Такая конструкция шарниров обеспечивает наличие двух сте-

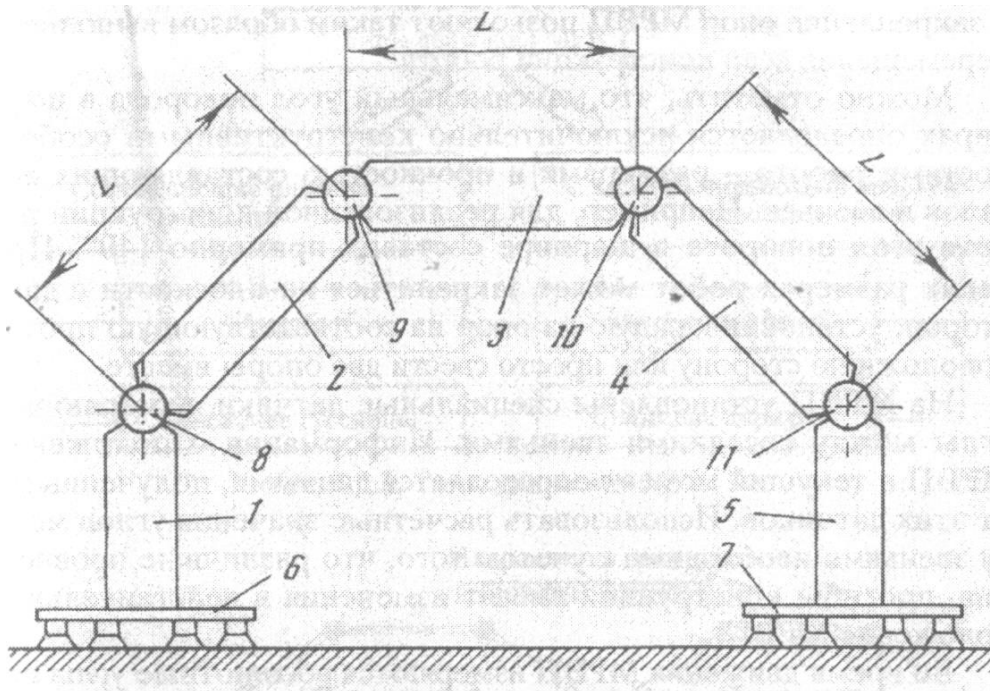


Рис. 4.5.1. Схема действующей модели МРВП

1-5 - звенья МРВП; 6-7 - устройства фиксации с поверхностью (опоры); 8-11 - шарниры; L - длина звена

пеней подвижности в каждом шарнире. Итак, число степеней подвижности, с которым может перемещаться в пространстве конечный элемент робота, равно 8.

Устройства фиксации с поверхностью, или схваты, могут быть выполнены в зависимости от задачи в виде вакуумных присосок, электромагнитов или механических пальцев. Количество звеньев и их размеры могут изменяться в зависимости от необходимых требований. От числа звеньев зависит общая подвижность робота.

Принцип движения МРВП по поверхности состоит в следующем. При включении электромотора одной из степеней подвижности какого-либо звена (например, 5) вращение оси этого мотора через редуктор передается на связанную с ним соответствующую полушестерню следующего звена (звено 4). Если в этот момент устройство фиксации 6 обеспечивает закрепление на поверхности, то звено 5 начнет поворачиваться вокруг соответствующей оси шарнира 11. Затем путем соответствующих включений остальных моторов может быть выполнен перенос опоры 7 в ту или иную точку пространства или поверхности, по которой предпола-

гается перемещение робота. После закрепления опоры 7 в новой точке аналогичные действия по переносу могут быть выполнены для опоры 6. Последовательный перенос и закрепление опор МРВП позволяют таким образом выполнять перемещение всей конструкции робота.

Можно отметить, что максимальный угол поворота в шарнирах определяется исключительно конструктивными особенностями робота - размерами и прочностью составляющих его узлов и звеньев. Например, для реализованной конструкции робота угол поворота в шарнире составил примерно 140° . При таких размерах робот может закрепиться на плоскости с двух сторон, установив каждую из опор на соответствующую противоположную сторону или просто свести две опоры вместе.

На МРВП установлены специальные датчики, измеряющие углы между соседними звеньями. Информация о положении МРВП в текущий момент определяется данными, полученными от этих датчиков. Использовать расчетные значения углов между звеньями необходимо с учетом того, что различные провисания, прогибы конструкции вносят изменения в действительное положение МРВП.

Во время движения МРВП измеряются абсолютные углы поворота каждого звена. Зная массы звеньев, при любом положении МРВП возможно измерить моменты M , относительно точки закрепления неподвижной опоры, возникающие от веса каждого i -го звена, а также *суммарный момент* относительно неподвижной опоры $M = \sum_{i=1}^5 M_i$ возникающий от веса робота в целом и вызывающий отрыв конструкции от поверхности за счет поворота в точке закрепления.

При изменении положения МРВП в процессе перемещения проводится постоянный анализ его состояния (оценка его конфигурации и моментов, вызывающих отрыв конструкции) и анализ среды (измерение необходимых геометрических параметров), в которой он находится. На основе этой информации принимается решение о продолжении движения по заданной программе или корректировке текущего положения.

Последовательным включением и выключением электродвигателей могут быть реализованы достаточно сложные движения. Робот может переходить с одной поверхности на другую, причем поверхности могут находиться под различными углами в пространстве, а также отделены одна от другой, реализовываться различные типы "походов" при движении по поверхности, а также выполняться перемещения по сложным траекториям в пространстве рабочего органа (см. рис. 2.2.16).

Существует несколько различных типов передвижения конструкции робота в целом, представленные на рис. 4.5.2. МРВП

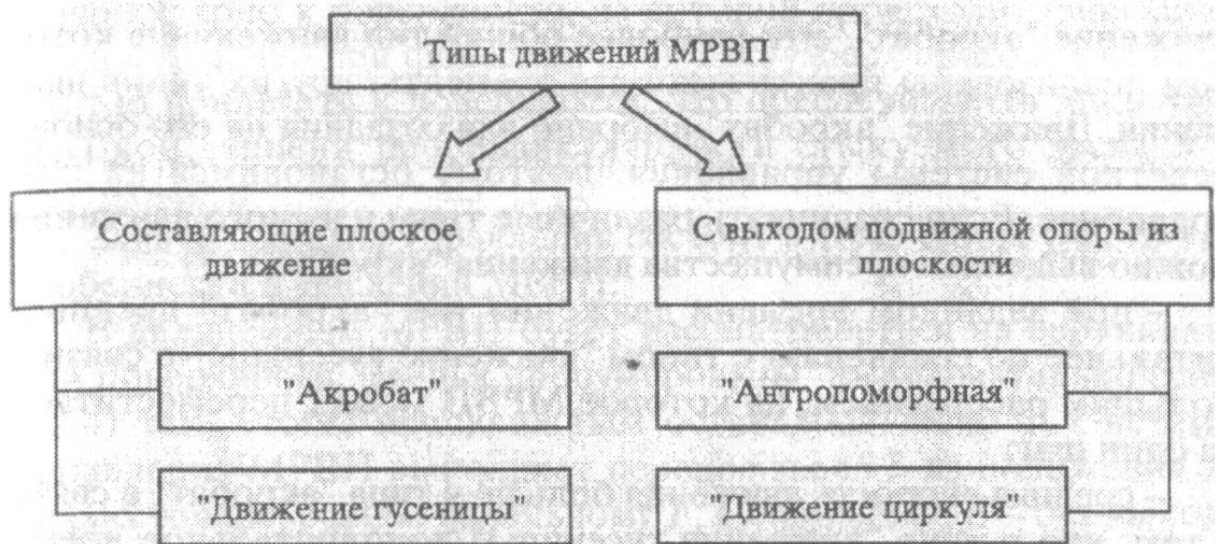


Рис. 4.5.2. Типы движения МРВП

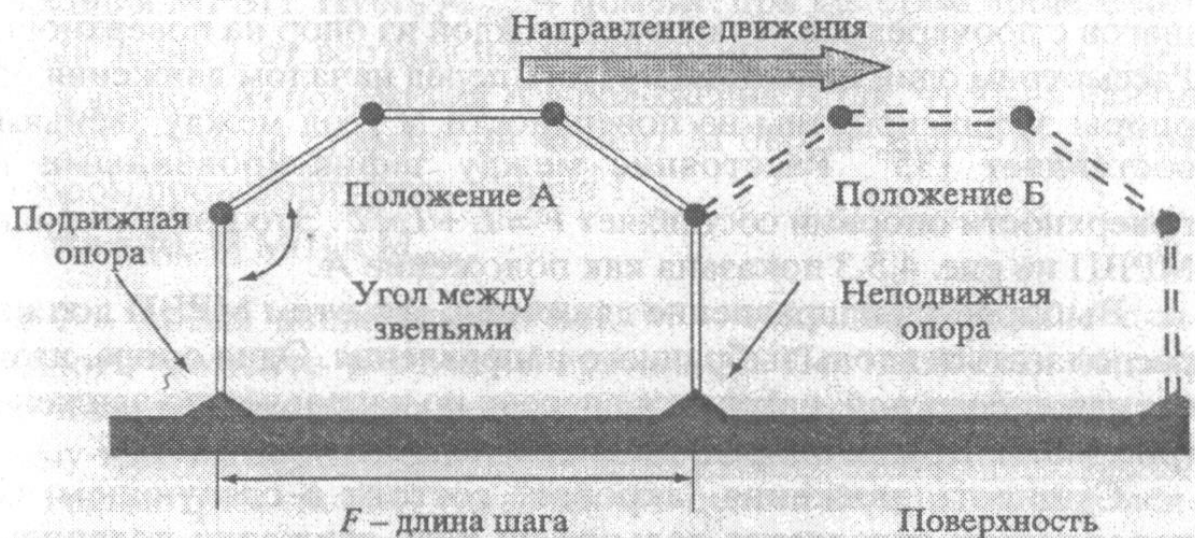


Рис. 4.5.3. Задача движения для выполнения шага

может совершать плоское движение и движение с выходом подвижной опоры из плоскости движения. К плоскому движению относятся "перенос через корпус" подвижной опоры (подобно акробату) и движение с попеременным сближением и удалением опор с фиксацией на поверхности ("движение гусеницы"). Другой тип передвижения - осуществляемый с выходом подвижной опоры из плоскости - антропоморфная, или "человекоподобная походка", и как частный его случай - так называемое движение циркуля.

Пусть перед началом движения опоры МРВП зафиксированы на поверхности. Каждый тип движения состоит из повторяющихся действий. Определим *шаг*

МРВП как совокупность действий с момента отрыва опоры от поверхности до ее фиксации на поверхность в другом месте.

Из всех типов движения наибольший интерес представляет движение "акробат". Это наиболее общий тип движения, в котором реализованы практически все элементы других типов движения. Движение "акробат" выбрано для создания на его основе нечеткой системы управления, поэтому остановимся на нем подробнее. Если сравнивать различные типы плоского движения можно выделить преимущества движения "акробат":

- при заданном времени движения тип "акробат" предпочтительнее по сравнению с типом "движение гусеницы" в связи с большим расстоянием, на которое МРПП может переместиться за один шаг;
- средняя скорость движения больше у типа "акробат" в связи с тем, что в типе "движение гусеницы" дополнительное время расходуется на частую фиксацию опор на поверхность.

В целом движение "акробат" состоит из последовательности шагов с поочередной установкой каждой из опор на поверхность. Рассмотрим один шаг МРВП. Пусть перед началом движения обе опоры зафиксированы на поверхности, а угол между звеньями составляет 135° . Расстояние между зафиксированными на поверхности опорами составляет $F = L + L\sqrt{2}$. Это конфигурация МРВП на рис. 4.5.3 показана как положение А.

Выбирается направление движения, при этом МРВП должен располагаться вдоль выбранного направления. Одна опора, называемая *подвижной*, находится впереди по направлению движения (рис. 4.5.4). Другая опора называется *неподвижной опорой*.

Сущность движения "акробат" состоит в следующем. От поверхности отделяется дальняя по ходу движения подвижная опора и путем перемещения через фиксированную на поверхности неподвижную опору, оказывается вперед по ходу движения. Затем подвижная опора фиксируется на поверхности на расстоянии F от неподвижной опоры, на котором она находилась позади неподвижной опоры. Длина шага при таком движении составляет $2F$. Конечное положение после фиксации неподвижной опоры на поверхность есть *положение Б*.

Система управления движением. Отметим две существенные особенности движения "акробат":

А. Во время движения по вертикальной поверхности в точке закрепления опоры, зафиксированной на поверхности, могут иметь место сильные перегрузки

за счет возникновения момента от веса робота. Суммарный момент M может превысить максимально допустимое значение, что грозит отрывом опоры от поверхности, так как вакуумные присоски могут не выдержать перегрузок.

Б. В момент фиксации на поверхности подвижной опоры необходимо, чтобы блок вакуумных присосок подходил строго перпендикулярно к поверхности, на которой происходит фиксация. Дело в том, что при фиксации блок вакуумных присосок должен плотно прилегать к поверхности, что обеспечивается лишь при высокой степени перпендикулярности стыкуемого звена 5 к поверхности.

Задача системы управления состоит в том, чтобы учесть эти особенности в движении МРВП.

В дальнейшем МРВП будет рассматриваться на вертикальной поверхности. Звенья пронумерованы последовательно (рис. 4.5.4) так, чтобы неподвижным оставалось звено 1. Система управления МРВП выполняет перенос звена 5 из положения А на расстояние, равное начальному F , в положение Б - без выхода из плоскости движения.

Сформулируем основное условие системы управления для движения МРВП. Пусть $M_{\max}$ - момент, при котором происходит отрыв звена 1 от вертикальной поверхности. Необходимо перевести звено 5 из положения А в положение Б так, чтобы в любой момент времени суммарный момент M был не выше $M_{\max}$, при котором происходит отрыв звена 1

$$\forall t \in [0, T] M(t) < M_{\max},$$

где T - время движения МРВП, M - текущее значение суммарного момента в момент времени t . Поставленная задача достижения цели имеет бесконечное количество решений и поэтому требуется определить, какое из решений выбрать.

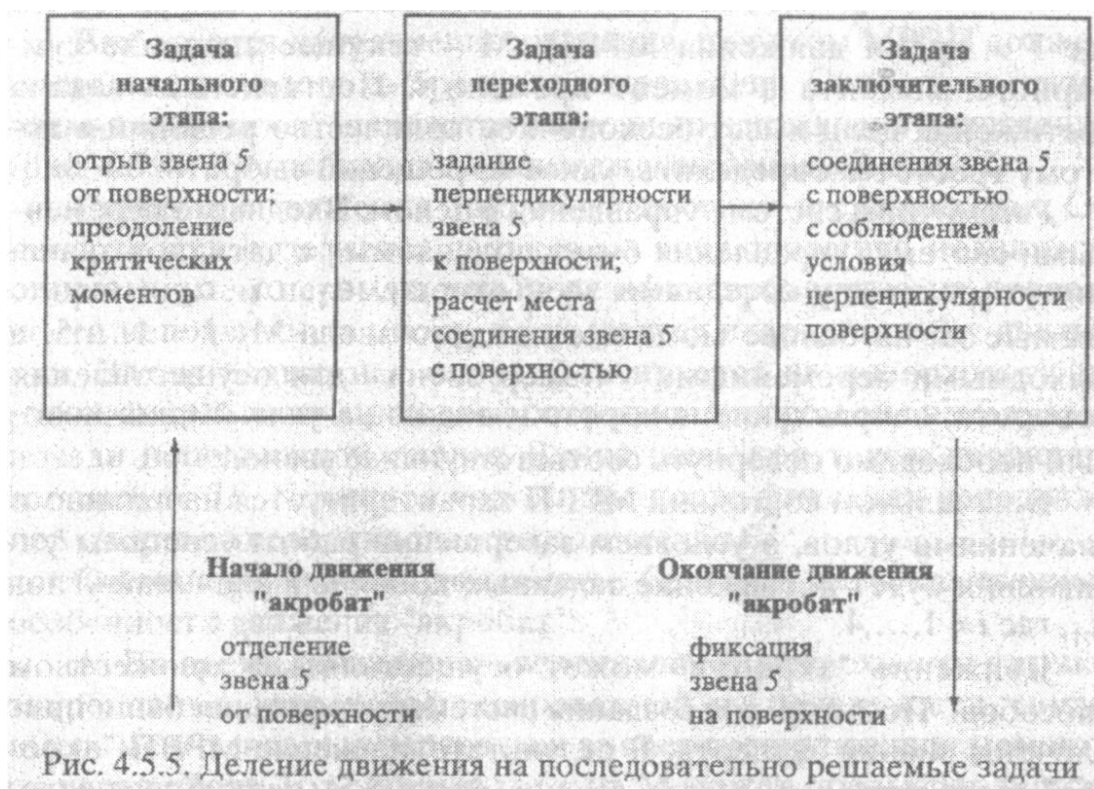
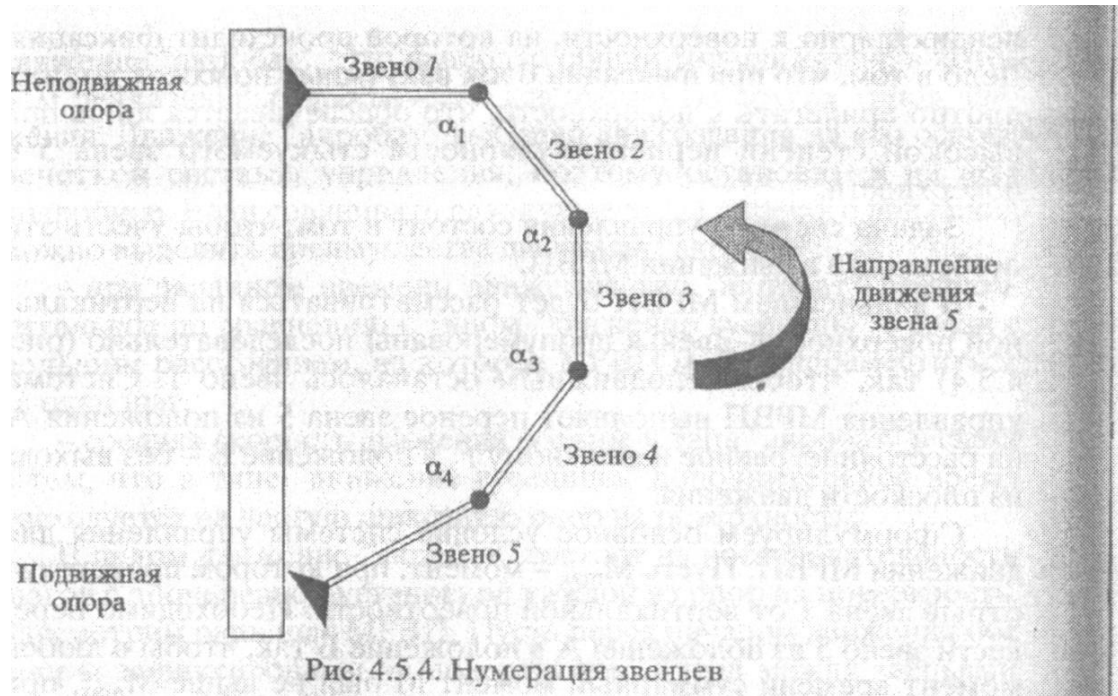
Рассмотрим систему управления в целом. Входными переменными системы управления будут получаемые с датчиков значения углов между соседними звеньями $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ и вычисляемые на их основе моменты каждого звена $M_i, i = 1, \dots, 5$, а выходными переменными - номер звена i для осуществления поворота, направление поворота и величина угла $\Delta\alpha_i$, на который необходимо повернуть соответствующее звено.

В начальном состоянии МРВП характеризуется начальными значениями углов, а условием завершения работы системы управления будет достижение заданных конечных значений углов α_i где $i = 1, \dots, 4$.

Управление цифровых образовательных технологий

Движение "акробат" может осуществляться множеством способов. Поэтому для создания системы управления были привлечены знания эксперта. В результате движение МРВП "акробат" было разделено на три задачи (рис. 4.5.5), решаемые последовательно:

- 1) задача начального этапа;
- 2) задача переходного этапа;
- 3) задача заключительного этапа.



Разделим все движение МРВП на части, где основная задача системы управления - преодолеть критические моменты (задача первого этапа) и поддержать перпендикулярность подвижной опоры при фиксации на поверхности (задача второго этапа). Между ними введем промежуточный этап, в задачу которого входит подготовка конструкции МРВП к выполнению заключительного этапа движения.

Заранее оговоримся, что помимо решения основных задач осуществляются различные проверки на ограничение движения, на которых не акцентируется внимание: на отсутствие взаимных пересечений звеньев робота; на отсутствие препятствий; на существование поверхности впереди по ходу движения и т.д. Основное внимание уделено внедрению нечетких множеств в алгоритмы управления и создания нечеткой системы управления.

Рассмотрим подробнее определенные экспертом задачи каждого этапа.

Задача начального этапа. Выполнение задачи начального этапа начинается из положения А и заканчивается, когда МРВП принимает некоторое промежуточное положение, которое характеризуется тем, что звено 2 достигло конечного положения, а критические моменты возможного отрыва от поверхности пройдены. Положение звена 2 называется конечным, если для достижения МРВП положения Б нет необходимости в относительном изменении положения звена 2 относительно звена 1, т.е. угол α_1 достиг конечного значения.

Опишем алгоритм работы, предлагаемый экспертом по управлению. Сначала измеряется суммарный момент. Если он мал, то звено 2 поворачивается так, чтобы уменьшить разность текущего значения угла α_1 и значения угла $\alpha_{11} = 225^\circ$, которую необходимо достичь для завершения задачи начального этапа. В случае, если суммарный момент близок к критическому, то звенья 3, 4 и 5 поворачиваются в сторону, противоположную движению звена 2. Причем их движение происходит следующим образом. Сначала поворачивается звено 3 сильно или слабо в зависимости от того, насколько близко текущее значение момента находится к $M_{\max}$. Затем поворачивается звено 4 в ту же сторону, но используя новое текущее значение момента. Если он не вышел из критической области, то сильно поворачиваем звено 4, в противном случае звено 4 поворачиваем слабо. Аналогично в том же направлении поворачивается звено 5.

Заметим следующую особенность такого управления. Все звенья поворачиваются только в одну сторону. Звено 2 поворачивается по направлению движения,

увеличивая суммарный момент. Поворотами остальных звеньев МРВП выполняется попытка скомпенсировать увеличение суммарного момента. При достижении звеном 2 угла α_{11} , завершается задача управления на начальном этапе.

Задача переходного этапа. Между задачей начального этапа, осуществляющей движение с суммарным моментом, не превышающим заданный, и задачей заключительного этапа, состоящей в точной фиксации опоры на поверхность, необходимо перевести звено 5 из конечного положения задачи начального этапа в положение зависания над будущей точкой фиксации на поверхность - начального положения для выполнения конечного этапа. Это - задача переходного этапа.

В начальном положении, когда звенья 1 и 2 зафиксированы, их движение не может быть выполнено из-за ограничения, создаваемого опорной поверхностью. Начинается движение с поворота звена 3 по направлению перемещения МРВП, если момент не превышает критического значения. Это движение заканчивается при достижении углом α_2 значения $\alpha_2 = \alpha_{21} - \delta$, где δ - число, оставляющее возможность движения звена 3 на конечном этапе. Если движение звена 3 не возможно (из-за большого значения суммарного момента), то звенья 4 и 5 поворачиваются против направления перемещения МРВП, уменьшая суммарный момент. После поворота звена 3 выполняется поворот звена 4 по направлению движения, а звена 5 - против направления движения. После достижения $\alpha_3 = \alpha_{31} - \delta$, происходит поворот звена 5 по направлению движения МРВП. В конце переходного этапа значения углов будут $\alpha_i = \alpha_{i1} - \delta$, где $i = 2, 3, 4$. Затем звено 5 поворачивается так, чтобы выполнялось равенство $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 180^\circ$, что является условием перпендикулярности звена 5 поверхности.

Задача заключительного этапа. Заключительный этап начинается из положения, когда звено 5 расположено перпендикулярно поверхности над местом, где оно будет зафиксировано на поверхности. Заключительный этап завершается при достижении МРВП положения Б.

Идея алгоритма состоит в том, чтобы поворачивать на большой угол то из звеньев 3 или 4, которое сильнее отклонено от конечного состояния α_{21} , α_{31} , при этом незначительно нарушая для звена 5 перпендикулярность к стене. Звено 5 поворачивается таким образом, чтобы соблюдалось условие $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 180^\circ$.

База нечетких правил. В данной системе для представления специальных знаний, используемых для нечеткого вывода, применены нечеткие правила. Основная часть нечетких правил

объединяется в блоки, образуя иерархическую систему. Полная система нечетких правил имеет вид

Блок $R_{1.1} = \{R_{1.1.1}, R_{1.1.2}\}$ (поворот звена 2):

$R_{1.1.1}$: если M малый, то сильно поворачиваем звено 2, увеличивая M ;

$R_{1.1.2}$: если M большой, то слабо поворачиваем звено 2, увеличивая M .

Блок $R_{1.2} = \{R_{1.2.1}, R_{1.2.2}\}$ (поворот звена 5):

$R_{1.2.1}$: если M_5 большой, то сильно поворачиваем звено 5, уменьшая M ;

$R_{1.2.2}$: если M_5 малый, то слабо поворачиваем звено 5, уменьшая M .

Блок $R_{1.3} = \{R_{1.3.1}, R_{1.3.2}\}$ (поворот звена 4):

$R_{1.3.1}$: если $M_5 + M_4$ большой, то сильно поворачиваем звено 4, уменьшая M ;

$R_{1.3.2}$: если $M_5 + M_4$ малый, то слабо поворачиваем звено 4, уменьшая M .

Блок $R_{1.4} = \{R_{1.4.1}, R_{1.4.2}\}$ (поворот звена 3):

$R_{1.4.1}$: если $M_5 + M_4 + M_3$ большой, то сильно поворачиваем звено 3, уменьшая M ;

$R_{1.4.2}$: если $M_5 + M_4 + M_3$ малый, то слабо поворачиваем звено 3, уменьшая M .

Блок $R_{2.1} = \{R_{2.1.1}, R_{2.1.2}\}$ (поворот звена 2):

$R_{2.1.1}$: если M большой, то сильно поворачиваем звено 2, уменьшая M ;

$R_{2.1.2}$: если M малый, то сильно поворачиваем звено 2, увеличивая M .

Блок $R_{2.2} = \{R_{2.2.1}, R_{2.2.2}\}$ (поворот звена 3):

$R_{2.2.1}$: если α_2 большой, то сильно поворачиваем звено 3, уменьшая M ;

$R_{2.2.2}$: если α_2 малый, то слабо поворачиваем звено 3, уменьшая M .

Блок $R_{2.3} = \{R_{2.3.1}, R_{2.3.2}\}$ (поворот звена 4):

$R_{2.3.1}$: если α_3 большой, то сильно поворачиваем звено 4, уменьшая M ;

$R_{2.3.2}$: если α_3 малый, то слабо поворачиваем звено 4, уменьшая M .

Блок $R_{2.4} = \{R_{2.4.1}, R_{2.4.2}\}$ (поворот звена 5):

$R_{2.4.1}$: если M большой, то сильно поворачиваем звено 5, уменьшая M ;

$R_{2.4.2}$: если M малый, то сильно поворачиваем звено 5, увеличивая M .

Блок $R_{3.1} = \{R_{3.1.1}, R_{3.1.2}\}$ (поворот звена 3):

$R_{3.1.1}$: если α_2 большой, то сильно поворачиваем звено 3, увеличивая M ;

$R_{3.1.2}$: если α_2 малый, то слабо поворачиваем звено 3, увеличивая M .

Блок $R_{3.2} = \{R_{3.2.1}, R_{3.2.2}\}$ (поворот звена 4):

$R_{3.3.1}$: если α_3 большой, то сильно поворачиваем звено 4, соблюдая перпендикулярность;

$R_{3.3.2}$: если α_3 малый, то слабо поворачиваем звено 4, соблюдая перпендикулярность.

Здесь R_{ijk} – нечеткие правила, i – номер этапа, j – номер блока правил, k – номер правила. Отметим характерную особенность устройства базы нечетких правил. Все правила объединены парами. В случае, если необходимо повернуть любое звено, это может быть выполнено в большей или меньшей мере в зависимости от степени близости к $M_{\max}$ (кроме блоков $R_{2.1}$ и $R_{2.4}$), что и отражено в блоках правил. В блоках правил $R_{2.1}$ и $R_{2.4}$ поворот звеньев 2 и 5 соответственно осуществляется в разные стороны.

Лекция

по теме 4.1.1. Системы автоматизированного управления

ВОПРОСЫ

1. Общие сведения о проектировании и классификация САПР.
2. Системный подход к автоматизации проектирования, принципы организации и виды обеспечения САПР.
3. Математические модели проектируемых объектов и САПР.

ЛИТЕРАТУРА

1. . Меньков А.В., Острейковский В.А. Теоретические основы автоматизированного управления. М.: ОНИКС, 2005. (с. 391-407).

1. Общие сведения о проектировании и классификация САПР

Современные задачи, возникающие перед наукой и техникой, вызывают необходимость проектирования все более сложных технических объектов в сжатые сроки. Удовлетворить противоречивые требования повышения сложности объектов, сокращения сроков и повышения качества проектирования с помощью про-

стого увеличения численности проектировщиков нельзя, так как возможность параллельного проведения проектных работ ограничена и численность инженерно-технических работников в проектных организациях страны не может быть сколько-нибудь заметно увеличена. Выходом из этого положения является широкое применение вычислительной техники для решения проектных задач (автоматизация проектирования).

Цель автоматизации проектирования — обеспечить бездефектное проектирование, снизить материальные затраты, сократить сроки проектирования и ликвидировать рост количества инженерно-технических работников, занятых проектированием.

Знание математического аппарата, применяемого в инженерных исследованиях, умение пользоваться математическими моделями при оптимальном проектировании реальных объектов и систем, знание программных и технических средств САПР и умение пользоваться ими в качестве инструмента проектировщика должны позволить современным инженерам ставить и решать задачи автоматизации проектирования по отраслям техники.

Общие сведения о проектировании

Процесс создания описания нового объекта может выполняться различными способами. Если весь процесс проектирования осуществляет человек, то проектирование называют *неавтоматизированным*. В настоящее время неавтоматизированное проектирование сложных объектов практически не применяют. Наибольшее распространение получило проектирование, при котором происходит взаимодействие человека и ЭВМ. Такое проектирование называют автоматизированным. Автоматизированное проектирование, как правило, осуществляется в режиме диалога человека с ЭВМ на основе применения специальных языков общения с ЭВМ.

Проектирование, при котором все преобразования описаний объекта и алгоритма его функционирования осуществляются без участия человека, называют *автоматическим*.

Рассмотрим ряд понятий, которые используются при проектировании объектов.

Первичное описание, представленное в заданной форме, называется заданием на проектирование. В задании на проектирование системы, должны быть сведения о назначении системы и ее параметрах, способах функционирования, конструктивной реализации, изготовления и т. и.

Проектным решением называется промежуточное или конечное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования.

Проектное решение или их совокупность, удовлетворяющие заданным требованиям, необходимые для создания объекта проектирования, будут являться *результатом проектирования*. В заданные требования должны быть обязательно включены требования к форме представляемого проектного решения.

Документ, выполненный по заданной форме, в котором представлено какое-либо проектное решение, полученное при проектировании, называется *проектным*. Совокупность проектных документов в соответствии с установленным перечнем, в котором представлен результат проектирования, называется *проектом*.

Под *проектной процедурой* понимают формализованную совокупность действий, выполнение которых оканчивается проектным решением. Например, проектными процедурами являются оптимизация, контроль, поиск решения, корректировка, компоновка, проверка правильности трассировки и т. п.

Действие или формализованная совокупность действий, составляющих часть проектной процедуры, алгоритм которых остается неизменным для ряда проектных процедур называется *проектной операцией*. Примерами проектных операций являются составление таблиц с данными вычисления, вычерчивание топологии, ввод и вывод данных и т. п. Соответственно проектная процедура, алгоритм которой остается неизменным для различных объектов проектирования или различных стадий проектирования одного и того же объекта, называется *унифицированной проектной процедурой*.

Выполнение проектных работ можно распределить как во времени, так и по подразделениям проектной организации.

При временном распределении работ по созданию новых объектов процесс проектирования разделяется на *стадии и этапы*. Различают 8 стадий: предпроектные исследования, техническое задание, техническое предложение, эскизный проект, технический проект, рабочий проект, изготовление, отладка, испытание и ввод в действие.

При создании новых объектов выделяют следующие этапы:

- этап научно-исследовательских работ (НИР). Объединяет стадии: предпроектные исследования, техническое задание и часть технического предложе-

ния. Здесь проводят исследования по поиску новых принципов функционирования, новых структур, физических процессов, новой элементной базы, технических средств и т. п.;

- этап опытно-конструкторских работ (ОКР). Объединяет стадии: часть технического предложения, эскизный проект, технический проект. Здесь отражаются вопросы детальной конструкторской проработки проекта;
- этап рабочего проектирования. Объединяет стадии: рабочий проект, изготовление, отладка и испытание, ввод в действие. Здесь прорабатывают схемные, конструкторские и технологические решения, проводят испытания, изготовление.

Для этапа НИР в основном используют системы автоматизации научных исследований и экспериментов.

Распределение работ между подразделениями производят с использованием блочно-иерархического подхода (БИП) к проектированию. Этот подход основан на структурировании описаний объекта с разделением описаний на ряд иерархических уровней по степени детальности отображения в них свойств объекта и его частей. Каждому иерархическому уровню присущи свои формы документации, математический аппарат для построения моделей и алгоритмов исследования. Совокупность языков, моделей, постановок задач, методов получения описаний некоторого иерархического уровня часто называют уровнем проектирования.

Уровни проектирования можно выделять не только по степени подробности отражения свойств объекта, но и по характеру отражаемых свойств. Если в первом случае уровни называют горизонтальными, или иерархическими, то во втором — вертикальными, или аспектами.

Методология БИП базируется на трех концепциях: *разбиение и локальная оптимизация; абстрагирование; повторяемость*.

Концепция разбиения позволяет сложную задачу проектирования объекта свести к решению более простых задач с учетом взаимодействий между ними. Локальная оптимизация подразумевает улучшение параметров внутри каждой простой задачи. Абстрагируемость заключается в построении формальных математических моделей, отражающих только значимые в данных условиях свойства объектов. Повторяемость заключается в использовании существующего опыта проектирования.

Основное достоинство БИП — это упрощение процесса проектирования и получение возможности решать задачи проектирования доступными средствами.

Использование БИП помогает: упростить решение проблемы хранения данных, сократить размерность выполняемых программ и время проектирования, применять САПР один раз для объекта (его части) независимо от числа идентичных объектов (его частей).

Весь процесс проектирования можно представить как последовательность этапов, связывающих концептуальное описание объекта и создание этого объекта. Указанную связь реализуют в одном из двух направлений: восходящем или нисходящем. Восходящее проектирование (ВП), т. е. проектирование снизу вверх, характеризуется решением сначала задач низких иерархических уровней с последовательным переходом к решению задач более высоких уровней. Нисходящее проектирование (НП), т. е. проектирование сверху вниз, является противоположным по отношению к ВП.

Отметим, например, что используемая в настоящее время концепция проектирования интегральных микросхем с большой степенью интеграции по модульному принципу — это концепция БИП. В системе БИП конструктор выполняет функциональные, интуитивные и интеллектуальные преобразования на верхних уровнях, а ЭВМ выполняет проектирование на нижних уровнях.

При выделении горизонтальных уровней проектирования производится разделение объекта на блоки и рассмотрение вместо объекта его отдельных блоков. Если на некотором уровне i_1 имеем объект s , то на соседнем, более низком уровне i_2 происходит разделение s на блоки $s_1, s_2, \dots, s_j$ и рассмотрение каждого блока $s_1, s_2, \dots, s_j$ на уровне i_2 с большей степенью детализации, чем на уровне i_1 .

В общем случае при проектировании технических объектов можно выделить несколько вертикальных уровней, основные из них — функциональный, конструкторский, технологический. Описание каждого вертикального уровня в свою очередь делят на иерархические уровни. Ниже приведен пример структурирования описания ЭВМ (табл. 8.3).

Таблица 8.3

Вертикальные уровни

Горизонтальные уровни	Функциональный	Алгоритмический	Конструкторский	Технологический
	Системный	Программирование системы	Шкаф, стойка	Принципиальная схема технологического процесса
	Логический	Программирование модулей	Панель	
	Схемотехнический		ТЭЗ	Маршрутная технология
	Компонентный	Проектирование микропрограмм	Модуль	Технологические операции
			Кристалл	
			Ячейка	

Функциональное проектирование включает в себя анализ технического задания (ТЗ) и на его основе выбор с системных позиций методики построения и путей реализации вычислительного процесса в объекте; связано с анализом и синтезом блоков объекта; заключается в разработке функциональных и принципиальных схем. Здесь определяют принципы функционирования и важнейшие параметры и характеристики объекта.

Основные задачи функционального проектирования следующие: разработка структурных схем, определение требований к выходным параметрам; анализ и формирование ТЗ на разработку отдельных блоков объекта; синтез функциональных и принципиальных схем полученных блоков; контроль и выработка диагностических тестов; проверка работоспособности синтезируемых блоков; расчеты параметров пассивных компонентов и определение требований к параметрам активных компонентов; формулировка ТЗ на проектирование компонентов; выбор физической структуры, топологии компонентов; расчеты параметров диффузионных профилей и полупроводниковых компонентов, электрических параметров, параметров технологических процессов эпитаксии, диффузии, окисления и др.; вероятностные требования к выходным параметрам компонентов.

Алгоритмическое проектирование заключается в разработке алгоритмов функционирования и создании математического обеспечения объекта.

Конструкторское проектирование заключается в реализации принципиальных схем в заданном конструктивном базисе. При этом решаются вопросы выбора форм и материалов, выбора типоразмеров, компоновки, размещения элементов,

трассировки соединений, контроля. Основные задачи конструкторского проектирования следующие: покрытие функциональных схем, т. е. получение принципиальных электрических схем; конструкторский расчет геометрических размеров компонентов и площади размещения; компоновка элементов; размещение элементов с учетом конструкторских схемотехнических и технологических ограничений; трассировка соединений; контроль топологии; проектирование фотошаблонов; выпуск конструкторско-технологической документации.

Технологическое проектирование заключается в решении задач технологической подготовки производства — разработке принципиальной схемы, маршрутов, операций и переходов технологических процессов изготовления деталей, сборки и монтажа узлов, включая выбор оснастки, инструмента, технологического оборудования и т. п.

Функциональное проектирование объекта состоит из четырех основных горизонтальных уровней: системного, логического, схемотехнического, компонентного. На системном уровне определяют общую структурную схему, структурные схемы основных блоков.

На логическом уровне создают функциональные и принципиальные схемы объекта. Здесь выделяют подуровни — регистровый и вентильный. На регистровом подуровне проектируются устройства из модулей (функциональных узлов) типа регистров, счетчиков, сумматоров, интеграторов и т. п. На вентильном уровне проектируются устройства и модули из отдельных логических вентилей и триггеров.

Алгоритмическое проектирование используется для разработки программного обеспечения объекта. Для больших программных систем обычно используют набор иерархических уровней, два из которых являются основными. На первом планируют всю программную систему и разрабатывают схемы алгоритмов на основе программных модулей. На втором производят программирование модулей на заданном алгоритмическом языке.

Конструкторское проектирование состоит из иерархических уровней проектирования компонентов, БИС, типовых элементов замены, панелей, стоек, шкафов. Здесь в основном используется восходящее проектирование.

Технологическое проектирование состоит из уровней проектирования принципиальной схемы технологического процесса, технологических маршрутов, технологических операций.

Классификация САПР

В общем смысле классификация — система соподчиненных понятий, часто представляемая в виде различных схем, таблиц и используемая как средство для установления связей между этими понятиями или классами объектов, а также для точной ориентировки в многообразии понятий или соответствующих объектов. Классификация фиксирует место объекта в системе, которая указывает на его свойства. В связи с этим она служит средством хранения и поиска информации, содержащейся в ней самой. Классификация создает условия для разработки технически обоснованных норм обеспечения процесса создания, функционирования и стандартизации в области САПР.

Системы автоматизированного проектирования классифицируются по типу, разновидности и сложности объекта проектирования; уровню и комплектности автоматизации проектирования; характеру и числу выпускаемых проектных документов; числу уровней в структуре технического обеспечения (рис. 8.20). На этом классификация первого уровня закончена. Рассмотрим классификацию второго иерархического уровня.

По типу объекта проектирования различают САПР (рис. 8.21): изделий машиностроения и приборостроения; технологических процессов в машиностроении и приборостроении; объектов строительства; организационных систем.



Рис. 8.20. Классификация САПР

Под *организационной системой* понимают совокупность, состоящую из коллектива специалистов и комплекса средств, взаимодействий и взаимосвязей между ними и с внешней средой и алгоритма процесса проектирования, необходимого для выполнения АП.

По разновидности объекта проектирования можно различать САПР РЭА, САПР атомной станции, САПР ракетной системы и т. п.

По сложности объекта проектирования различают САПР (рис. 8.21, б): простых объектов, содержащих до 10^2 составных частей; объектов средней сложности, содержащих от 10^2 до 10^3 составных частей; сложных объектов, содержащих от 10^3 до 10^4 составных частей; очень сложных объектов, содержащих от 10^4 до 10^6 составных частей; объектов очень высокой сложности, содержащих 10^6 и более составных частей.



Рис 8.21. Классификация САПР по типу (а) и сложности (б) объекта проектирования

Следовательно, САПР современных ЭВМ относится к САПР простых объектов, а САПР многопроцессорных вычислительных систем на сверхбольших интегральных микросхемах — к САПР очень сложных объектов.

По уровню автоматизации проектирования различают САПР (рис. 8.22, а) низкоавтоматизированные, в которых число автоматизированных проектных процедур (АПП) составляет 25 % общего числа проектных процедур; среднеавтоматизированные, — от 25 до 50% общего числа проектных процедур, высокоавтоматизированные от 50 до 75 %. В этих системах применяют методы

а)



б)



Рис. 8.22. Классификация САПР по уровню (а) и сложности (б) автоматизации проектирования

многовариантного оптимального проектирования. Например, в гибких автоматизированных производствах (ГАП) для эффективности результатов необходимо использовать САПР средне- и высокоавтоматизированного проектирования.

По сложности САПР классифицируют так (рис.8.22, б): одноэтапные, выполняющие один этап проектирования из всех установленных для объекта; многоэтапные, выполняющие несколько этапов проектирования из всех установленных для объекта; комплексные, выполняющие все этапы проектирования, установленные для объекта.

По характеру выпускаемых проектных документов различают САПР (рис. 8.23, а): текстовые, выполняющие только текстовые, документы на бумажной ленте или листе; текстовые и графические, выполняющие текстовые и графические документы на бумажной ленте или листе; на машинных носителях, выполняющих документы на магнитных носителях (магнитных лентах, дисках и барабанах); на фотоносителях, выполняющих документы на микрофильмах, микрофишах, фотошаблонах и т. п.; на двух типах носителей; на всех типах носителей.

По количеству выпускаемых проектных документов различают САПР (рис. 8.23, б): малой производительности, выпускающих до 10^5 проектных документов в пересчете на формат 2 за год;



Рис. 8.23. Классификация САПР по характеру (а) и числу (б) выпускаемых проектных документов

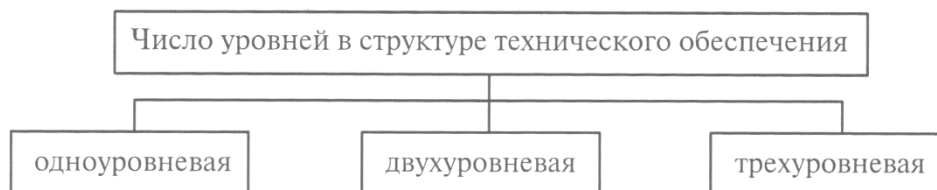


Рис. 8.24. Классификация САПР по числу уровней в структуре технического обеспечения

средней производительности, выпускающих от 10^5 до 10^6 проектных документов; высокой производительности выпускающих свыше 10^6 проектных документов.

В различных отраслях вводятся различные количественные характеристики информации, определяющие производительность САПР.

По числу уровней в структуре технического обеспечения различают САПР (рис. 8.24): одноуровневые, построенные на основе ЭВМ среднего или высокого класса со штатным набором периферийных устройств, который может быть дополнен средствами обработки графической информации; двухуровневые, построенные на основе ЭВМ среднего или высокого класса и одного или нескольких АРМ, включающих мини-ЭВМ; трехуровневые, построенные на основе ЭВМ высокого класса, АРМ и периферийного программно-управляемого оборудования.

Данная классификация — не догма. Теория автоматизации проектирования непрерывно развивается. Появляются новые технические и программные средства ЭВМ, комплексные САПР, поэтому существующие схемы классификации САПР будут видоизменяться и совершенствоваться.

2. Системный подход к автоматизации проектирования, принципы организации САПР и виды обеспечения САПР

Рассмотрим основные принципы организации САПР. Целью создания САПР является повышение качества и технико-экономического уровня проектируемых объектов при их создании и применении, повышение производительности труда, сокращение сроков, уменьшение стоимости и трудоемкости проектирования.

Очевидно, что создание САПР в первую очередь должно быть обусловлено технико-экономической целесообразностью.

Состав типовой САПР. Составными структурными частями САПР являются подсистемы, обладающие всеми свойствами систем и создаваемые как самостоятельные. *Подсистемой САПР* называют выделенную по некоторым признакам часть САПР, обеспечивающую получение законченных проектных решений.

По назначению подсистемы САПР разделяют на проектирующие и обслуживающие. К проектирующим относят подсистемы, выполняющие проектные процедуры и операции, например подсистема логического проектирования, подсистема конструкторского проектирования, подсистема технологического проектирования, подсистема проектирования деталей и сборочных единиц и т. п. К обслуживающим относят подсистемы, предназначенные для поддержания работоспособности проектирующих подсистем, например подсистема информационного поиска, подсистема документирования, подсистема графического отображения объектов проектирования и т. п.

По отношению к объекту проектирования различают объектно-ориентированные (объектные) и объектно-независимые (инвариантные). К объектным относят подсистемы, выполняющие одну или несколько проектных процедур или операций, непосредственно зависящих от конкретного объекта проектирования. К инвариантным относят подсистемы, выполняющие унифицированные проектные процедуры и операции, например функции отработки, не зависящие от особенностей проектируемого объекта.

Подсистемы состоят из компонентов, объединенных общей для данной подсистемы целевой функцией и обеспечивающих функционирование этой подсистемы.

Структурное единство подсистемы обеспечивается связями между компонентами различных обеспечений САПР.

Принципы создания САПР. К ним относят принципы включения, системного единства, развития, комплексности, информационного единства, совместимости, стандартизации.

Принцип включения обеспечивает разработку САПР на основе требований, позволяющих включать эту САПР в САПР более высокого уровня.

Принцип системного единства состоит в том, что при создании, функционировании и развитии САПР связи между подсистемами должны обеспечивать целостность системы.

Согласно принципу развития САПР должна создаваться и функционировать с учетом пополнения, совершенствования и обновления подсистем и компонентов.

Принцип комплексности обеспечивает связность проектирования элементов и всего объекта на всех стадиях, позволяет осуществлять согласование и контроль характеристик элементов и объекта в целом.

Принцип информационного единства состоит в использовании в подсистемах, компонентах и средствах обеспечения САПР единых условных обозначений, терминов, символов, проблемно-ориентированных языков, способов представления информации, соответствующих принятым нормативным документам.

Согласно принципу совместимости языки, символы, коды, информационные и технические характеристики структурных связей между подсистемами, средствами обеспечения и компонентами должны обеспечивать совместное функционирование подсистем и сохранять открытую структуру системы в целом.

Принцип стандартизации заключается в проведении унификации, типизации и стандартизации подсистем и компонентов, инвариантных к проектируемым объектам и отраслевой специфике, а также в установлении правил с целью упорядочения деятельности в области создания и развития САПР.

Подсистемы должны вводиться в действие и функционировать независимо от других подсистем. Единство общесистемных требований обеспечивает проектная служба САПР.

Виды обеспечения САПР

Система автоматизированного проектирования — это организационно-техническая система, состоящая из комплекса средств автоматизации проектирования (КСАП), взаимосвязанного с необходимыми подразделениями проектной организации $P_p, P_2, \dots, P_n$ или коллективом специалистов (пользователей системы) и выполняющая автоматизированное проектирование (рис. 8.25, а). Соответственно *система автоматического проектирования* выполняет автоматическое проектирование без участия человека. Автоматизированное проектирование осуществляется с помощью комплекса средств автоматизации проектирования, который представляет собой совокупность различных видов обеспечения автоматизированного

(автоматического) проектирования (АП), необходимых для выполнения АП (рис. 8.25, б).

Математическое обеспечение (МО) АП — это совокупность математических методов (ММет), математических моделей (ММ) и алгоритмов проектирования (АлП), необходимых для выполнения АП, представленных в заданной форме (рис.8.26, а).

Программное обеспечение (ПО) АП — совокупность машинных программ, необходимых для выполнения АП, представленных в заданной форме. Часть ПО АП, предназначенную для управления проектированием, называют операционной системой (ОС) АП.

Совокупность машинных программ (МП), необходимых для выполнения какой-либо проектной процедуры и представленных в заданной форме, называют пакетом прикладных программ (ППП).

Компонентами ПО являются документы с текстами программ, программы на всех видах носителей, эксплуатационные документы. Программное обеспечение разделяют на общесистемное (ОПО) и прикладное (ППО). Компонентами ОПО являются трансляторы (Т) с алгоритмических языков, эмуляторы (Э), супервизоры (С) и др. Компонентами ППО являются программы (МП) и пакеты прикладных программ для АП (рис. 8.26, б).

Информационное обеспечение (ПО) АП — совокупность сведений, необходимых для выполнения АП, представленных в заданной форме. Основной частью ИО являются автоматизированные банки данных, которые состоят из баз данных (БД) САПР и систем управления базами данных (СУБД). В ИО входят нормативно-справочные документы, задания государственных планов, прогнозы технического развития, типовые проектные решения,

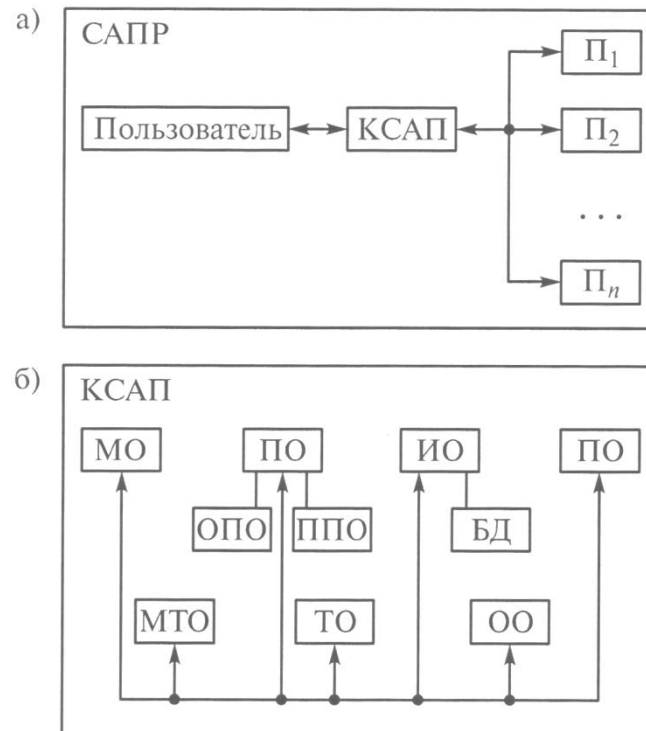


Рис. 8.25. Система автоматизированного (автоматического) проектирования (а) и комплекс средств автоматизированного (автоматического) проектирования (б); виды обеспечения:

МО – математическое, МТО – методическое, ПО – программное, ИО – информационное, ЛО – лингвистическое, ТО – техническое, ОО – организационное

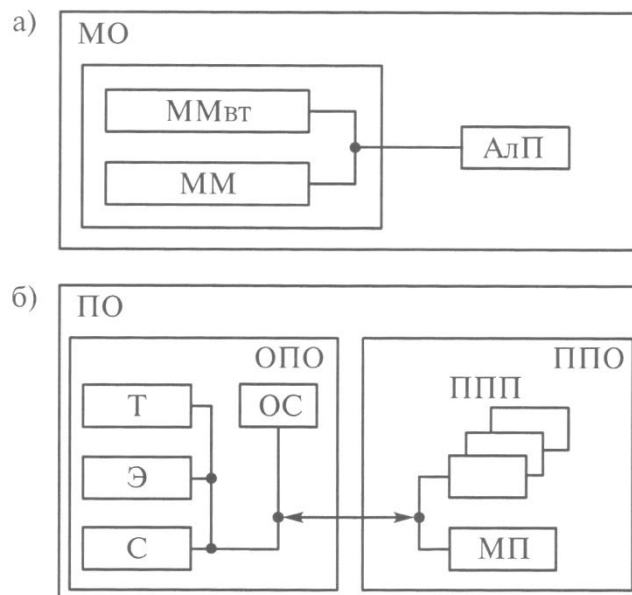


Рис. 8.26. Математическое (а) и программное (б) обеспечения САПР

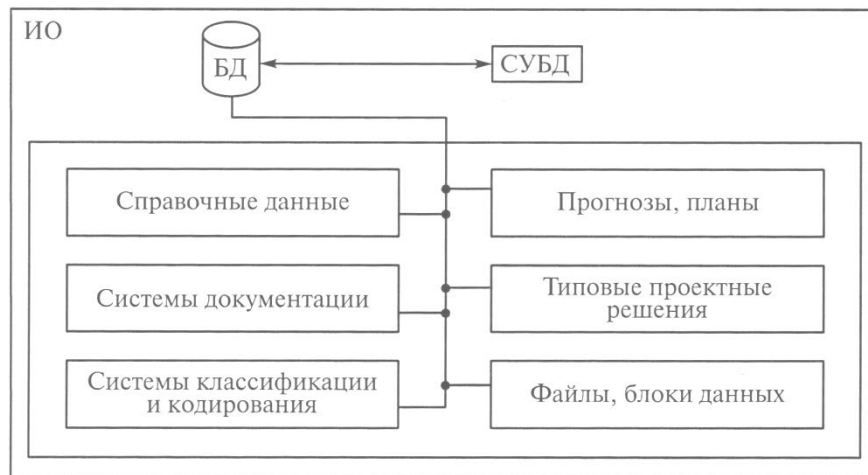


Рис. 8.27. Информационное обеспечение САПР

системы классификации и кодирования технико-экономической информации, системы документации типа ЕСКД, ЕСТД, файлы и блоки данных на машинных носителях, фонды нормативные, плановые, прогнозные, типовых решений, алгоритмов и программ и т. п. (рис. 8.27).

Управление автоматизированным банком данных осуществляют проектировщики, при этом необходимо обеспечить целостность, правильность данных, эффективность и функциональные возможности СУБД. Проектировщик организует и формирует БД, определяет вопросы использования и реорганизации. База данных составляется с учетом характеристик объектов проектирования, процесса проектирования, действующих нормативов и справочных данных. При создании автоматизированных банков данных одним из основных является принцип информационного единства, заключающийся в использовании единой терминологии, условных обозначений, символов, единых проблемно-ориентированных языков, способов представления информации, единой размерности данных физических величин, хранящихся в БД. Автоматизированные банки данных должны обладать гибкостью, надежностью, наглядностью и экономичностью. Гибкость заключается в возможности адаптации, наращивания и изменения средств СУБД и структуры БД. Реорганизация БД не должна приводить к изменению прикладных программ. Для одновременного обслуживания пользователей должен быть организован параллельный доступ к данным. При использовании интерактивных методов проектирования необходимо использовать режим диалога.

Все версии СУБД должны генерироваться в соответствии с имеющимся комплексом ТС САПР. Доступ к информации БД должен обеспечиваться пользователями различных уровней.

Для надежности необходимо иметь возможность восстановления информации и ПО в случае разрушения, обеспечивать стандартные реакции на ошибочный запрос. Для наглядности информация должна представляться в обычной и удобной для пользователя форме. Для обеспечения экономичности необходимо исключить неоправданное дублирование данных, обеспечить автоматизацию сбора статистических данных о содержании и использовании информации банка для организации эффективного распределения памяти, обеспечить наличие средств для тиражирования баз данных.

Техническое обеспечение (ТО) АП — это совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для выполнения АП. Пример ТО АП показан на рис. 8.28. Технические средства (ТС) выполняют определенную функцию в САПР и представляют собой компоненты ТО. Вообще говоря, компонент САПР — это элемент средства обеспечения, выполняющий определенную функцию. К ТС относятся устройства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных, измерительные и другие устройства.

Различают следующие группы ТС:

14) *подготовка и ввод данных*. Группа предназначена для автоматизации подготовки и редактирования данных при вводе в ЭВМ алфавитно-цифровой и графической информации. Группа дает возможность кодирования информации, нанесения данных на машинные носители, ввода данных в ЭВМ, визуального контроля и редактирования данных при вводе информации;

15) *передача данных*. Группа предназначена для обеспечения дистанционной связи технических средств по телефонным, телеграфным и специальным каналам связи;

16) *программная обработка данных*. Группа включает в себя универсальные или специализированные ЭВМ, обеспечивающие прием цифровых данных с устройства ввода или каналов связи, их программной обработки, накопления и вывода на машинные носители, устройства отображения и каналы связи. Позволяет изменить производительность путем наращивания ЭВМ, использовать мультипрограммный и диалоговый режимы работы;

– *отображение и документирование данных*. Группа предназначена для оперативного представления и документирования проектных решений. Здесь используют печатающие устройства и графопостроители, микрофильмы, микрофиши и устройства отображения визуальной информации;

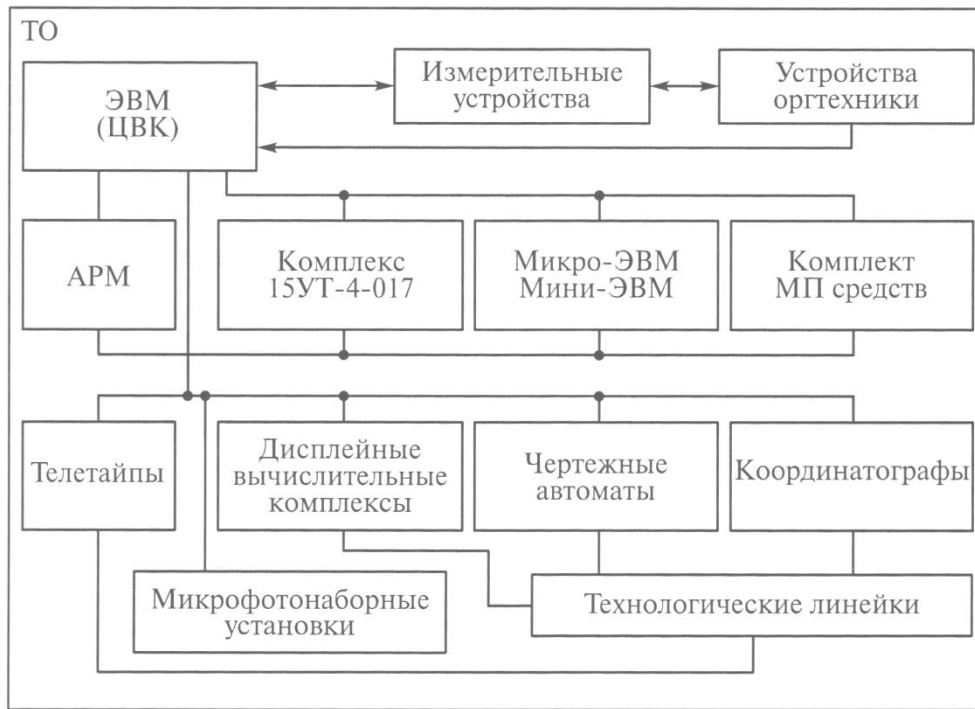


Рис 8.28. Техническое обеспечение САПР

— *архив проектных решений*. Группа предназначена для обеспечения хранения, контроля, восстановления и размножения данных о проектных решениях и справочных данных.

Компоненты ТО создаются на базе серийных средств вычислительной техники общего назначения и специализированных технических средств. В настоящее время преимущественно используют двухуровневую иерархическую структуру комплекса ТС САПР. Структура включает в себя компоненты центрального вычислительного комплекса (ЦБК) и компоненты терминального комплекса (ТК). Центральный ВК строят на основе ЭВМ, вычислительных систем и сетей ЭВМ. Терминальный комплекс САПР строят на основе автоматизированных рабочих мест, терминальных станций с использованием микропроцессоров, мини- и микроЭВМ.

Лингвистическое обеспечение (ЛО) АП — совокупность языков проектирования (ЯП), включая термины и определения, правила формализации естественного языка и методы сжатия и развертывания текстов, необходимых для выполнения АП, представленных в заданной форме (рис.8.29).

Методическое обеспечение (МТО) — совокупность документов, устанавливающих состав и правила отбора и эксплуатации средств обеспечения АП, необходимых для выполнения АП. Отметим, что в некоторых работах и документах методическое обеспечение понимается более широкой в качестве компонентов включает МО и ЛО.

Организационное обеспечение (ОО) АП — совокупность документов, устанавливающих состав проектной организации и ее подразделений, связи между ними, их функции, а также форму представления результата проектирования и порядок рассмотре-



Рис. 8.29. Лингвистическое обеспечение САПР

ния проектных документов, необходимых для выполнения АП. Компонентами ОО САПР являются методические и руководящие материалы, положения, инструкции, приказы и другие документы, обеспечивающие взаимодействие подразделений проектной организации при создании и эксплуатации САПР.

В настоящее время при создании ЭВМ пятого поколения с перестраиваемой архитектурой и коммутацией, способных принимать решения в условиях расплывчатости и неопределенности, перспективными являются САПР, позволяющие адаптироваться к внешним условиям проектирования и имеющие возможность настраиваться на заданный класс создаваемых объектов.

3. Математические модели проектируемых объектов в САПР

Классификация математических моделей. Математическая модель (ММ) технического объекта есть совокупность математических объектов (чисел, переменных, матриц, множеств и т. п.) и отношений между ними, которая адекватно отображает свойства технического объекта, интересующие инженера, разрабатывающего этот объект. Выполнение проектных операций и процедур в САПР основано на оперировании ММ. С их помощью прогнозируются характеристики и оцениваются возможности предложенных вариантов схем и конструкций, проверяется их соответствие предъявляемым требованиям, проводится оптимизация параметров, разрабатывается техническая документация и т. п.

В САПР для каждого иерархического уровня сформулированы основные положения математического моделирования, выбран и развит соответствующий математический аппарат, получены типовые ММ элементов проектируемых объектов,

формализованы методы получения и анализа математических моделей систем. Сложность задач проектирования и противоречивость требований высокой точности, полноты и малой трудоемкости анализа обуславливают целесообразность компромиссного удовлетворения этих требований с помощью соответствующего выбора моделей. Это обстоятельство приводит к расширению множества используемых моделей и развитию алгоритмов адаптивного моделирования.

Функциональные и структурные модели. В проектных процедурах, связанных с функциональным аспектом проектирования, как правило, используются ММ, отражающие закономерности процессов функционирования объектов. Такие модели называют функциональными. Типичная функциональная модель представляет собой систему уравнений, описывающих либо электрические, тепловые, механические процессы, либо процессы преобразования информации.

В то же время в процедурах, относящихся к конструкторскому аспекту проектирования, преобладает использование математических моделей, отражающих только структурные свойства объекта, например его геометрическую форму, размеры, взаимное расположение элементов в пространстве. Такие модели называют *структурными*. Структурные модели чаще всего представляются в виде графов, матриц инцидентий и смежности, списков и т. п.

Как правило, функциональные модели более сложные, поскольку в них отражаются также сведения о структуре объектов. Однако при решении многих задач конструирования использование сложных функциональных моделей не оправдано, так как нужные результаты могут быть получены на основе более простых структурных моделей. Функциональные модели применяют преимущественно на завершающих этапах верификации описаний объектов, предварительно синтезированных с помощью структурных моделей.

Иерархия математических моделей в САПР. Блочно-иерархический подход к проектированию радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) включает в качестве своей основы иерархию математических моделей. Деление моделей по иерархическим уровням (уровням абстрагирования) происходит по степени детализации описываемых свойств и процессов, протекающих в объекте. При этом на каждом иерархическом уровне используют свои понятия «система» и «элементы». Так, система k -того уровня рассматривается как элемент на соседнем более высоком $(k-1)$ -м уровне абстрагирования.

Представим структуру некоторого объекта множества элементов (рис. 8.30) и связей между ними. Выделим в соответствии с блочно-иерархическим подходом

в структуре объекта некоторые подмножества элементов и назовем их блоками (на рисунке показаны штриховыми линиями). Пусть состояние каждой связи характеризуется одной фазовой переменной v_i , z_j или u_k . Здесь v_i относится к внутренним связям между элементами данного блока, z_j , u_k относятся к выходам и входам блока соответственно. Теперь поясним важные для функциональных моделей понятия полной модели и макромоделей.

Полная модель блока есть модель, составленная из моделей элементов с учетом межэлементных связей, т. е. модель, описывающая как состояние выходов, так и состояние каждого из элементов блока. Моделями элементов блока A являются уравнения, связывающие входные и выходные переменные:

$$\begin{aligned} f_1(v_1, u_1) &= 0; \\ f_2(v_2, u_2) &= 0; \\ f_3(v_2, u_3, v_1) &= 0; \\ &\dots\dots\dots \\ f_9(v_9, u_8, z_2) &= 0. \end{aligned} \tag{8.1}$$

Полная модель блока есть система уравнений

$$F(V, U) = 0, Z = \psi(V, U), \quad (8.2)$$

где V , Z , U — векторы внутренних, выходных и входных фазовых переменных блока.

При большом количестве элементов размерность вектора V и порядок системы уравнений (8.2) становятся чрезмерно большими и требуют упрощения.

При переходе к более высокому иерархическому уровню упрощения основаны на исключении из модели вектора внутренних переменных $\mathbf{V}$. Полученная модель представляет собой систему уравнений

$$\varphi(\mathbf{Z}, \mathbf{U}) = 0 \quad (8.3)$$

существенно меньшей размерности, чем полная модель (8.2), и называется *макро-моделью*. Следовательно, макро модель уже не описывает процессы внутри блока, а характеризует только про-

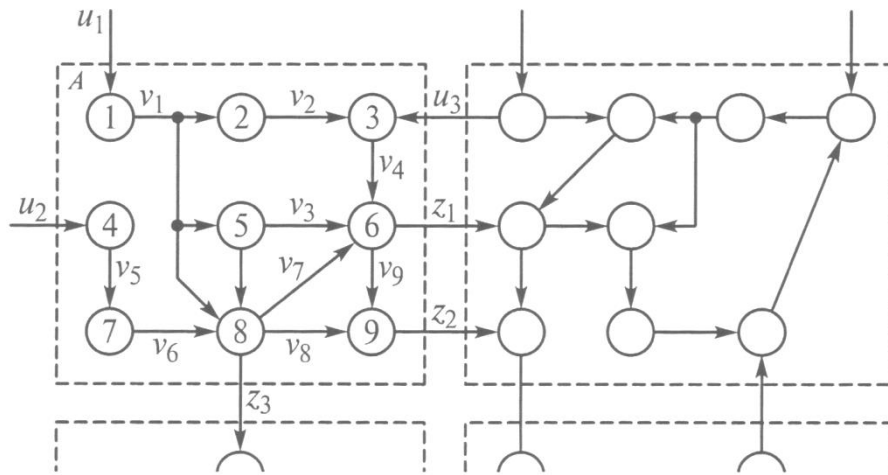


Рис. 8.30. Представление структуры объекта

цессы взаимодействия данного блока с другими в составе системы блоков.

Модели (8.2) и (8.3) относятся друг к другу как полная модель и макро модель на n -м уровне иерархии. На более высоком $(n-1)$ -м уровне блок А рассматривается как элемент и макро модель (8.3) становится моделью элемента А. Следовательно, модели (8.1) и (8.3) относятся друг к другу как модели элементов соседних иерархических уровней. Из моделей типа (8.3) может быть составлена полная модель системы на $(n-1)$ -м уровне.

Микро-, макро- и метауровни. В зависимости от сложности объекта при его проектировании используют большее или меньшее число уровней абстракции. Объединение уровней, родственных по характеру используемого математического аппарата, приводит к образованию трех укрупненных уровней — микро-, макро- и метауровня — в иерархии функциональных моделей для большинства проектируемых сложных объектов.

На **микроуровне** используют математические модели, описывающие физическое состояние и процессы в сплошных средах. Для моделирования применяют аппарат уравнений математической физики. Примерами таких уравнений служат дифференциальные уравнения в частных производных—уравнения электродинамики, теплопроводности, упругости, газовой динамики. Эти уравнения описывают поля электрического потенциала и температуры в полупроводниковых кристаллах интегральных схем, напряженно-деформированное состояние деталей механических конструкций и т. п. К типичным фазовым переменным на микроуровне относятся электрические потенциалы, давления, температуры, концентрации частиц,

плотности токов, механические напряжения и деформации. Независимыми переменными являются время и пространственные координаты. В качестве операторов F и ψ в уравнениях (8.2) фигурируют дифференциальные и интегральные операторы. Уравнения (8.2), дополненные краевыми условиями, составляют ММ объектов на микроуровне. Анализ таких моделей сводится к решению краевых задач математической физики.

На *макроуровне* производится дискретизация пространств с выделением в качестве элементов отдельных деталей, дискретных электрорадиоэлементов, участков полупроводниковых кристаллов. При этом из числа независимых переменных исключают пространственные координаты. Функциональные модели на макроуровне представляют собой системы алгебраических или обыкновенных дифференциальных уравнений, для их получения и решения используют соответствующие численные методы.

В качестве фазовых переменных фигурируют электрические напряжения, токи, силы, скорости, температуры, расходы и т. д. Они характеризуют проявления внешних свойств элементов при их взаимодействии между собой и внешней средой в электронных схемах или механических конструкциях.

На *метауровне* с помощью дальнейшего абстрагирования от характера физических процессов удается получить приемлемое по сложности описание информационных процессов, протекающих в проектируемых объектах. На метауровне для моделирования аналоговой РЭА широко применяют аппарат анализа систем автоматического управления, а для моделирования цифровой РЭА — математическую логику, теорию конечных автоматов, теорию массового обслуживания. Математические модели на метауровне — системы обыкновенных дифференциальных уравнений, системы логических уравнений, имитационные модели систем массового обслуживания.

Формы представления моделей. Для представления моделей используют следующие основные формы:

- 17) *инвариантная форма* — запись соотношений модели с помощью традиционного математического языка безотносительно к методу решения уравнений модели;
- 18) *алгоритмическая форма* — запись соотношений модели и выбранного численного метода решения в форме алгоритма;
- 19) *аналитическая форма* — запись модели в виде результата аналитического решения исходных уравнений модели; обычно модели в аналитической форме

представляют собой явные выражения выходных параметров как функций внутренних и внешних параметров;

20) *схемная форма*, называемая также графической формой, — представление модели на некотором графическом языке, например на языке графов, эквивалентных схем, диаграмм и т. п. Графические формы удобны для восприятия человеком. Использование таких форм возможно при наличии правил однозначного истолкования элементов чертежей и их перевода на язык инвариантных или алгоритмических форм.

Модели в алгоритмической и аналитической формах называют соответственно *алгоритмическими* и *аналитическими*. Среди алгоритмических моделей важный класс составляют *имитационные модели*, предназначенные для имитации физических или информационных процессов в объекте при задании различных зависимостей входных воздействий от времени. Собственно имитацию названных процессов называют имитационным моделированием. Результат имитационного моделирования — зависимости фазовых переменных в избранных элементах системы от времени. Примерами имитационных моделей являются модели электронных схем в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений или модели систем массового обслуживания, предназначенные для имитации процессов прохождения заявок через систему.

Требования к математическим моделям. Основными требованиями, предъявляемыми к математическим моделям, являются адекватность, универсальность и экономичность.

Адекватность. Модель считается адекватной, если отражает заданные свойства объекта с приемлемой точностью. Точность определяется как степень совпадения значений выходных параметров модели и объекта. Пусть ε_j — относительная погрешность модели по j -тому выходному параметру:

$$\varepsilon_j = (\tilde{y}_j - y_j) / y_j$$

где $\tilde{y}_j$ — j -тый выходной параметр, рассчитанный с помощью модели; y_j — тот же выходной параметр, имеющий место в моделируемом объекте.

Погрешность модели ε_m по совокупности учитываемых выходных параметров оценивается одной из норм вектора $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$, например

$$\varepsilon_m = \max_{j=1, n} |\varepsilon_j| \text{ или } \varepsilon_m = \sqrt{\sum_{i=1}^m \varepsilon_j^2}.$$

Точность модели различна в разных условиях функционирования объекта. Эти условия характеризуются внешними параметрами. Если задаться предельной допустимой погрешностью $\varepsilon_{\text{пред}}$, то можно в пространстве внешних параметров выделить область, в которой выполняется условие

$$\varepsilon_{\text{м}} < \varepsilon_{\text{пред}}$$

Эту область называют *областью адекватности* (ОА) модели. Возможно введение индивидуальных предельных значений $\varepsilon_{\text{пред}j}$ для каждого выходного параметра и определение ОА как области, в которой одновременно выполняются все m условий вида $|\varepsilon_j| \leq \varepsilon_{\text{пред}j}$.

Определение областей адекватности для конкретных моделей — сложная процедура, требующая больших вычислительных затрат. Эти затраты и трудности представления ОА быстро растут с увеличением размерности пространства внешних параметров. Определение ОА — более трудная задача, чем, например, задача параметрической оптимизации, поэтому для моделей вновь проектируемых объектов ОА не рассчитывают.

Однако для моделей унифицированных элементов расчет областей адекватности становится оправданным в связи с однократностью определения ОА и многократностью их использования при проектировании различных систем. Знание ОА позволяет правильно выбирать модели элементов из числа имеющихся и тем самым повышать достоверность результатов машинных расчетов.

В общем случае ОА может иметь произвольную форму, сведения о которой выражаются громоздко, и неудобна в использовании, поэтому на практике вместо истинных ОА применяют те или иные их аппроксимации. На рис. 8.31 дано графическое представление области адекватности и аппроксимирующего ее гиперпараллелепипеда. Такое представление удобно для двумерных случаев.

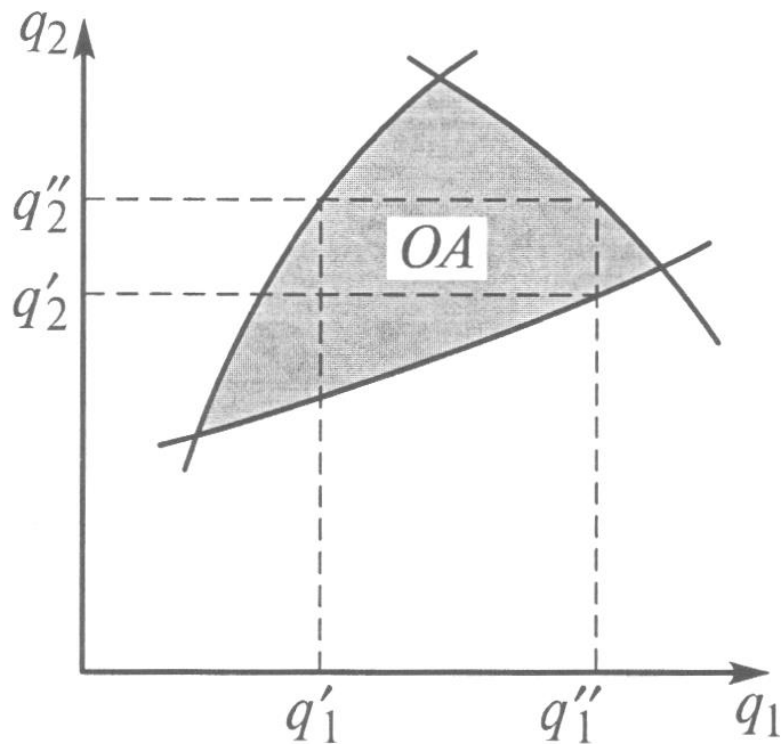


Рис. 8.31. Пример области адекватности

Возможно использование и других аппроксимаций OA, например областей с линеаризованными границами в виде участков гиперплоскостей, областей в форме гиперсфер и т. п.

Универсальность. При определении OA необходимо выбрать совокупность внешних параметров и совокупность выходных параметров y_j , отражающих учитываемые в модели свойства. Типичными внешними параметрами при этом являются параметры нагрузки и внешних воздействий (электрических, механических, тепловых, радиационных и т. п.). Увеличение числа учитываемых внешних факторов расширяет применимость модели, но существенно удорожает работу по определению OA. Выбор совокупности выходных параметров также неоднозначен, однако для большинства объектов число и перечень учитываемых свойств и соответствующих им выходных параметров сравнительно невелики, достаточно стабильны и составляют типовой набор выходных параметров. Например, для макромоделей логических элементов БИС такими выходными параметрами являются уровни выходного напряжения в состояниях логических «0» и «1», запасы помехоустойчивости, задержка распространения сигнала, рассеиваемая мощность.

Если адекватность характеризуется положением и размерами ОА, то универсальность модели определяется числом и составом учитываемых в модели внешних и выходных параметров.

Экономичность. Экономичность модели характеризуется затратами вычислительных ресурсов для ее реализации, а именно затратами машинного времени T_m и памяти P . Общие затраты T_m и P_m на выполнение в САПР какой-либо проектной процедуры зависят как от особенностей выбранных моделей, так и от методов решения.

В большинстве случаев при реализации численного метода происходят многократные обращения к модели элемента, входящего в состав моделируемого объекта. Тогда удобно экономичность модели элемента характеризовать затратами машинного времени, получающимися при обращении к модели, а число обращений к модели должно учитываться при оценке экономичности метода решения.

Экономичность модели по затратам памяти оценивается объемом оперативной памяти, необходимой для реализации модели.

Требования широких областей адекватности, высокой степени универсальности, с одной стороны, и высокой экономичности, с другой, являются противоречивыми. Наилучшее компромиссное удовлетворение этих требований оказывается неодинаковым в различных применениях. Это обстоятельство обуславливает использование в САПР многих моделей для объектов одного и того же типа — различного рода макромоделей, многоуровневых, смешанных моделей и т. п.

Методы получения моделей элементов. Получение моделей элементов (моделирование элементов) в общем случае — процедура неформализованная. Основные решения, касающиеся выбора вида математических соотношений, характера используемых переменных и параметров, принимает проектировщик. В то же время такие операции, как расчет численных значений параметров модели, определение областей адекватности и другие, алгоритмизированы и решаются на ЭВМ. Поэтому моделирование элементов обычно выполняется специалистами конкретных технических областей с помощью традиционных средств экспериментальных исследований и средств САПР.

Методы получения функциональных моделей элементов делят на теоретические и экспериментальные. *Теоретические методы* основаны на изучении физических закономерностей протекающих в объекте процессов, определении соответствующего этим закономерностям математического описания, обосновании и

принятии упрощающих предположений, выполнении необходимых выкладок и приведении результата к принятой форме представления модели. *Экспериментальные методы* основаны на использовании внешних проявлений свойств объекта, фиксируемых во время эксплуатации однотипных объектов или при проведении целенаправленных экспериментов.

Несмотря на эвристический характер многих операций моделирования, имеется ряд положений и приемов, общих для получения моделей различных объектов. Достаточно общий характер имеют методика макромоделирования, математические методы планирования экспериментов, а также алгоритмы формализуемых операций расчета численных значений параметров и определения областей адекватности.

$$|\mathbf{F}_i| \leq f N_i, \quad (\mathbf{F}_i, \mathbf{k}) = 0. \quad (1.1)$$

4) Силы $\Phi_i \mathbf{k}$, с которыми педипуляторы прижимаются к поверхности из-за наличия вакуума, $i=1, \dots, n$, равны

$$\Phi_i = (p - p_i) S_i > 0, \quad i=1, \dots, n. \quad (1.2)$$

Здесь p - атмосферное давление, p_i - давление под i -м захватом; S_i - площадь этого захвата. Запишем условия равновесия робота под действием приложенных сил

$$\mathbf{R} + \sum (N_i - \Phi_i) \mathbf{k} + \mathbf{F}_i = 0, \quad \mathbf{M}_0 + \sum \mathbf{r}_i \times [(N_i - \Phi_i) \mathbf{k} + \mathbf{F}_i] = 0 \quad (1.3)$$

и спроектируем их на оси координат. Суммирование всюду проводится по i от 1 до n . Получим две группы уравнений равновесия

$$R_z + \sum (N_i - \Phi_i) = 0, \quad M_x + \sum y_i (N_i - \Phi_i) = 0, \quad M_y - \sum x_i (N_i - \Phi_i) = 0; \quad (1.4)$$

$$R_x + \sum X_i = 0, \quad R_y + \sum Y_i = 0, \quad M_z + \sum (x_i Y_i - y_i X_i) = 0. \quad (1.5)$$

Здесь через R_x, R_y, R_z и M_x, M_y, M_z обозначены проекции на оси x, y, z векторов $\mathbf{R}$ и $\mathbf{M}_0$ соответственно, а через X_i, Y_i - проекции сил $\mathbf{F}_i$ на оси x, y .

Укажем условия, при которых существует решение N_i системы (1.4), удовлетворяющее неравенствам $N_i > 0$. Для этого введем в рассмотрение точку K плоскости x, y , относительно которой x, y - компоненты главного момента внешних сил и сил Φ , равны нулю. Радиус-вектор $\mathbf{r}^*$ точки K равен $\mathbf{r}^* = (x^*, y^*, 0)$,

$$x^* = \frac{\sum x_i \Phi_i + M_y}{\sum \Phi_i - R_z}, \quad y^* = \frac{\sum y_i \Phi_i - M_x}{\sum \Phi_i - R_z}. \quad (1.6)$$

Известно следующее утверждение. Если выполнены условия

$$\sum \Phi_i > R_z, \quad K = (x^*, y^*) \in D, \quad (1.7)$$

где D - область в плоскости x, y , являющаяся выпуклой оболочкой всех точек контакта, то система (1.4) имеет решение, при котором все $N_i > 0$. Условия (1.7) являются необходимыми и достаточными для того, чтобы абсолютно жесткий робот не оторвался от плоскости контакта.

Чтобы робот оставался в равновесии, необходимо, помимо выполнения условий (1.7), обеспечивающих отсутствие отрыва, еще потребовать, чтобы не было проскальзывания. Это означает, что при вращении вокруг любого возможного

мгновенного центра $C_0(x, y)$ в плоскости контакта момент внешних активных сил не превышает момента сил трения. Данное условие, с учетом неравенства (1.1), имеет вид

$$\begin{aligned} |M_z - xR_y + yR_x| &\leq \sum \rho_i |F_i| \leq f \sum \rho_i N_i, \\ \rho_i &= [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]^{1/2}, \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (1.8)$$

В левой части (1.8) записан момент внешних активных сил относительно оси, проходящей через точку C_0 параллельно оси z , через ρ_i обозначено расстояние от точки C_0 до i -ой точки контакта. Необходимое и достаточное условие отсутствия проскальзывания при известных N_i запишется в виде

$$\sup_{x, y} |Q| \leq f, \quad Q = (M_z - xR_y + yR_x) (\sum \rho_i N_i)^{-1}. \quad (1.9)$$

Здесь максимум берется по всем x, y , включая бесконечно удаленную точку, отвечающую поступательному движению. Если выполнены условия (1.7) и (1.9) при известных нормальных реакциях $N_i > 0$, то робот будет находиться в равновесии.

Отметим, однако, что уравнения (1.4) для определения N , образуют совокупность трех уравнений с n неизвестными. Поэтому при $n > 3$ система в общем случае статически неопределима, и реакции N_i определяются неоднозначно. В статически неопределимых случаях в механике для нахождения реакций N , часто привлекают дополнительные соображения: учитывают упругие деформации и геометрические неидеальности (погрешности изготовления). При этом распределение нормальных реакций оказывается существенно зависящим от жесткости тела и опоры, а также от геометрических неидеальностей.

Рассмотрим некоторые возможные способы дальнейшего анализа условий равновесия.

Для абсолютно жесткой модели дополнительная информация о жесткости конструкции робота и о погрешностях изготовления не учитывается, так что система остается статически неопределимой. В этом случае робот считается абсолютно жестким, и распределение реакций N , может быть любым, удовлетворяющим условиям (1.4). При этом условие отсутствия проскальзывания (1.8) представим в виде

$$\sup_{x, y, N} |Q| \leq f. \quad (1.10)$$

Здесь, как и в (1.8), x, y могут принимать любые значения, а N , могут быть любыми, удовлетворяющими уравнениям (1.4) и условиям $N_i > 0$. Если выполнены условия (1.7), (1.10), то робот будет в равновесии при любых допустимых реакциях

N_t . Поэтому такие условия естественно называть условиями гарантированного равновесия.

Резюмируя сказанное, изложим алгоритм проверки этих условий.

1) Подсчитываем проекции главного вектора R и главного момента M_o внешних активных сил на оси системы $Oxyz$.

2) По формулам (1.2) определяем силы Φ_i .

3) Вычисляем координаты точки K по формулам (1.6).

4) Проверяем выполнение условий (1.7). При этом в качестве множества D следует брать выпуклую оболочку всех точек контакта, с учетом размеров захватов. Если же вместо D брать более узкое множество, а именно выпуклый многоугольник $D' \subset D$ с вершинами в центрах захватов g , то эти условия будут выполнены с некоторым запасом (рис. 1.6). Если точки контакта захватов не лежат на одной прямой, то для надежности целесообразно использовать многоугольник D' , в противном случае D' - отрезок, и здесь нужно учитывать все множество D .

21) Если хотя бы одно из условий (1.7) нарушено, то робот оторвется от поверхности. Если оба условия выполнены, то проверяем условия (1.10), в которых Q вычисляется по формуле (1.9). Проверка неравенства (1.10) предполагает вычисление или оценку максимума функции Q , т. е. определение такого числа q , что $q < f$. Это условие гарантирует отсутствие проскальзывания.

Учтем малую продольную упругую податливость педипуляторов робота, т. е. примем

$$N_i = -c_i h_i, \quad c_i > 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1.11)$$

где h_i - удлинение i -го педипулятора, c_i - его жесткость. Обозначим через h смещение вдоль оси z некоторой точки корпуса робота, находящейся на оси Oz , а через α, β - малые углы поворота корпуса вокруг осей x, y соответственно. Тогда удлинение i -го педипулятора робота представится в виде

$$h_i = h + \xi_i + (\alpha y_i - \beta x_i). \quad (1.12)$$

Здесь ξ_i - малое удлинение, обусловленное конструктивными причинами: разным уровнем точек крепления педипуляторов или отличием их длины от некоторого среднего значения из-за погрешности изготовления. Подставив соотношения (1.12) в (1.11), будем иметь

$$N_i = -c_i h - c_i y_i \alpha + c_i x_i \beta + N_i^0, \quad N_i^0 = -c_i \xi_i. \quad (1.13)$$

Здесь сила N_i^0 равна реакции i -го педипулятора при отсутствии смещения корпуса робота относительно нейтрального положения, т. е. при $h = \alpha = \beta = 0$. Подставляя выражение (1.13) в уравнение равновесия (1.4), получим

$$\begin{aligned} h \sum c_i + \alpha \sum c_i y_i - \beta \sum c_i x_i &= R_z + \sum (N_i^0 - \Phi_i), \\ h \sum c_i y_i + \alpha \sum c_i y_i^2 - \beta \sum c_i x_i y_i &= M_x + \sum y_i (N_i^0 - \Phi_i), \\ -h \sum c_i x_i - \alpha \sum c_i x_i y_i + \beta \sum c_i x_i^2 &= M_y - \sum x_i (N_i^0 - \Phi_i). \end{aligned} \quad (1.14)$$

Соотношения (1.14) представляют собой систему трех линейных алгебраических уравнений для трех неизвестных: h, α, β .

Преобразуем эту систему. Введем в рассмотрение точку A плоскости Oxy с координатами:

$$x_A = \frac{\sum c_i x_i}{\sum c_i}, \quad y_A = \frac{\sum c_i y_i}{\sum c_i}. \quad (1.15)$$

Точка A есть центр масс системы точек, расположенных в точках контакта педипуляторов и имеющих массы, пропорциональные жесткостям педипуляторов c_i . Положим

$$x_i = x_i' + x_A, \quad y_i = y_i' + y_A, \quad h = -\alpha y_A + \beta x_A + h'. \quad (1.16)$$

Заметим, что в силу (1.15), (1.16) имеем

$$\sum c_i x_i' = \sum c_i y_i' = 0. \quad (1.17)$$

Перепишем систему (1.14), заменяя в ней x_i, y_i, h на x_i', y_i', h' согласно (1.16) и пользуясь равенствами (1.17):

$$\begin{aligned} h' \Sigma c_i &= R_z + \Sigma (N_i^0 - \Phi_i), \\ h' y_A \Sigma c_i + \alpha \Sigma c_i y_i'^2 - \beta \Sigma c_i x_i' y_i' &= M_x + \Sigma y_i (N_i^0 - \Phi_i), \\ -h' x_A \Sigma c_i - \alpha \Sigma c_i x_i' y_i' + \beta \Sigma c_i x_i'^2 &= M - \Sigma x_i (N_i^0 - \Phi_i). \end{aligned} \quad (1.18)$$

Преобразуем также выражение (1.13) для N_i , подставляя в него соотношения (1.16):

$$N_i = -c_i h' - c_i y_i' \alpha + c_i x_i' \beta + N_i^0, \quad i=1, \dots, n. \quad (1.19)$$

Из первого уравнения (1.18) находим

$$h' = [R_z + \Sigma (N_i^0 - \Phi_i)] (\Sigma c_i)^{-1}. \quad (1.20)$$

Подставляя (1.20) в остальные два уравнения системы (1.18), получим

$$\begin{aligned} \alpha \Sigma c_i y_i'^2 - \beta \Sigma c_i x_i' y_i' &= M_x', \\ -\alpha \Sigma c_i x_i' y_i' + \beta \Sigma c_i x_i'^2 &= M_y'. \end{aligned} \quad (1.21)$$

$$\begin{aligned} M_x' &= M_x + \Sigma y_i (N_i^0 - \Phi_i) - h' y_A \Sigma c_i = M_x + \Sigma y_i' (N_i^0 - \Phi_i) - R_z y_A, \\ M_y' &= M_y - \Sigma x_i (N_i^0 - \Phi_i) + h' x_A \Sigma c_i = M_y - \Sigma x_i' (N_i^0 - \Phi_i) + R_z x_A. \end{aligned} \quad (1.22)$$

Здесь обозначено, с учетом равенств (1.20), (1.16),

Система (1.21) для α, β имеет единственное решение, если отличен от нуля определитель

$$\begin{aligned} \Delta &= \Sigma c_i y_i'^2 \Sigma c_i x_i'^2 - (\Sigma c_i x_i' y_i')^2 = \Sigma \xi_i^2 \Sigma \eta_i^2 - (\Sigma \xi_i \eta_i)^2 \geq 0, \\ \xi_i &= c_i^{1/2} x_i', \quad \eta_i = c_i^{1/2} y_i', \end{aligned} \quad (1.23)$$

$$y_i/x_i = \lambda, \quad i=1, \dots, n,$$

который неотрицателен в силу неравенства Коши - Буняковского. Равенство $\Delta = 0$ имеет место лишь в случае коллинеарности вектора $(\xi_1, \dots, \xi_n)$ и $(\eta_1, \dots, \eta_n)$, т. е. при условии

$$y_i/x_i = \lambda, \quad i=1, \dots, n, \quad (1.24)$$

означающем, что все точки контакта лежат на одной прямой (λ - постоянная)

$$y - y_A = \lambda(x - x_A). \quad (1.25)$$

Если условия (1.24) не имеют места, т. е. $\Delta > 0$, то, разрешая систему (1.21), найдем

$$\begin{aligned} \alpha &= (M_x' \Sigma c_i x_i'^2 + M_v' \Sigma c_i x_i' y_i') \Delta^{-1}, \\ \beta &= (M_x' \Sigma c_i x_i' y_i' + M_v' \Sigma c_i y_i'^2) \Delta^{-1}. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Подставляя выражения (1.20), (1.16) в формулу (1.9), найдем искомые нормальные реакции N_i .

В случае $\Delta = 0$, т. е. при условии (1.24), система (1.21) разрешима лишь при дополнительном условии

$$M_x' / M_v' = -\lambda, \quad (1.27)$$

где λ - коэффициент прямой (1.25). В этом случае из системы (1.21) можно получить

$$\beta - \lambda \alpha = M_v' (\Sigma c_i x_i'^2)^{-1}. \quad (1.28)$$

Используя соотношения (1.24), (1.28), найдем из (1.9)

$$N_i = -c_i h' + c_i x_i' M_v' (\Sigma c_j x_j'^2)^{-1} + N_i^0, \quad i=1, \dots, n. \quad (1.29)$$

Остановимся на смысле условия (1.27). Пользуясь формулами (1.6), подсчитаем выражение

$$\frac{y^* - y_A}{x^* - x_A} = \frac{\Sigma y_i \Phi_i - M_x - y_A \Sigma \Phi_i + R_z y_A}{\Sigma x_i \Phi_i + M_v - x_A \Sigma \Phi_i + R_z x_A} = \frac{\Sigma y_i' \Phi_i - M_x + R_z y_A}{\Sigma x_i' \Phi_i + M_v + R_z x_A}. \quad (1.30)$$

Примем, что погрешности изготовления отсутствуют, и педипуляторы робота закреплены на одном уровне, т. е. $\xi_i = 0$, $N_i^0 = 0$ при $i=1, \dots, n$. Тогда, сопоставляя (1.22) и (1.30), получим

$$(y^* - y_A) / (x^* - x_A) = -M_x' / M_v'. \quad (1.31)$$

Если все точки контакта лежат на одной прямой (1.25), то множество D , являющееся выпуклой оболочкой точек контакта, представляет собой отрезок той же прямой (1.25), и в силу второго условия (1.7) точка K также лежит на этой прямой. Поэтому $y^*-y_A = \lambda (x^*-x_A)$, и из (1.31) вытекает условие (1.27). Поэтому условие (1.27) автоматически выполняется, если $\Delta = 0$, выполнены условия (1.27) и $N_0 = 0$, $i = 1, \dots, n$.

В окончательных формулах для расчета реакций играют роль не абсолютные значения жесткостей c_i , а их отношения. В самом деле, при умножении всех c_i на коэффициент $\mu > 0$ величина Δ согласно (1.23) умножится на μ^2 , величины h_i, α, β согласно (1.20), (1.26) умножатся на μ^{-1} , а величины N_i^0 , согласно (1.19), (1.29) не изменятся. Особенно упрощаются расчеты в случае идентичных педипуляторов, т. е. при условиях

$$c_i = c > 0, \quad \xi_i = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (1.30)$$

В этом случае значение c выпадает из окончательных формул и его можно не измерять. Поэтому при расчетах по приведенным формулам можно просто положить $c_i = 1$, $i = 1, \dots, n$.

Заметим, что в некоторых случаях целесообразно учитывать нелинейность упругой связи (1.11), т. е. полагать

$$N_i = -c_i' h_i \text{ при } h_i > 0, \quad N_i = -c_i'' h_i \text{ при } h_i < 0; \quad (1.32)$$

$$c_i > 0, \quad c_i'' > 0, \quad c_i' \neq c_i'',$$

что в некоторых случаях отражает реальные свойства конструкции робота. Это усложняет схему расчета, так как приходится рассматривать несколько различных вариантов.

Итак, при учете продольной упругой податливости педипуляторов робота алгоритм проверки условий равновесия модифицируется по сравнению с алгоритмом п. 3. Шаги 1-4 остаются неизменными, а шаг 5 заменяется следующей процедурой.

Задаемся жесткостями педипуляторов c_i и начальными удлинениями ξ_i . Вместо ξ_i , можно задать силы N_i^0 , а при отсутствии неидеальностей можно положить $N_i^0 = 0$, $i = 1, \dots, n$. Если центры всех стоп не лежат на одной прямой (условие (1.24) не имеет места), то $\Delta \neq 0$, и реакции N_i подсчитываются при помощи формул (1.19), (1.20), (1.23), (1.26). В противном случае, при условии (1.24), следует проверить условие (1.27) (при $N_i^0 = 0$ оно выполнено автоматически) и затем вычислить

N_i по формуле (1.29). Далее следует проверить условие отсутствия проскальзывания (1.9). Здесь так же, как и в схеме п. 3, требуется вычислять максимум функции Q (1.9), но лишь по переменным x, y , что значительно упрощает задачу.

Возможны и другие подходы к расчету условий равновесия робота. Если, например, существенны перекосы конструкции, т. е. крутильные жесткости в точках крепления ног, то можно обратиться к более сложным схемам.

Рассмотрим еще один возможный подход к определению условий надежного контакта стоп шагающего робота с поверхностью перемещения, предусматривающий проведение необходимых расчетов в два этапа.

1) При заданных значениях главного вектора и главного момента внешних сил, приложенных к корпусу робота, определим силы и моменты, действующие на захваты в точках их соединения со штоками, считая, что все стопы жестко связаны с поверхностью перемещения, а робот находится в равновесии.

2) Рассматривая захваты как отдельные абсолютно твердые тела, определим условия, при которых ни один из них не оторвется от поверхности и не начнет скользить по ней под действием сил и моментов, вычисленных на первом этапе, и сил избыточного атмосферного давления. Условия, которые получатся в результате, и будут трактоваться как условия надежного контакта захватов с поверхностью.

Для иллюстрации этого подхода рассмотрим шагающий робот простейшей конструкции (рис. 1.5). Робот состоит из корпуса и двух пар одинаковых педипуляторов, снабженных вакуумными захватами. Точки крепления педипуляторов к корпусу лежат в вершинах прямоугольника $ABCD$, штоки параллельны оси x . Контакт каждого захвата с плоскостью xy ограничен окружностью радиуса r . Действующие на робот силы, распределены симметрично относительно плоскости, перпендикулярной Oxy и проходящей через одну из средних линий прямоугольника $ABCD$. Сделанные предположения позволяют ограничиться «плоской» задачей статики.

На рис. 1.7 изображена проекция робота на плоскость симметрии. Обозначим через A_1, A_2 проекции точек крепления педипуляторов первой и второй пар к захватам, B_1, B_2 - проекции точек крепления этих педипуляторов к корпусу робота и

выберем начало прямоугольной системы координат A_1xz в точке A_1 . Обозначим: $l = |A_1B_1| = |A_2B_2|$ - длина педипуляторов; $a = |A_1A_2| = |B_1B_2|$ - расстояние между педипуляторами; M - величина (с учетом знака) главного момента относительно точки B_1 внешних сил, приложенных к корпусу; $F_x^{(i)}$, $F_z^{(i)}$, $M^{(i)}$, $i=1, 2$ - проекции на оси x, z главного вектора и величина главного момента относительно точки A_i сил, приложенных к захватам i -ой пары педипуляторов со стороны штоков.

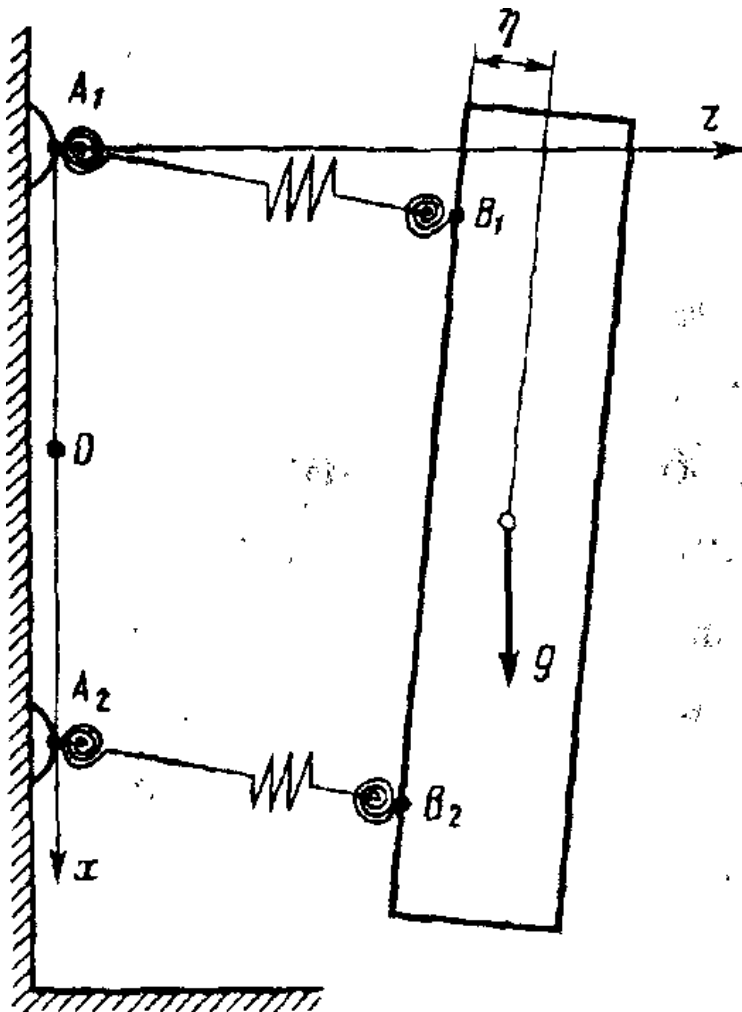


Рис. 1.7 Модель учета крутильных жесткостей ТРВП

Условия равновесия робота под действием внешних сил и реакций захватов представляют собой совокупность трех уравнений относительно шести неизвестных.

$$\begin{aligned} R_x - F_x^{(1)} - F_x^{(2)} &= 0, & R_z - F_z^{(1)} - F_z^{(2)} &= 0, \\ M - R_x l - M^{(1)} - M^{(2)} - a F_z^{(2)} &= 0. \end{aligned} \quad (1.34)$$

Для снятия статической неопределенности предположим, что педипуляторы обладают малой упругой податливостью на растяжение и сжатие, а их соединения с корпусом и захватами - малыми упругими податливостями на кручение. Вследствие этого корпус робота может претерпевать малые смещения относительно системы координат A, xz . Обозначим x, z - компоненты вектора смещения точки B_i , φ - угол поворота корпуса относительно системы координат A, xz , c_i - коэффициенты продольной жесткости педипулятора i -й пары, $i = 1, 2$; k_1, k_2, k_3, k_4 - коэффициенты крутильных жесткостей соответственно в точках A, B_1, B_2, A_2 . Потенциальная энергия малых упругих смещений робота равна

$$\begin{aligned} \Pi &= \sum_{i=1}^4 \Pi_i, & \Pi_1 &= c_1 x^2, & \Pi_2 &= c_2 (z + a\varphi)^2, & \Pi_3 &= k_1 (x/l)^2, \\ \Pi_4 &= k_2 (x/l + \varphi)^2, & \Pi_5 &= k_3 (x/l + \varphi)^2, & \Pi_6 &= k_4 (x/l)^2. \end{aligned} \quad (1.35)$$

Здесь Π_1, Π_2 - потенциальные энергии продольных деформаций первой и второй пар ног, $\Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6$ - потенциальные энергии деформаций кручения в узлах соединений A_1, B_1, B_2, A_2 соответственно.

Условия равновесия корпуса робота под действием внешних сил и упругих сил с потенциальной энергией (1.35) имеют вид

$$\partial \Pi / \partial x = R_x, \quad \partial \Pi / \partial y = R_y, \quad \partial \Pi / \partial \varphi = M. \quad (1.36)$$

Из системы линейных уравнений (1.36) однозначно определяется положение равновесия корпуса робота, т. е. величины x, z, φ . Силы и моменты, действующие на стопы в положении равновесия, вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} F_x^{(i)} &= \partial \Pi_{2i+1} / \partial x + \partial \Pi_{2i+2} / \partial x, & F_z^{(i)} &= \partial \Pi_i / \partial z, & i &= 1, 2; \\ M^{(1)} &= \partial \Pi_4 / \partial \varphi + x F_z^{(1)} - (l+z) F_x^{(1)}; \\ M^{(2)} &= \partial \Pi_2 / \partial \varphi + \partial \Pi_5 / \partial \varphi + (x-a) F_z^{(2)} - (l+z) F_x^{(2)}. \end{aligned} \quad (1.37)$$

Анализ уравнений (1.35)-(1.37) показывает, что при $c_i \rightarrow \infty, k_j \rightarrow \infty$ ($i=1, 2; j=1, 2, 3, 4$) упругие смещения стремятся к нулю, а силы и моменты (1.37) стремятся к конечным пределам:

$$\begin{aligned}
 F_x^{(1)} &= [k_1 + k_2(L_1 - L_2)] / (c_2 l^2 \Delta), \quad F_x^{(2)} = [k_4 + k_3(L_1 - L_2)] / (c_2 l^2 \Delta), \\
 F_z^{(1)} &= (\Gamma_1 - 1) \{ [a^2 \Gamma_2 + \Gamma_3 l^2 (\Gamma_2 - \Gamma_3)] R_z + \Gamma_3 l a R_x - \Gamma_2 a M \} \Delta^{-1}, \\
 F_z^{(2)} &= R_z - F_z^{(1)}, \\
 M^{(1)} &= -k_1 L_1 / (c_2 l \Delta), \quad M^{(2)} = -k_4 L_1 / (c_2 l \Delta), \\
 \Gamma_1 &= 1 + c_1 / c_2, \quad \Gamma_2 = (k_1 + k_2 + k_3 + k_4) / (c_2 l^2), \\
 \Gamma_3 &= (k_2 + k_3) / (c_2 l^2), \\
 L_1 &= [a^2 (\Gamma_1 - 1) + \Gamma_3 l^2 \Gamma_1] R_x + \Gamma_3 l a R_z - \Gamma_3 \Gamma_1 l M, \\
 L_2 &= l (\Gamma_1 \Gamma_3 l R_x + a \Gamma_2 R_z - \Gamma_1 \Gamma_2 M), \\
 \Delta &= a^2 \Gamma_2 (\Gamma_1 - 1) + l^2 \Gamma_1 \Gamma_3 (\Gamma_2 - \Gamma_3).
 \end{aligned} \tag{1.38}$$

Непосредственная проверка показывает, что силы и моменты (1.38) удовлетворяют условиям равновесия (1.34) корпуса робота.

Запишем для одной (*i-ой*) стопы условия равновесия (1.7) и условие непроскальзывания:

$$\begin{aligned}
 F_a^{(i)} &\geq F_z^{(i)}, \quad |M^{(i)}| \leq r(F_a^{(i)} - F_z^{(i)}), \\
 |F_x^{(i)}| &\leq f(F_a^{(i)} - F_z^{(i)}).
 \end{aligned} \tag{1.39}$$

где $(F_a^{(i)} - F_z^{(i)})$ - нормальные реакции.

Систему неравенств (1.39) удобно представить в форме

$$F_a^{(i)} - F_z^{(i)} \geq \max(|F_x^{(i)}|/f, |M^{(i)}|/r). \tag{1.40}$$

Неравенства (1.40) в совокупности с равенствами (1.38) представляют собой искомые условия надежного контакта захватов с поверхностью.

При проведении расчетов представляется более удобным вычислять главный момент внешних сил не относительно точки B_1 , как это делалось выше, а относительно точки O , расположенной в середине отрезка $A_1 A_2$. Главные моменты, M , M^* относительно точек B_1 , O связаны соотношением:

$$M = a R_z / 2 + l R_x + M^*. \tag{1.41}$$

Конкретизируем соотношения (1.40) для типичных частных случаев.

А. Жесткости на кручение малы по сравнению с продольными жесткостями: $K_i = k$, $i = 1, 2, 3, 4$; $c_j l^2 \gg k$, $j = i, 2$. Переходя в (1.38), (1.40) к пределу при $k/(c_j l^2)$ по-

$$\begin{aligned} M^* &\geq aR_z/2 - F_a^{(1)}a - lR_x/2 + a|R_x| \max[l/(4r), 1/(2f)], \\ M^* &\leq -aR_z/2 + F_a^{(2)}a - lR_x/2 - a|R_x| \max[l/(4r), 1/(2f)]. \end{aligned} \quad (1.42)$$

В. Продольные жесткости малы по сравнению с крутильными: $c_1 = c_2 = c$; $K_i = k$, $i=1, 2, 3, 4$; $cl^2 \ll k$. При этом условия (1.40) имеют вид

$$F_a^{(i)} \geq R_z/2 + \max[|R_x|/(2f), |M^*|/2r], \quad i=1, 2. \quad (1.43)$$

С. Крутильные жесткости в узлах крепления педипуляторов к корпусу робота малы: $K_i \ll c_i l^2$, $j=1, 2$, $i=2, 3$, $k_1 = k_4$.

Условия надежного контакта захватов с поверхностью в данном случае имеют вид:

$$\begin{aligned} M^* &\geq aR_z/2 - F_a^{(1)}a - lR_x/2 + a|R_x| \max[l/(2r), 1/(2f)], \\ M^* &\leq -aR_z/2 + F_a^{(2)}a - lR_x/2 - a|R_x| \max[l/(2r), 1/(2f)]. \end{aligned} \quad (1.44)$$

Д. Крутильные жесткости крепления ног к столам малы: $c_1 = c_2 = c$, $k_2 = k_3 = k$, $k_1 \ll cl^2$, $i=1, 4$.

В этом случае условия равновесия захватов имеют вид

$$\begin{aligned} M^* &\geq aR_z/2 - aF_a^{(1)} + a|R_x|/f, \\ M^* &\leq -aR_z/2 + aF_a^{(2)} - a|R_x|/f. \end{aligned} \quad (1.45)$$

Е. Крутильные жесткости крепления ног к захватам, а также продольная жесткость одной из пар педипуляторов малы: $k_1 = k_4$, $k_2 = k_3$, $k_1 \ll c_2 l^2$, $k_1 \ll k_2$, $c_1 \ll c_2$, $k_1 \sim c_1 l^2$. Переходя в (1.38), (1.40) к пределу при $k_1/k_2 \rightarrow 0$, $k_1/c_2 l^2 \rightarrow 0$, $c_1/c_2 \rightarrow 0$, получим:

$$\begin{aligned} F_a^{(1)} &\geq \frac{c_1 a}{c_1 a^2 + 2k_1} \left(\frac{a}{2} R_z - M^* \right) + \max \left[\frac{|R_x|}{2f}, \frac{k_1}{r(c_1 a^2 + 2k_1)} \left| \frac{a}{2} R_z - M^* \right| \right], \\ F_a^{(2)} &\geq \frac{(c_1 a^2 + 4k_1) R_z + 2c_1 a M^*}{2(c_1 a^2 + 2k_1)} + \max \left[\frac{|R_x|}{2f}, \frac{k_1}{r(c_1 a^2 + 2k_1)} \left| \frac{a}{2} R_z - M^* \right| \right]. \end{aligned} \quad (1.46)$$

4. Определение грузоподъемности робота

Определение грузоподъемности робота рассмотрим на примере конструктивной схемы, изображенной на рис. 1.5, при следующих геометрических параметрах робота: $l=0,044$ м - длина педипулятора, $a=|AD|=0,344$ м; $b=|AB|=0,151$ м; $r=0,034$ м; $\eta=0,05$ м - расстояние от центра масс до плоскости крепления педипуляторов к корпусу робота. Атмосферное давление p принято равным $1,01 \cdot 10^5$ Па (760 мм рт. ст.), а коэффициент трения f - равным 0,5, что соответствует трению резины о бетонную поверхность. Действующие на захваты силы (1.2) равны

$$\Phi_1=\Phi=\gamma p \pi r^2=366,8\gamma \text{ (Н)}, \quad \gamma=(p-p_i)/p < 1. \quad (1.47)$$

Подсчитаем предельную массу m робота (вместе с нагрузкой), при которой робот удерживается на вертикальной стене. Примем $\gamma=0,9$. Для простоты предположим, что никаких внешних активных сил, кроме веса, к роботу не прикладывается, а сам робот ориентирован таким образом, что ускорение силы тяжести g направлено вдоль стороны BC параллельно оси x (рис. 1.5). В этом случае выполняются упрощающие предположения о симметричном распределении внешней нагрузки. Проведем сначала расчеты по схеме, использующей абсолютную жесткую модель. Начало системы координат поместим в центр прямоугольника, образованного точками контакта центров стоп с плоскостью Oxy . Координаты x_i, y_i ($i=1, 2, 3, 4$) центров захватов и компоненты главного вектора и главного момента активных сил равны

$$\begin{aligned} x_1=x_2=-a/2, \quad x_3=x_4=a/2, \quad y_1=y_4=-b/2, \\ y_2=y_3=b/2; \quad R_x=mg, \quad R_y=0, \quad R_z=0; \\ M_x=0, \quad M_y=mg(l+\eta), \quad M_z=0. \end{aligned} \quad (1.48)$$

Уравнения (1.4) для определения нормальных реакций имеют вид

$$\begin{aligned} N_1+N_2+N_3+N_4=4\Phi, \quad -N_1+N_2+N_3-N_4=0, \\ -N_1-N_2+N_3+N_4=2mg(l+\eta)/a. \end{aligned} \quad (1.49)$$

Из (1.49) вытекает, что

$$N_1 + N_2 = 2\Phi - mg(l + \eta)/a, \quad N_3 + N_4 = 2\Phi + mg(l + \eta)/a, \quad N_1 + N_3 = N_2 + N_4. \quad (1.50)$$

Координаты (1.6) точки K равны

$$x^* = mg(l + \eta)/(4\Phi), \quad y^* = 0. \quad (1.51)$$

Первое условие (1.7) в рассматриваемом случае, очевидно, выполнено, а второе выражается неравенством $x^* < a/2$. С учетом (1.47), (1.51) получим

$$m \leq m_0 = \frac{2a\Phi}{g(l + \eta)} \approx 274.0\gamma \approx 246.6 \text{ кг}. \quad (1.52)$$

Функция $Q(x, y)$ согласно (1.9), (1.48) равна

$$Q = mgy (\sum \rho_i N_i)^{-1}. \quad (1.53)$$

Вычислим точную верхнюю грань (1.10) функции (1.48). Из (1.48), (1.8) и последнего равенства (1.50) вытекает,

$$\begin{aligned} \sum \rho_i N_i &\geq \sum |y - y_i| N_i = |y + b/2| (N_1 + N_3) + |y - b/2| (N_2 + N_4) = (N_1 + N_3) \times \\ &\times (|y + b/2| + |y - b/2|) \geq 2|y| (N_1 + N_3) = |y| \sum N_i. \end{aligned}$$

Отсюда и из (1.53) следует, что

$$|Q| \leq mg (\sum N_i)^{-1}. \quad (1.54)$$

С другой стороны, переходя в (1.53) к пределу при $y \rightarrow \infty$ получим, что в (1.54) при этом достигается равенство. Поэтому с учетом первого равенства (1.49) имеем

$$\sup |Q| = mg (\sum N_i)^{-1} = mg/(4\Phi). \quad (1.55)$$

Запишем условие непроскальзывания (1.10) в виде $mg/(4\Phi) < f$ и преобразуем его при помощи формулы (1.47)

$$m \leq m_* = 4\Phi fg^{-1} = 74.9\gamma = 67.4 \text{ кг}. \quad (1.56)$$

Условия гарантированного равновесия в рассматриваемом случае выражаются неравенствами (1.52), (1.56). Поскольку $m_0 > m_*$, то грузоподъемность робота определяется величиной m_* .

Воспользуемся теперь схемой, где учитывается только продольная упругость педиупуляторов робота. Примем, что коэффициенты продольной жесткости всех педиупуляторов равны c . В соответствии с (1.15), (1.19), (1.20), (1.22), (1.23), (1.26) получим:

$$\begin{aligned} x_A = y_A = 0, \quad h' = -\Phi/c, \quad M_x' = 0, \quad M_v' = -mg(l+\eta), \\ \Delta = c^2 a^2 b^2, \quad \alpha = 0, \quad \beta = mg(l+\eta)/(ca^2), \\ N_1 = N_2 = \Phi - mg(l+\eta)/(2a), \quad N_3 = N_4 = \Phi + mg(l+\eta)/(2a). \end{aligned} \quad (1.57)$$

Из (1.57) видно, что $N_3 > 0$, $N_4 > Q$ при любых m , а $N_1 > 0$, $N_2 > 0$ лишь при $m < m_0$. Поскольку N_i удовлетворяют последнему равенству (1.50), то максимум (1.9) функции $Q(x, y)$ совпадает с (1.55). Таким образом, расчеты приводят к результату

$$m \leq m_* = 67.4 \text{ кг}, \quad (1.58)$$

Вычислим теперь предельно допустимую массу для различных соотношений продольных и крутильных жесткостей. При переходе к «плоской» модели следует положить $F_a^{(1)} = F_a^{(2)} = 2\Phi$, где Φ вычислено по формуле (1.47), $M^* = -mg(l+\eta)$. Расчеты проведем по формулам (1.42)-(1.46) для случаев А-Е.

А. Из условия (1.42) вытекают неравенства

$$\begin{aligned} mg \{ l + 2\eta + a \max [l/(2r), 1/f] \} &\leq 4\gamma p \pi r^2 a, \\ mg \{ a \max [l/(2r), 1/f] - l - 2\eta \} &\leq 4\gamma p \pi r^2 a \end{aligned}$$

и, следовательно,

$$m \leq m_*^A = \frac{4\gamma p \pi r^2 a}{g \left\{ \left[l + 2\eta + a \max \left(\frac{l}{2r}, \frac{1}{f} \right) \right] \right\}} = 61.9\gamma = 55.7 \text{ кг}. \quad (1.59)$$

В. Из (1.43) вытекает, что

$$mg \max \left[\frac{1}{f}, \frac{l+\eta}{r} \right] \leq 4\gamma p \pi r^2$$

и, следовательно,

$$m \leq m_*^B = \frac{4\gamma p \pi r^2}{g \max [1/f, (l+\eta)/r]} = 54.2\gamma = 48.7 \text{ кг}. \quad (1.60)$$

С. Формулы (1.44) в рассматриваемой ситуации имеют вид

$$\begin{aligned} mg[l+2\eta+a \max(l/r, 1/f)] &\leq 4\gamma p\pi r^2 a, \\ mg[a \max(l/r, 1/f) - l - 2\eta] &\leq 4\gamma p\pi r^2 a, \end{aligned}$$

и предельно допустимая масса определяется соотношением

$$m \leq m_*^c = \frac{4\gamma p\pi r^2 a}{g[l+2\eta+a \max(l/r, 1/f)]} = 61.9\gamma = 55.7 \text{ кг.} \quad (1.61)$$

Д. Условия (1.45) приводят к следующим неравенствам:

$$\begin{aligned} mg[2(l+\eta) + a/f] &\leq 4\gamma p\pi r^2 a, \\ mg[a/f - 2(l+\eta)] &\leq 4\gamma p\pi r^2 a, \end{aligned}$$

из которых вытекает, что

$$m \leq m_*^D = \frac{4\gamma p\pi r^2 a}{g[a+2f(l+\eta)]} = 58.8\gamma = 52.9 \text{ кг.} \quad (1.62)$$

Е. Этот случай отвечает ситуации, когда жесткость педипуляторов на растяжение значительно меньше жесткости на сжатие. Из формул (1.46) вытекает неравенство

$$\begin{aligned} mg\{2(l+\eta)g_1(v) + \max[1/f, 2(l+\eta)g_2(v)/r]\} &\leq 4\gamma p\pi r^2, \\ g_1(v) &= [a(1+2v)]^{-1}, \quad g_2(v) = v/(1+2v), \\ v &= k_1/(c_1 a^2) \end{aligned}$$

и, следовательно,

$$m \leq m_*^E = \frac{4\gamma p\pi r^2}{g\{2(l+\eta)g_1(v) + \max[1/f, 2(l+\eta)g_2(v)/r]\}} \quad (1.63)$$

Анализ функции $m_*^E(v)$ (1.63) на экстремум показывает, что

1) если $f(l+\eta) < r$, то $m_*^E(v)$ монотонно возрастает и

$$\sup_{v>0} m_*^E(v) = \lim_{v \rightarrow \infty} m_*^E(v) = 4\gamma p\pi r^2 f/g;$$

2) если $f(l+\eta) > r$ и $a < 2r$, то $m_*^E(v)$ монотонно возрастает и

$$\sup_{v>0} m_*^E(v) = \lim_{v \rightarrow \infty} m_*^E(v) = 4\gamma p \pi r^2 / [g(l+\eta)];$$

3) если $f(l+\eta) > r$ и $a > 2r$, то $m_*^E(v)$ имеет единственный максимум при $v > 0$:

$$\max_{v>0} m_*^E(v) = m_*^E(v_*) = 4\gamma p \pi r^2 a f / \{g[2f(l+\eta) - 2r + a]\}, \quad (1.64)$$

$$v_* = 1/2r [f(l+\eta) - r]^{-1}.$$

Параметры рассматриваемой модели робота отвечают случаю 3), и максимальная по v грузоподъемность робота вычисляется по формуле (1.64)

$$m_*^E(v_*) = 69.6\gamma = 62.6 \text{ кг}, \quad v_* = 1.3. \quad (1.65)$$

Здесь m_*^E монотонно возрастает от 58.8γ до значения (1.65) при изменении v от 0 до v_* , а затем монотонно убывает, стремясь к 54.2γ при $v \rightarrow \infty$. Отсюда вытекает, что за счет оптимального выбора параметров жесткости конструкции грузоподъемность робота может быть заметно увеличена.

Формулы (1.58)-(1.65) показывают, что расчетная предельная нагрузка, которую выдерживает робот без отрыва и скольжения, зависит от конструктивных параметров.

Выбор расчетной схемы для конкретного варианта робота должен производиться с учетом соотношения его конструктивных параметров и условий функционирования. В соответствии с этими условиями следует выбрать траекторию движения робота, тип походки и места постановки захватов.

Изложенные выше расчетные схемы могут быть реализованы на ЭВМ и служить для проверки надежности контакта робота с поверхностью на всем пути его движения. При этом проверяемые неравенства должны выполняться с достаточным запасом, учитывающим неточность исходных данных.

Лекция

по теме 4.1.2. Виды обеспечения САПР

ВОПРОСЫ

1. Информационное обеспечение САПР.
2. Программное обеспечение САПР.

3. Техническое обеспечение САПР.

ЛИТЕРАТУРА

1. . Меньков А.В., Острейковский В.А. Теоретические основы автоматизированного управления. М.: ОНИКС, 2005. (с. 407-429).

1. Информационное обеспечение САПР

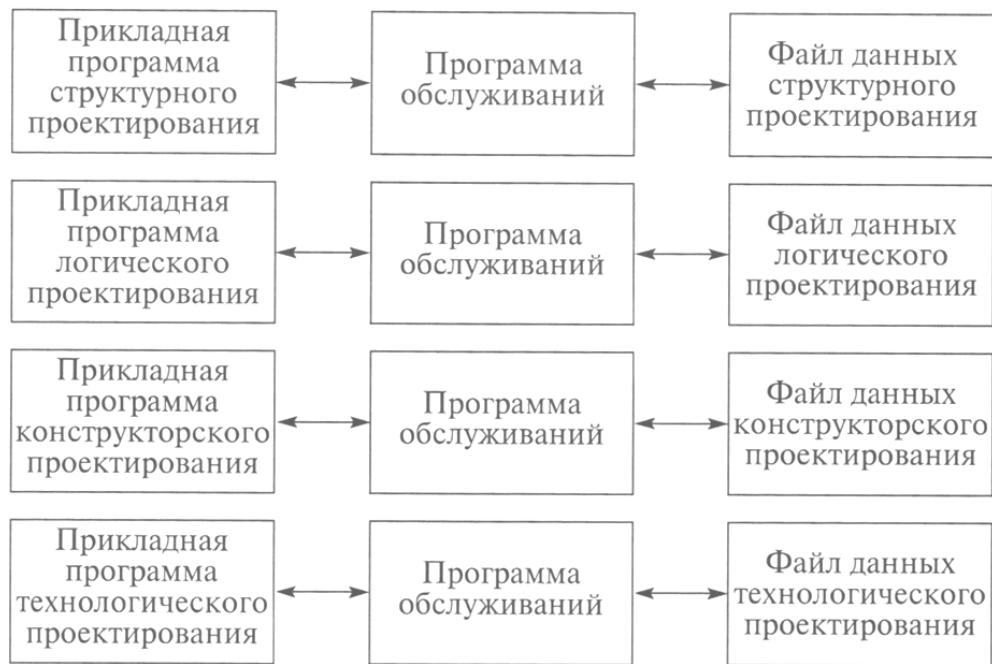
Основные понятия и определения. Основу информационного обеспечения подсистем САПР составляет совокупность данных, которые необходимы для выполнения процесса проектирования. Совокупность компонентов ИО образует информационную базу, называемую базой данных (БД) САПР.

Данные — это сведения о некоторых фактах, позволяющие делать определенные выводы. Взаимосвязанные данные часто называют *системой данных*, и хранимые данные называют информационным фондом. Основное назначение информационного обеспечения — предоставлять пользователям САПР достоверную информацию в определенном виде.

Объектом считают любой предмет, событие, понятие и т. п., о которых приводятся данные. Все объекты характеризуются атрибутами. Например, объект ЭВМ можно характеризовать такими атрибутами: скоростью вычислений, объемом оперативной памяти, числом элементарных операций, числом процессоров, габаритами, количеством мультиплексных каналов и т. п. Сведения, содержащиеся в каждом атрибуте, называют *значениями данных*.

Атрибуты, по значениям которых определяют значения других атрибутов, называют *идентификаторами объекта* или *ключевыми элементами данных*. Отметим, что один и тот же объект могут идентифицировать несколько элементов данных. Их тогда считают кандидатами в идентификаторы. Проблему выбора идентификатора из нескольких кандидатов решает пользователь САПР.

Объединение значений связанных атрибутов называют *записью данных*. Упорядоченную совокупность записей данных называют *файлом данных* или *набором данных*. В настоящее время разработаны универсальные подпрограммы, реализующие методы доступа к файлам, их обработку и обслуживание. Эти подпрограммы являются частью ОС ЭВМ. На рис. 8.32, а показано взаимнооднозначное соответствие



а)



б)

Рис. 8.32. Взаимнооднозначное соответствие между прикладными программами и файлом данных (а) и пример использования универсальных методов доступа (б)

между прикладными программами и файлами данных в САПР печатных плат. На рис. 8.32, б показано использование универсальных методов доступа вместо единичных подпрограмм обслуживания файлов данных.

При обработке данных с расположением одних и тех же элементов данных в нескольких файлах возникают трудности, связанные с избыточностью данных, что

требует нескольких процедур ввода, обновления и формирования; опасностью нарушения непротиворечивости данных, что связано с хранением одной и той же информации в нескольких местах; ограниченностью разделения данных; ограничениями по доступности данных; негибкостью к изменениям; сложностью управления процессом решения задачи.

Существует много адекватных и в то же время неформальных определений базы данных. Приведем те из них, которые получили наибольшее распространение.

База данных — это совокупность специально организованных данных, рассчитанных на применение в большом количестве прикладных программ. *База данных* — это набор файлов, работа с которыми обеспечивается специальным пакетом прикладных программ — системой управления базой данных — с целью создания массивов данных, их обновления и получения справок. *База данных* — это совокупность данных, отображающая состояние объектов и их отношений в рассматриваемой предметной области. *База данных* — совокупность всех тех данных, которые обрабатываются более чем в одной программе (модуле).

Приведем основное различие между БД и файлом данных. Файл данных имеет несколько назначений, но соответствует одному представлению хранимых данных. База данных имеет также несколько назначений, но соответствует различным представлениям о хранимых данных.

Сформулируем основные требования к БД:

- 22) Целостность данных — их непротиворечивость и достоверность.
- 23) Организация БД должна обеспечивать согласование времени выборки данных прикладными программами с частотами их использования прикладными программами САПР.
- 24) Универсальность, т. е. наличие в БД всех необходимых данных и возможности доступа к ним в процессе решения проектной задачи.
- 25) Открытость БД для внесения в нее новой информации.
- 26) Наличие языков высокого уровня взаимодействия пользователей с БД.
- 27) Секретность, т. е. невозможность несанкционированного доступа к информации и ее изменений.
- 28) Оптимизация организации БД — минимизация избыточности данных.

Одним из принципов построения САПР является информационная согласованность частей ее программного обеспечения, т. е. пригодность результатов вы-

полнения одной проектной процедуры для использования другой проектной процедурой без их трудоемкого ручного преобразования пользователем. Отсюда вытекают следующие условия информационной согласованности:

- использование программами одной и той же подсистемы САПР единой БД;
- использование единого внутреннего языка для представления данных.

Комплексная автоматизация процесса проектирования объекта предполагает информационную согласованность не только отдельных программ подсистем САПР, но и самих подсистем между собой. Способом достижения этой согласованности является единство информационного обеспечения.

Основные способы информационного согласования подсистем САПР достигаются либо созданием единой БД, либо сопряжением нескольких БД с помощью специальных программ, которые перекодируют информацию, приводя ее к требуемому виду.

2. Программное обеспечение САПР

Программное обеспечение (ПО) совместно с информационным являются звеньями, связывающими все виды обеспечения САПР в единую систему проектирования.

К программному обеспечению САПР предъявляется ряд системных требований, от степени удовлетворения которых в значительной мере зависит эффективность всей системы автоматизированного проектирования, а именно требование эффективной программной реализации алгоритмов, требование информационной согласованности программ друг с другом и с системой управления базы данных, требование модульности и наращиваемости ПО САПР.

Программное обеспечение САПР состоит из двух составных частей — общего и специального ПО. Общее ПО предназначено для планирования и организации процесса выполнения прикладных программ и определяется существующей номенклатурой операционных систем и комплексов программ технического обслуживания. Специальное ПО представляет собой пакеты прикладных программ, реализующих алгоритмы выполнения проектных операций и процедур. Эти прикладные программы необходимы группе пользователей, занимающихся автоматизированным проектированием в конкретной проблемной области.

Функции и состав общего программного обеспечения. Под операционной системой (ОС) ЭВМ понимают комплект системных программ, управляющих всеми ресурсами системы: оперативной памятью, временем работы процессора, каналами обмена данными и периферийными устройствами, программными модулями

и др. Рассмотрим функции и состав ОС ЭВМ. ОС ЭВМ предназначена для автоматизации обработки данных в вычислительных системах, построенных на основе моделей ЭВМ. ЭВМ увеличивает пропускную способность вычислительной системы; уменьшает время реакции системы и повышает надежность ее функционирования. Это достигается благодаря непрерывной обработке потоков заданий, их размещению в системных очередях, предварительному планированию и инициированию выполнения очередных заданий.

Основными компонентами ОС ЭВМ являются управляющие и обрабатывающие программы.

Управляющие программы ОС ЭВМ. Управляют вычислительным процессом, реализуют функции управления задачами, заданиями и данными следят за выполнением обрабатывающих программ и прикладных программ, составленных пользователем.

Программа управления, задачами (супервизор) управляет всем ходом вычислительного процесса в ЭВМ и предназначена для наблюдения и управления всеми задачами в системе. Супервизор выделяет задачам необходимые ресурсы для их решения в одно- или мультипрограммном режиме.

В однопрограммном режиме образуется только одна задача, в рамках которой выполняются как программы ОС, так и программы пользователей, при этом все технические средства ЭВМ находятся в распоряжении этой задачи.

При необходимости одновременного решения нескольких не зависящих друг от друга задач супервизор реализует либо мультипрограммный режим, либо режим разделения времени. В этом случае супервизор производит переключение с решения одной задачи на решение другой, осуществляет динамическое распределение памяти и других ресурсов ЭВМ, обрабатывает через систему прерываний поступающие запросы.

Одновременное выполнение нескольких задач в мультипрограммном режиме достигается благодаря тому, что при их выполнении всегда возникают паузы, связанные с ожиданием завершения операции ввода и вывода, с истечением заданного интервала времени, с ожиданием дополнительных данных для продолжения выполнения программы и др. На период ожидания выполнение данной задачи откладывается и процессор переходит к выполнению следующей задачи и т. д. Для оператора эти программы выполняются одновременно, при этом ОС обеспечивает динамическое распределение памяти и возможность работы по приоритету со многими задачами и заданиями.

Программы управления заданиями (планировщик заданий и главный планировщик) выполняют функции планирования вычислительного процесса. Задание представляет собой внешнюю независимую единицу работы, выполняемой ОС. Задания состоят из пунктов или шагов, связанных между собой прямо или косвенно. Выполнение одного пункта задания это выполнение некоторой обрабатывающей программы.

Управление прохождением одного или нескольких заданий через вычислительную систему осуществляют программы управления заданиями. Планируя структуру задания, программист может использовать любые программы, которые включены в библиотеку ОС. Перед обработкой задание объединяется с другими, образуя один входной пакет заданий. Планировщик состоит из планировщика заданий и главного планировщика.

Планировщик заданий подготавливает задания для выполнения и планирует их выполнение последовательно или с учетом приоритетов. Главный планировщик устанавливает связь оператора с ОС, выводит сообщения на консоль оператора и вводит с консоли его команд.

Язык управления заданиями содержит девять типов операторов: задания (JOB), исполнительный (EXEC), описания данных (DD), командный, разделительный, пустой, процедуры (PROC), конца процедуры (PEND), комментариев. Эти операторы имеют соответствующие параметры, которые позволяют планировщику заданий регулировать выполнение заданий и пунктов заданий, отыскивать и размещать данные, распределять ресурсы ввода/ вывода, а главному планировщику — осуществлять связь с оператором вычислительной системы.

Программы управления данными предназначены для организации хранения, поиска данных и обмена данными между оперативной памятью и внешними устройствами.

Операционная система ЭВМ допускает четыре типа организации данных: последовательную, индексно-последовательную, прямую и библиотечную.

При последовательной организации наборов данных записи подвергаются обработке в порядке, совпадающем с их физической последовательностью на внешнем носителе информации.

Индексно-последовательная организация представляет возможность адресоваться непосредственно к записи без считывания предыдущих записей или без информации о расположении данной записи.

Прямая организация наборов данных допускает возможность произвольной обработки записей.

Наборы данных с библиотечной организацией состоят из последовательно организованных разделов, каждый из которых имеет свое имя.

Последовательные наборы данных могут быть организованы на любом внешнем носителе, а остальные вышеперечисленные способы организации наборов данных — только на устройствах прямого доступа (магнитных дисках или барабанах).

Все имеющиеся в системе наборы данных зарегистрированы в каталоге системы. Каталогизация позволяет обращаться к наборам данных только по имени, уменьшает степень ручного вмешательства в процессы идентификации и хранения информации, сводит к минимуму ошибки обслуживающего персонала. Каталог системы устроен подобно оглавлению библиотеки и расположен в устройствах прямого доступа.

Обрабатывающие программы. Служат для подготовки прикладных программ к исполнению на ЭВМ. Подготовка к исполнению включает в себя трансляцию исходной программы, ее редактирование и загрузку. К обрабатывающим программам относятся трансляторы с основных алгоритмических языков (ФОРТРАН, ПЛ/1, ПАСКАЛЬ, АЛГОЛ и др.), редактор связей, программы отладки и вспомогательные программы (утилиты).

Трансляторы предназначены для перевода текста исходных программ (модулей) на машинный язык, построения объектного модуля в форме, удобной для его последующей обработки, вывода на печать листингов исходных программ, а также диагностического сообщения о лексических, синтаксических и семантических ошибках.

Объектный модуль представляет собой последовательность машинных команд. Он не содержит стандартных подпрограмм, необходимых для работы программы пользователя. *Исходный модуль* в простейшем случае размещается на перфокартах, а объектный модуль и промежуточные наборы данных — на магнитных дисках.

Для организации машинной реализации к объектному модулю необходимо добавить недостающие стандартные программы. Эту работу называют *редактированием*, а соответствующую программу — *редактором связей* или просто *редактором*. Недостающие стандартные программы редактор связей берет из библиотеки стандартных подпрограмм. Редактор создает из объектного модуля и стан-

дартных подпрограмм *загрузочный модуль*, который может рассматриваться в качестве выполняемой машинной программы. Загрузка загрузочного модуля в оперативную память для непосредственного исполнения осуществляется программой выборки.

После получения загрузочного модуля происходит выполнение программы пользователя. В процессе выполнения программы ОС контролирует ее выполнение, а результаты контроля выводит на алфавитно-цифровое печатающее устройство. Взаимосвязь функционирования обрабатывающих программ в ОС ЭВМ представлена на рис. 8.33.

Управление цифровых образовательных технологий

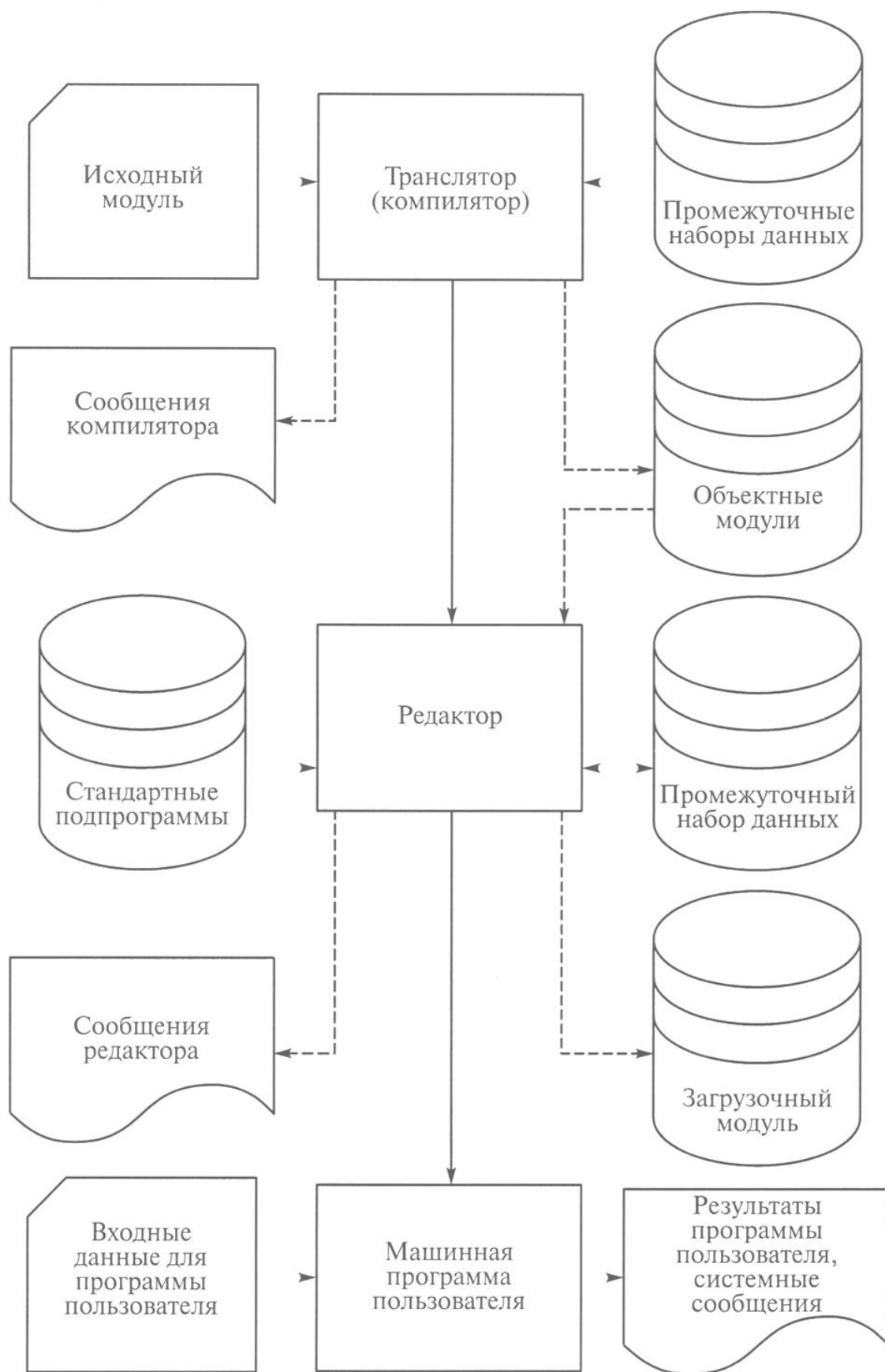


Рис. 8.33. Взаимосвязь функционирования обрабатывающих программ в ОС ЭВМ

К обрабатывающим программам относятся также программа сортировки-объединения для организации расположения информации во внешней памяти, программы-утилиты для преобразования набора данных и редактирования его записей, для копирования набора данных с носителя на носитель, перегруппировки записей и упорядочения массивов для распечатки сведений об имеющихся в библиотеках программах и данных и др.

Операционная система имеет модульную структуру, которая позволяет приспособлять систему к конкретным конфигурациям используемых технических средств. Процесс создания конкретной структуры ОС, учитывающей особенности конфигурации ЭВМ и задач потребителя, называют генерацией системы.

Функции и состав специального программного обеспечения. В состав программного обеспечения САПР входят пакеты прикладных программ (ППП), ориентированные на решение определенных задач проектирования и реализуемые как надстройка над ОС. Основу ППП составляет множество программных модулей, каждый из которых является программой реализации определенной проектной процедуры либо программой реализации некоторого алгоритма (или фрагмента алгоритма) проектирования.

Специальное ПО САПР может иметь собственную ОС или же использовать одну из базовых ОС ЭВМ. Программное обеспечение с собственной ОС имеет сложную структуру. В состав такого ПО входят универсальный или специализированный монитор САПР, организующий вычислительный процесс в соответствии с принятым алгоритмом проектирования; транслятор или интерпретатор с входного языка; набор программных модулей, составляющих тело ППП; набор обслуживающих программ и т. п. Типовая структура ПО САПР представлена на рис. 8.34.

Обращение к специальному ПО реализуется в форме запроса, который содержит требования к выполнению проектных процедур и исходные данные для проектирования. Последовательность подключения программных модулей для выполнения проектных процедур определяется *программой-монитором* САПР. Взаимосвязь отдельных программных модулей обеспечивает возможность организации сложных маршрутов проектирования.

Непосредственную реализацию проектных процедур производят с помощью *программных модулей*. Каждый программный модуль в свою очередь может разделяться на более мелкие модули. В подобной структуре должны быть четко опреде-

лены функции каждого программного модуля. Программы специального ПО группируются в ППП, каждый из которых проблемно ориентирован на обслуживание задач отдельных

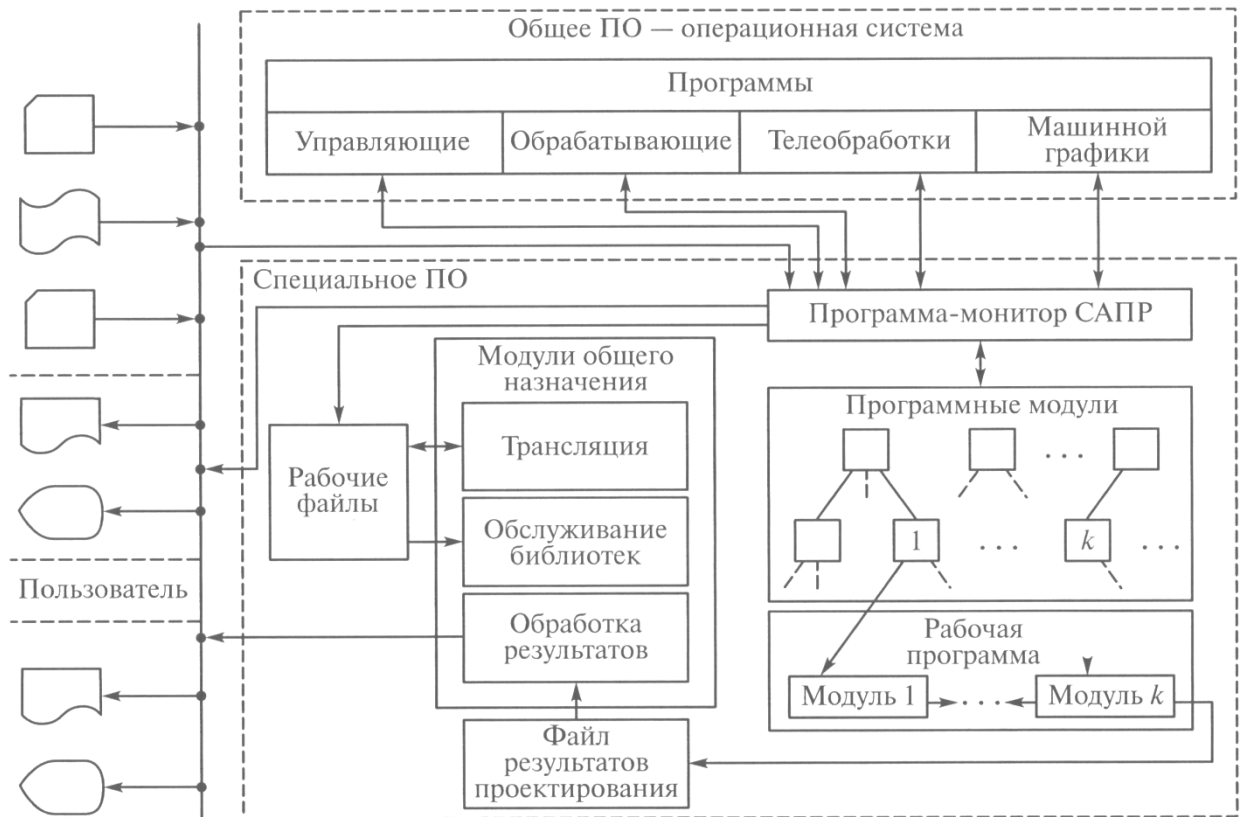


Рис. 8.34. Типовая структура ПО САПР

подсистем САПР. Поэтому в состав ППП входят как программные модули, ориентированные на реализацию узкоспециализированных проектных процедур и, как правило, создаваемые разработчиками конкретных САПР, так и модули общего назначения (оптимизации, математических моделей используемых элементов и т. п.). Модули общего назначения иногда называют *библиотечными модулями*.

В соответствии с алгоритмом проектирования для каждого нового объекта и маршрута его проектирования автоматически составляются рабочие программы. В зависимости от требований ТЗ и конкретных условий на каждом этапе разработки могут использоваться различные маршруты проектирования и соответственно различные рабочие программы.

Связь программных модулей осуществляется с помощью буферных файлов. В САПР используется два типа буферных файлов — рабочие и результатов проектирования. В рабочих файлах запоминается информация о структуре проектируе-

мого объекта, типе и параметрах составляющих его элементов, в файле результатов накапливаются результаты автоматизированного проектирования, которые после обработки документируются и выводятся на устройства отображения информации.

Модульная структура ПО САПР позволяет легко наращивать функциональные возможности системы путем расширения набора программных модулей и их модификаций, а также позволяет пользователю легко развивать систему.

Многообразие языков программирования, сложность проектных процедур и разнообразие вариантов маршрутов проектирования требуют концентрации усилий разработчиков специального ПО САПР. Цикл разработки программного обеспечения включает в себя: анализ требований, предъявляемых к САПР; определение точного описания функций и проектных процедур (спецификаций), реализуемых с помощью ПО; разработку алгоритмов реализации функций, проектных процедур; программных модулей с использованием алгоритмических языков высокого уровня и методов структурного программирования; тестирование программ; эксплуатацию и сопровождение.

На первом этапе разработки ПО определяются требования, выполнение которых позволяет получить требуемое решение поставленной проблемы. Анализ требований способствует лучшему пониманию проблемы и компромиссных ситуаций, что помогает выбору наилучшего решения.

На этапе определения спецификаций задаются структура входных и выходных данных, возможные типы проектных процедур и маршрутов проектирования. Чем детальнее разработаны проектные процедуры и маршруты проектирования, тем меньше вероятность возникновения ошибок и тем легче организовать информационный интерфейс между программными модулями.

При организации разработки ПО целесообразно структуру пакета прикладных программ разбивать на отдельные по возможности независимые части таким образом, чтобы ответственность за реализацию каждой такой части можно было возложить либо на одного разработчика, либо на группу. При этом для каждой части ППП должны быть сформулированы предъявляемые к ней требования: реализуемые проектные процедуры, размерность и др.

Проверку корректности ПО и его отладку производят на этапе тестирования. Тестирование подразделяют на три стадии: автономное, комплексное и системное. При автономном тестировании каждый программный модуль проверяют с помощью

данных, подготавливаемых программистом. Модуль, прошедший автономное тестирование, подвергают комплексному тестированию, при котором проверяют отдельные группы программных модулей. В результате комплексного тестирования возможно обнаружение ошибок, пропущенных при автономном тестировании. При системном тестировании испытывают ППП с помощью независимых тестов.

Практика разработки ПО показывает, что наибольшее число ошибок связано с разработкой информационного интерфейса. Большие трудности возникают при разработке интерфейса между программными модулями, написанными разными программистами. Поскольку число таких интерфейсов при N исполнителях составляет $N(N-1)/2$ и возрастает пропорционально квадрату числа исполнителей, проблема становится весьма сложной при разработке ПО группой из нескольких человек, так как взаимодействие программистов друг с другом снижает производительность их труда и требует дополнительных затрат на тестирование. Решение вопросов унификации и стандартизации должно быть основополагающим при разработке специального ПО САПР.

Мониторы и языковые процессоры. К наиболее сложным программам САПР относятся мониторы ППП и языковые процессоры.

Монитор — это управляющая программа диалогового взаимодействия пользователя с комплексом технических средств САПР. В функции монитора входит: управление работой программного канала обмена с периферийными устройствами; создание различных режимов работы комплекса технических средств и управление ими; загрузка абсолютных программ (загрузочных модулей, настроенных на конкретные адреса) и управление ходом их выполнения; выбор программных модулей в соответствии с маршрутом проектирования; настройка связей выбранных программных модулей; распределение памяти и т. д.

Языковые процессоры предназначены для преобразования информации, выраженной на входном языке, в рабочую программу. Они могут генерировать рабочую программу способами *компиляции* или *интерпретации*, их соответственно называют компиляторами и интерпретаторами.

Компилятор осуществляет лексический и синтаксический анализ для трансляции программы с языка высокого уровня, выполняет основную работу по составлению объектной программы — генерирует объектные модули и команды обращения к библиотечным модулям, а также формирует управляющие предложения для редактора связей относительно состава используемых объектных модулей для формирования загрузочного модуля.

3. Техническое обеспечение САПР

Организация технических средств САПР. Техническое обеспечение САПР совместно с ПО является инструментальной базой САПР, в среде которой реализуются другие виды обеспечения САПР.

Компоненты технического обеспечения САПР включают в себя средства вычислительной и организационной техники, средства передачи данных, измерительные и другие устройства или их сочетания, обеспечивающие функционирование САПР. Совокупность компонентов ТО образует комплекс технических средств САПР.

Требования к составу и структуре ТС формируются исходя из общих требований к структуре САПР; эффективного решения выделенного класса задач проектирования, активного включения пользователя в процесс проектирования; возможности работы с графическим материалом, включая процессы как ввода и обработки, так и вывода информации.

Классификация ТС САПР: ТС подготовки и ввода данных; передачи данных; программы обработки данных; архива проектных решений.

Логическая структура технических средств САПР приведена на рис. 8.35. Технические средства САПР объединены в группы взаимодействующего оборудования. Среди этих групп выделяют группы базовой конфигурации. *Базовая конфигурация* — это минимальный состав, позволяющий решать задачи определенного класса.

Существует ряд требований, которые необходимо учитывать при разработке базовых конфигураций: унификация проектных решений; построение развивающейся системы, предусматривающее наращивание и совершенствование компонентов технических средств; физическая совместимость, предусматривающая совместное функционирование всех компонентов комплекса; модульность конфигурации, требующая, чтобы компоненты системы были универсальными и типовыми; минимизация стоимости; согласованность основных параметров компонентов системы.

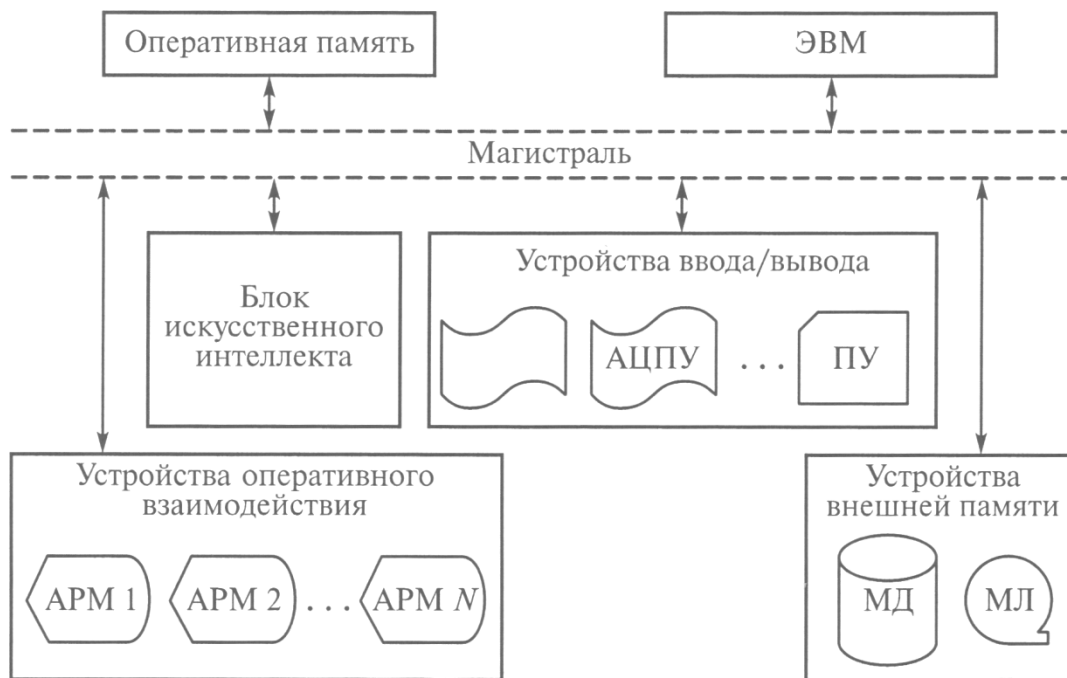


Рис. 8.35. Логическая структура технических средств САПР

Одним из основных компонентов базовых конфигураций является автоматизированное рабочее место. Серийно выпускаются комплексы АРМ-Р, АРМ-М, 15УТ-4-017 и др.

Комплекс АРМ-Р представляет собой совокупность технических и программных средств для организации проектирования радиоаппаратуры, а также для выполнения различных работ, связанных с вводом/выводом, редактированием графической и текстовой информации. Центральным элементом в комплексе является мини-ЭВМ (рис. 8.36), процессор которой связан с общей шиной, с периферийным оборудованием и оперативной памятью.

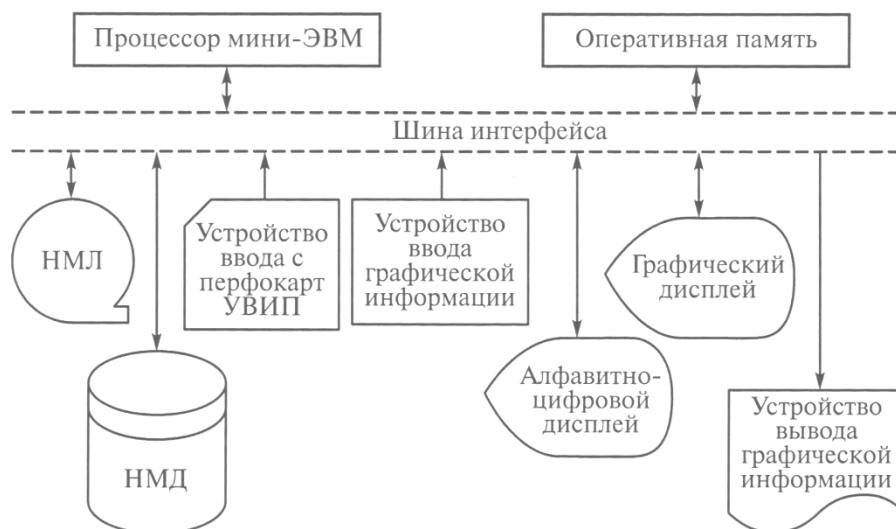


Рис. 8.36. Схема АРМ

Общесистемное программное обеспечение АРМ-Р в мультипрограммном режиме поддерживает различные конфигурации аппаратных средств комплекса, ввод/вывод графических данных, подготовку информации для дальнейшей передачи.

Для приближения пользователя к средствам САПР созданы диалоговые комплексы АРМ-2. Разработано несколько модификаций, где для программной обработки данных используют мини-ЭВМ. Комплекс АРМ-2.01 предназначен для разработки радиоэлектронной аппаратуры и машиностроительных объектов, позволяет осуществлять ввод графической и алфавитно-цифровой информации, ее редактирование, отображение и выпуск документации на машинных носителях. Одновременно могут работать восемь пользователей. Технические средства АРМ2-01 включают мини-ЭВМ, терминалы подготовки и ввода графических данных, экранные пульта, графопостроители. Базовое программное обеспечение позволяет описывать на проблемно-ориентированном языке, вводить в ЭВМ и редактировать графическую и текстовую информацию, вести диалог с ЭВМ, создавать на магнитных дисках архив результатов проектирования, выводить информацию на специальные устройства.

Комплексы АРМ-2.02 используют для проектирования деталей машиностроения, технологических процессов их изготовления; АРМ-2.03 — для создания управляющих программ для станков с числовым программным управлением и проектирования цифровой РЭА; АРМ-2.04 — для создания и редактирования программ и выпуска текстовой документации; АРМ2-05 — для отладки управляющих программ и микропрограмм, исследования их в реальном масштабе времени, занесения программ в постоянные запоминающие устройства ЭВМ с программируемой логикой работы.

В состав системы 15УТ-4-017 входят мини-ЭВМ, рабочие места, оборудованные кодировщиками, алфавитно-цифровые и графические дисплеи, координатографы. Система позволяет проектировать топологию БИС и редактировать информацию в интерактивном режиме. При этом анализируют и редактируют эскиз кристалла и топологию компонентов и кристалла, преобразовывают топологию кристалла в информацию для управления микрофотонаборной установкой. Программное обеспечение системы состоит из следующих блоков:

- системного обеспечения — включает в себя диспетчер системы и набор вспомогательных программ;

- программного обеспечения логического анализа и схемотехнического проектирования — позволяет описывать информацию о схеме и получать эскизы логических и принципиальных схем, автоматически формировать массивы связей и контроль содержащейся в них информации;
- программного обеспечения проектирования топологии и фотошаблонов — позволяет описывать совмещенный топологический чертеж, проектировать топологию в интерактивном режиме, проверять конструкторско-технологические ограничения, а также выводить фрагменты топологии на графопостроитель;
- программного обеспечения общего назначения — выполняет функции реализации директив пользователей и выводит конструкторско-технологическую документацию;
- средств развития программного обеспечения — позволяет совершенствовать программное обеспечение комплекса.

Состав ТС включает одну или несколько ЭВМ с возможностью создания иерархической структуры подключения технических средств нижнего уровня.

Организация ТС САПР предусматривает использование несколькими конструкторско-проектными организациями. В состав ТС входят высокопроизводительная аппаратура передачи данных (АПД) между частями комплекса и мощные вычислительные средства.

Для САПР крупных научно-производственных объединений предполагается применение сверхбольших систем ТС и сетей САПР коллективного пользования. Комплекс ТС таких САПР представляет собой единую вычислительную сеть, объединяющую территориально распределенные центры. Пользователь любого из функциональных уровней может увеличить вычислительную мощность своего уровня ТС за счет подключения его к одному из мощных вычислительных комплексов, содержащихся в этой сети, получить информацию, накопленную другими пользователями, использовать вычислительную технику сети для решения задач.

Развитие таких систем предъявляет повышенные требования к техническим средствам. Необходимо существенное увеличение емкости и уменьшение габаритов внешних накопителей, уменьшение времени выборки информации. Переход на оптические диски доведет емкость до 200 Гбайт на одну поверхность. Необходимо

улучшать характеристики терминалов. Намечается переход на графические терминалы со встроенными функциями обработки изображений, имеющие достаточно большую буферную память, модули для подключения к сетям передачи данных.

Для получения возможности подсоединения к сети различных машинных комплексов на всех уровнях необходимо включить в состав технических средств сетей специальные коммутаторы, комплектующие разнотипные ЭВМ.

Режимы работы технических средств САПР. Состав технических средств базовых конфигураций САПР различных уровней в значительной степени определяется характером проектных задач. Существует взаимосвязь между классом решаемых задач и режимом использования ЭВМ. Рассмотрим задачи, решаемые в САПР, с целью выделения характеристик, определяющих выбор различных режимов работы ЭВМ.

По характеру вычислительного процесса решаемые задачи можно разделить на две основные группы: задачи, решаемые без участия пользователя, и задачи, в процессе решения которых необходимо участие пользователя.

По сложности вычисления задачи бывают:

- *задачи первой группы* — задачи, на решение которых требуется более нескольких минут; задачи, время счета которых измеряется секундами;
- *задачи второй группы* — время взаимодействия с пользователем соизмеримо с временем счета задачи: время решения велико по сравнению со временем диалога.

По объему информации задачи, решаемые в САПР, можно разделить на монопольно использующие основную память ЭВМ и частично использующие основную память ЭВМ.

Исходя из этой классификации решаемых задач САПР, можно выделить следующие необходимые режимы работы технических средств:

I— однопрограммный режим, при котором решаемой задаче доступны все ресурсы ЭВМ;

II— мультипрограммный режим с фиксированным количеством задач; при таком режиме ОП ЭВМ делится на фиксированное число разделов, которые определены для выполнения одной задачи в каждом; некоторые внешние устройства (ВУ) могут быть назначены для использования несколькими задачами;

III— мультипрограммный режим с переменным числом задач, все ресурсы ЭВМ общие.

Режим работы технических средств можно классифицировать по удалению проектировщика от основного компонента технических средств:

- местный режим, при котором пользователь работает непосредственно у ЭВМ;
- дистанционный режим, при котором часть периферийного оборудования связана с процессором канала связи.

Режим работы технических средств можно классифицировать по степени участия пользователя в процессе решения задач:

- *пакетный режим*, когда пользователь составляет задание на выполнение программы, которое в составе пакета заданий запускается для обработки на ЭВМ. Обработка задач производится по очереди. После решения пользователю требуется проанализировать результаты обработки своего задания и подготовить новый вариант задания, что замедляет отладку и увеличивает время получения окончательных результатов;
- *режим разделения времени (RPB)*, при котором каждой решаемой задаче по очереди выделяется определенный квант времени работы процессора. Пользователь во время сеанса работы за абонентским пунктом, используя средства системы разделения времени (CPB), может составить, протранслировать, отредактировать программу и приступить к ее выполнению, непосредственно контролируя происходящий процесс. Степень готовности программы зависит от подготовленности пользователя к работе с CPB.

От выбора правильного режима использования технических средств САПР зависит эффективность эксплуатации технических средств. Поэтому при создании конкретной САПР определенного уровня необходимо провести четкий анализ решаемых задач.

Пакетный режим обработки информации предпочтительнее для задач с большим временем счета и задач, не требующих вмешательства в процесс решения пользователя.

Режим разделения времени удобнее для задач, время счета у которых соизмеримо с временем отклика пользователя на запрос ЭВМ, а также в том числе, когда необходимо вмешательство пользователя в процесс решения.

Технические средства машинной графики. Технические средства машинной графики можно классифицировать по следующим отличительным признакам: назначению, степени автоматизации, методу обработки информации, способу отсчета текущих координат. Указанная схема классификации показана на рис. 8.37.

Рассмотрим устройства графического ввода информации. Они позволяют увеличить производительность труда и повысить достоверность кодируемой информации. В полуавтоматических устройствах кодирование входной информации происходит при участии человека, который, перемещая регистрирующий орган, обходит последовательно все элементы графического документа. Перемещение регистрирующего органа фиксируется. Существуют дополнительные панели для ввода вспомогательной информации (клавиатура печатающего устройства). Представителями таких устройств являются устройства ЭМ-709, ГАРНИ, ПАСГИ, Calcomp, Benson, Aristo и др.

Полуавтоматические системы ввода графической информации могут сопрягаться с ЭВМ, которые выполняют автоматический контроль ошибок, допущенных оператором при считывании, позволяют выбирать фрагменты из библиотеки элементов и ранее введенных участков изображения, осуществляют оперативный вывод закодированной информации. Примерами таких систем служат системы QED и IED фирмы Quest Automation и системы Aristigrid фирмы Aristo.

Автоматические устройства ввода графической информации характеризуются значительным быстродействием и отсутствием несистематических ошибок, но для их работы требуются графические документы высокого качества и точности.

По методу считывания различают устройства непрерывного, дискретного и непрерывно-дискретного действия. Для графической информации большого объема желательно использовать дискретные устройства, обладающие более жесткими требованиями к точности.

В зависимости от способа отсчета текущих координат устройства ввода графической информации подразделяют на электромеханические, оптико-механические, магнитные, контактные и звуковые.

Примеры устройств ввода:

- 1) устройство магнитного типа, полуавтомат кодирования графической информации (ПКГИ — 0), входящий в состав АРМ-М. Полуавтомат позволяет кодировать элементы чертежа с указанием типа линий, символы 3 алфавитов числом 256 и произвольные кривые, чертежи с учетом смены системы координат;
- 2) устройство графического ввода FRED фирмы Quest Automation, состоящего из планшета с матрицей проводов, располо-



Рис. 8.37. Технические средства машинной графики

женных по координатным осям, устройства для цифрового отображения информации, передвижного пульта и ЭВМ NOVA. Задание положения точки определяется при касании щупом поверхности планшета.

Представителями группы устройств вывода графической информации являются чертежные автоматы, позволяющие получать документацию в виде чертежей, графиков, схем, диаграмм.

Классификацию чертежных автоматов можно провести по следующим признакам: способу программного управления; методу обработки данных; принципу действия исполнительного механизма. Классификация чертежных автоматов по этим признакам показана на рис. 8.38. Чертежные автоматы работают как в автономном режиме от машинных носителей информации, так и непосредственно от ЭВМ.

Чертежным автоматам присущи недостатки: невысокое быстродействие, недостаточная надежность. Поэтому прямое сопряжение их с ЭВМ не приводит к желательным результатам. Чертежные автоматы входят в комплекс периферийных устройств со своей малой ЭВМ, которая сопрягается с решающими устройствами. Одними из лучших представителей группы чертежных автоматов являются автоматы «Итекан-2М», «Итекан-3», «Итекан-4», «Итекан-6», различные по назначению,



Рис. 8.38. Классификация чертежных автоматов

программному управлению и конструктивному исполнению. Изображение вычерчивается цветными чернилами, тушью или карандашом на обычной бумаге или кальке линиями различной толщины. Размеры рабочего поля и максимальная скорость вычерчивания для автомата «Итекан-4» составляют 818х40000 мм и 40 мм/с.

К устройствам графического вывода информации можно отнести программно-управляемые координатографы, предназначенные для изготовления прецизионных фотооригиналов печатных плат, полосковых, микрополосковых линий и др. От чертежных автоматов координатографы отличаются повышенной точностью и способом нанесения изображений. Изображение наносится экспонированием, вырезанием, гравированием, скрайбированием и другими способами.

Программно-управляемые координатографы отличаются большими размерами рабочего поля. Управление осуществляется непосредственно через каналы связи или с помощью промежуточных носителей информации.

Координатограф предназначен для изготовления фотошаблонов микросхем и печатных плат. В состав координатографа входят: FS, пульт управления, координатный стол с размерами рабочего поля 1200х1200 мм, устройство управления с блоками ввода информации, операционное устройство, интерполятор, блоки задания скоростей, обработки информации, ориентации инструмента, технологических операций, управления приводом, цифровой индикации, а также центрального управления. Максимальная скорость перемещений на прямолинейных участках 90 мм/с, на дугах окружностей 25 мм/с.

Наиболее перспективный класс устройств ввода/вывода графической информации — алфавитно-цифровые и графические дисплеи. Скорость обмена информации этих устройств сравнима со скоростью обработки информации в ЭВМ, это обусловило их широкое применение.

Все дисплейные устройства можно классифицировать по следующим основным признакам: назначению и виду отображаемой информации; методу формирования изображения; физическим принципам создания информации. Один из возможных типов классификации дисплеев приведен на рис. 8.39.



Рис. 8.39. Классификация дисплеев

Алфавитно-цифровые дисплеи предназначены для обработки символьной информации. Их отличают высокая надежность и экономичность. Рассмотрим основные характеристики наиболее известных алфавитно-цифровых дисплеев.

Изображение знаков осуществляется векторным обходом луча по контуру знака. Графические дисплеи позволяют выводить на экран графические изображения, имеют широкий набор встроенных функций преобразования информации: сдвиг, масштабирование, поворот, редактирование и др.

Лекция

по теме 4.1.3. Системы автоматизированного управления

ВОПРОСЫ

1. Организация взаимодействия конструктора с ЭВМ.
2. Стадии создания САПР.

ЛИТЕРАТУРА

1. . Меньков А.В., Острейковский В.А. Теоретические основы автоматизированного управления. М.: ОНИКС, 2005. (с. 429-439).

1. Организация взаимодействия конструктора с ЭВМ

Основные тенденции развития САПР определяют преимущественное развитие интерактивных систем автоматизированного проектирования. Центральное место в таких системах занимает диалог «конструктор — ЭВМ». Организация диалога обеспечивается информационными, программными и техническими средствами САПР.

При выборе технических средств САПР, обеспечивающих интерактивное взаимодействие конструктора с процессом решения, среди возможных альтернатив следует руководствоваться следующим.

Используемая ЭВМ должна позволять организовать работу определенного числа пользователей (т. е. удовлетворять требованиям по производительности) в режиме разделения времени.

Используемое терминальное оборудование должно отвечать эргономическим, эстетическим требованиям и требованиям эффективности работы.

К терминальному оборудованию можно отнести следующие устройства: пультовую пишущую машинку, телетайп, алфавитно-цифровой и графический дисплей, акустические устройства.

Применение этих устройств обусловлено определенным классом решаемых задач в САПР. В настоящее время практически во всех применениях становится экономически невыгодным использование телетайпов и терминалов с посимвольным вводом/выводом информации. Дисплеи со страничной обработкой информации позволяют увеличить производительность работы проектировщика.

Применение графических дисплеев идет в направлении представления терминалов как автономных систем со специальными операционными системами управления работой отдельных аппаратных и программных компонентов терминала и взаимосвязью терминала с основной ЭВМ. Появление супермикроЭВМ, базиса автономного комплекса, приблизило по своим возможностям к мини-ЭВМ. Развитие комплексов идет по двум направлениям: разработки однопрограммных систем, рассчитанных только на одного пользователя, и мультипрограммных систем, рассчитанных на одновременную работу нескольких пользователей, с реализацией виртуальной памяти.

Для достижения высокой производительности систем, необходимой для одновременной работы многих пользователей и соединения функциональных блоков системы, используют различные каналы, объединяющие процессор, оперативную память, матричный процессор и различные источники информации.

Схема одного из автономных терминальных комплексов показана на рис 8.40. В графических терминалах для управления функционированием всех компонент применяют микропроцессоры; для обработки графической информации необходимы специализированные процессоры; к терминалу могут подключаться устройства памяти. В целом тенденции развития терминалов могут быть охарактеризованы как движение в сторону многофункциональных систем с распределенной обработкой информации, основанных на широком использовании БИС.

Диалоговые средства. Рассмотрим общие требования к диалоговым средствам (ДС), которые приобретают все больший вес в современных САПР. К *диалоговым средствам* САПР относят средства, обеспечивающие прямое (интерактивное) взаимодействие пользователя с КСАП, осуществляемое в реальном масштабе времени.

Диалоговый режим — это проектирование с применением ДС, при котором пользователь, взаимодействуя с КСАП, выдает инструкции управления проектированием. Диалоговые средства составляют часть КСАП и обеспечивают перевод САПР из пакетного режима в диалоговый. *Пакетный режим* — это проектирование при отсутствии ДС и непосредственного воздействия пользователя на процесс проектирования. В зависимости от вида представления данных ДС подразделяют на символьные, графические и смешанные. К символьным относят ДС, обеспечивающие представление данных в символьном (алфавитно-цифровом) виде, к графическим — ДС в графическом виде, а к смешанным — ДС как в графическом, так и в символьном виде. В зависимости от режима применения ДС САПР подразделяют на средства автономного, неавтономного и смешанного применения.

В состав ДС САПР входят:

- МО и ДО, содержащие инструкции и методики ведения диалогового режима, язык диалогового взаимодействия и язык внутреннего представления данных;
- ТО, в которое входят устройства ввода/вывода данных на электронных и других типах дисплеев, процессоры ЭВМ, устройства обмена данными;
- ПО, имеющие программы диалогового ввода и вывода данных, программы интерпретатора языка диалогового взаимодействия, программы управления процессом диалога, программы формирования результатов проектирования, программы вывода результатов на дисплей и их редактирование, программы взаимо-

действия с другими обслуживающими подсистемами САПР, программы регистрации процесса диалога и выдачи пользователю справок, инструкций, сообщений об ошибках;

— ИО, в которое входят БД для процесса диалога, БД для регистрации и корректировки результатов проектирования, библиотека типовых графических элементов, технических данных и параметров типовых элементов проектирования.

Рекомендуется предусматривать в составе ДС средства обучения и самообучения пользователя, а также адаптацию ДС по отношению к возможностям пользователя.

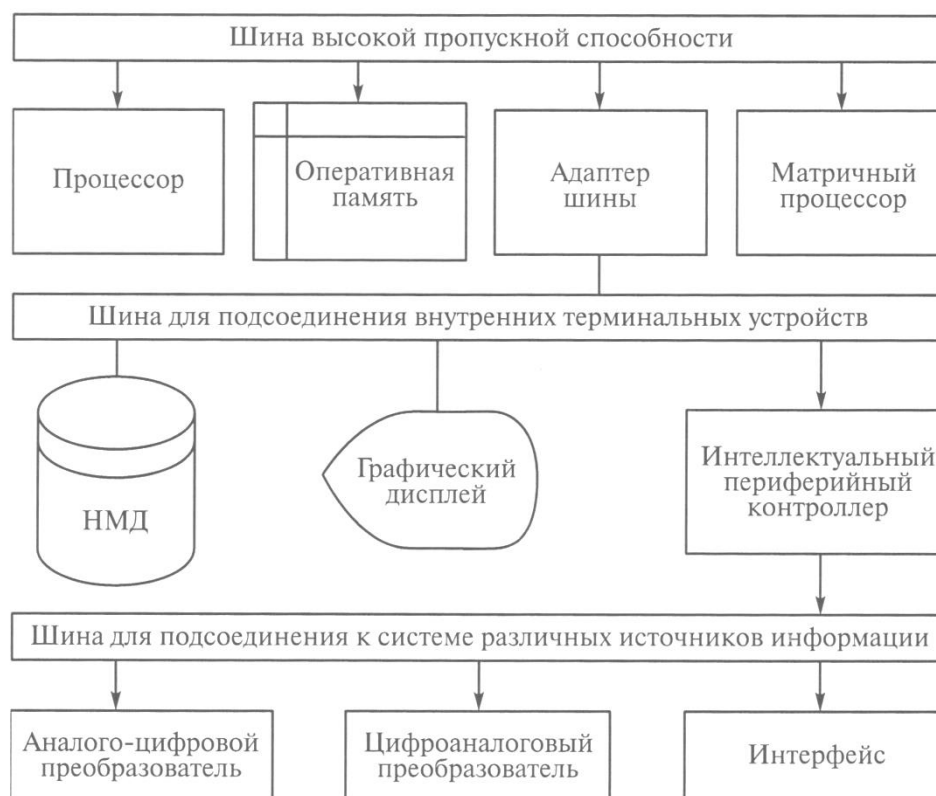


Рис. 8.40. Схема автономного терминального комплекса

Математическое обеспечение ДС САПР должно содержать оригинальные и типовые методы проектирования. Лингвистическое обеспечение ДС САПР базируется на естественных языках, общепринятых символьных и графических образах языков, оно должно быть инвариантным по отношению к ИО ДС САПР.

Технические ДС САПР обеспечивают ввод/вывод данных с использованием символьных и графических образов естественных языков. Технические ДС строят на основе серийно изготавливаемого периферийного оборудования ЭВМ, обеспечивающего ввод/вывод данных.

Программное обеспечение ДС САПР создают с использованием базового ПО средств вычислительной техники. Программное обеспечение ДС подразделяют на общее и специализированное.

Общее ПО ДС обеспечивает ввод и вывод информации на диалоговый терминал; выдачу пользователю справок, инструкций и сообщений об ошибках; регистрацию процесса диалога и управление им; адаптацию структуры диалога с учетом особенностей конкретного пользователя; управление базами данных и их защиту; редактирование и манипулирование данными; формальнологический контроль диалога; восстановление процесса диалога.

Специализированное ПО ДС обеспечивает трансляцию или интерпретацию входных сообщений; формирование информации пользователю о результатах проектирования; лексический контроль входных сообщений. Программное обеспечение ДС должно иметь модульную структуру и адаптироваться к изменению структуры и средств ведения диалога. Информационное обеспечение ДС САПР должно быть совместимым с ИО недиалоговых средств САПР. В него должны входить БД для управления процессом диалога и обеспечения режимов обучения и адаптации.

2. Стадии создания САПР

Различают внешнее и внутреннее проектирование (рис. 8.41).



Рис. 8.41. Стадии создания САПР

К внешнему проектированию относятся следующие стадии:

– *предпроектные исследования* — производится обследование проектной организации, оформление технического отчета, а также его согласование и утверждение;

– разработка, согласование и утверждение *технического задания* — выполняются совместно разработчиком и заказчиком.

К внутреннему проектированию относятся следующие стадии:

- разработка *технического предложения* — выбирают и обосновывают оптимальный вариант САПР. Производится разработка комплекта документации, а также согласование и утверждение технического предложения;
- *эскизный проект* — разрабатывают принципиальные решения по созданию САПР и документации, согласовывают и утверждают эскизный проект;
- *технический проект* — разрабатывают окончательные решения по созданию САПР и документации, согласовывают и утверждают технический проект;
- *рабочий проект* — разрабатывают рабочую документацию по САПР, согласовывают и утверждают рабочий проект;
- *изготовление, отладка и испытания* — изготавливают и отлаживают компоненты САПР, производят монтаж, наладку и испытание КСАП, осуществляют подготовку организации к вводу системы в действие;
- *ввод в действие* — производят опытное функционирование и приемочные испытания САПР.

Работы по подготовке организации к вводу в действие САПР, подсистем и компонентов должны производиться на всех стадиях ее создания. Перечисленные стадии САПР не всегда являются обязательными. Иногда они отсутствуют или объединяются в одну или несколько стадий в зависимости от конкретных требований на проектируемую САПР.

Рассмотрим более подробно основные стадии создания САПР. К работам на стадии предпроектных исследований (ПИ) относят обследование проектной организации, оценку возможности создания САПР, сбор данных, описание существующих САПР и их анализ, сбор предложений по созданию САПР, составу подсистем, разработке компонентов САПР, формирование технических требований к функциям и структуре САПР, видов обеспечения, общесистемных принципов создания САПР. Общее руководство ПИ осуществляет главный конструктор САПР. По окончании ПИ оформляется и утверждается научно-технический отчет.

Техническое задание является исходным и обязательным документом для создания, приемки или сдачи системы и должно содержать все исходные данные и требования, необходимые для создания САПР. Техническое задание на создание САПР разрабатывает организация — разработчик системы с учетом выполнения

предпроектных исследований на основе требований заказчика. Оно согласовывается с организацией — пользователем САПР и по необходимости с другими заинтересованными организациями. Техническое задание на создание САПР утверждает заказчик. Изменяют и уточняют утвержденное ТЗ в процессе создания подсистемы с помощью дополнений в порядке, установленном в ТЗ. Полное ТЗ на создание САПР ЭВА должно содержать следующие разделы:

- наименование и область применения — указаны полное или условное наименование (индекс) САПР, краткая характеристика области ее применения;
- основание для создания — указаны полное наименование директивных документов, на основании которых создают САПР, организация, утвердившая эти документы, и дата утверждения, а также наименование или условное обозначение темы, в рамках которой создается САПР;
- характеристика объектов проектирования — даны сведения о назначении, составе, условиях применения разрабатываемого объекта;
- цель и назначение — указаны цель создания САПР, ее назначение и критерий эффективности ее функционирования;
- характеристика процесса проектирования — приведены общее описание процесса проектирования, требования к входным и выходным данным, а также требования по разделению проектных процедур, выполняемых при автоматизированном и неавтоматизированном проектировании;
- требования к САПР — приведены требования к САПР в целом, к составу ее подсистем, к включению в САПР ранее созданных подсистем и компонентов, требования к взаимосвязи САПР с другими системами (например, с АСУ, АСУТП), видам обеспечения и возможности развития САПР;
- технико-экономические показатели — оценены затраты на создание САПР, источники экономии, ожидаемая эффективность от применения САПР, требования к технико-экономическим показателям объекта, которые будут достигнуты в результате функционирования САПР;
- стадии и этапы — установлены необходимые стадии создания, очередность ввода в действие САПР, этапы по стадиям, сроки выполнения работ и исполнители, перечень документации, предъявляемой по окончании стадии, объемы работ в соответствии с действующими нормативно-техническими и методическими документами;

- порядок испытаний и ввода в действие — определены требования к проведению испытаний и вводу в действие САПР и их подсистем;
- источники разработки — даны перечень научно-исследовательских, опытно-конструкторских и экспериментальных работ, нормативных документов, методических материалов и т. п., используемых при создании САПР;
- приложения — включают таблицы, схемы, расчеты, библиографию, листинги программ, обоснования, доказательства и т. п.

Техническое задание на создание САПР оформляют в соответствии с общими требованиями к текстовым документам.

Целью технического предложения (ТП) является выбор рациональных вариантов САПР, учитывающих требования ТЗ. При разработке ТП выполняются следующие работы: анализ процессов автоматизированного проектирования; выявление возможных вариантов структуры для САПР на основе разработки модулей, реализующих процессы проектирования; выбор рациональных вариантов (варианта) структуры САПР; технико-экономическое обоснование выбранного варианта; составление дополнительных по сравнению с ТЗ требований к САПР; уточнение требований к содержанию работ на последующих стадиях САПР.

Техническое предложение разрабатывает организация, являющаяся главным разработчиком системы, его согласовывают с заказчиком и со всеми заинтересованными организациями. Техническое предложение на создание САПР должно содержать следующие разделы:

- общие положения — цель разработки ТП, наименование и дата утверждения ТЗ; назначение и область применения — назначение, характеристика, область и условия применения создаваемой САПР; описание объекта проектирования в САПР — основные составные элементы объектов проектирования, их взаимосвязь, схема деления; описание процесса автоматизированного проектирования — результаты анализа процесса АП; характеристика и анализ вариантов структуры САПР — результаты синтеза и анализа структуры САПР с выделением подсистем и компонентов и связей между ними, предложения по использованию существующих подсистем и компонентов САПР;
- обоснование и описание выбранного варианта — по результатам рассмотрения вариантов структуры САПР обосновывается и описывается выбранный вариант САПР с указанием взаимодействия подсистем и компонентов и выполняемых ими функций;

Управление цифровых образовательных технологий

- технико-экономическое обоснование — основные технико-экономические показатели создаваемой САПР;
- предложения по содержанию и организации работ на последующих стадиях — уточненные по сравнению с ТЗ данные по очередности и содержанию работ.

Техническое предложение может иметь по необходимости дополнительные разделы и приложения. В последних приводят схемы, описания, расчеты, необходимые для качественного обоснования выбранного варианта САПР.

На стадии эскизного проекта выполняют:

- ✚ принятие основных решений по взаимодействию САПР с другими системами;
- ✚ принятие основных технических решений по структуре подсистем САПР, разработку вопросов функционирования подсистем на уровне компонентов;
- ✚ описание исходных данных и требований на разработку языков проектирования, алгоритмов, компонентов И О по подсистемам;
- ✚ оформление и утверждение эскизного проекта.

На стадии технического проекта выполняют: принятие решений по новому процессу проектирования с обеспечением взаимодействия и совместимости автоматических и автоматизированных процедур, получение окончательной схемы функционирования САПР в целом; разработку структуры и состава подсистем САПР; получение окончательной структуры всех видов обеспечения САПР; выбор математических моделей объекта проектирования и его элементов; разработку алгоритмов проектных операций; разработку требований на создание программ реализации процедур проектирования; разработку алгоритмов, языков проектирования, компонентов ИО, формирование общесистемного программного обеспечения; расчет производительности и выбор режимов работы средств технического обеспечения; определение требований к представлению исходных данных, результатов проектирования и проектных документов; оформление и утверждение совокупности документов, составляющих технический проект.

Технический проект включает в себя следующие основные документы: ведомость; пояснительную записку; схемы процессов проектирования, подсистем и средств обеспечения, спецификации компонентов всех видов обеспечения; смету затрат на создание САПР; ТЗ на разработку соисполнителями по отдельным компонентам; расчет ожидаемых технико-экономических показателей.

Рабочий проект (РП) создается на основании технического проекта организацией — разработчиком САПР.

Управление цифровых образовательных технологий

На стадии РП проводят: разработку детальной структуры САПР, ее подсистем, взаимосвязи с другими системами и ее уточнение; построение алгоритмов и структурных схем автоматизированных процессов проектирования; формирование МО, ПО, ИО, ОО; разработку документации для монтажа, настройки и эксплуатации КСАП; создание проектов программ и методик испытаний и опытной эксплуатации; оформление и утверждение.

Результатом работ на этой стадии являются документ «Рабочий проект» и комплект эксплуатационных документов.

Рабочий проект содержит:

- ✚ ведомость РП; пояснительную записку; спецификацию — перечислены подсистемы, спецификации видов обеспечения; документацию технического обеспечения - приведены спецификация, комплект конструкторских документов;
- ✚ документацию И О — включены спецификация, описание базы данных, инструкция по ее заполнению, инструкция по введению массивов данных;
- ✚ документацию ПО — приведены спецификация, тексты программ, описание программ, порядок и методика испытаний;
- ✚ документацию МО, МТО, ЛО — содержит спецификацию, пояснительную записку, описание языка, подсистемы управления САПР;
- ✚ документацию ОО - даны спецификация, программа подготовки специалистов пользователей САПР, положение о службе САПР;
- ✚ программу и методику испытаний КСАП — содержит технические данные, подлежащие проверке при испытании компонентов САПР, порядок испытаний и методы их контроля;
- ✚ программу и методику опытного функционирования системы и подсистем — приведены данные, обеспечивающие получение и проверку проектных решений, выявление причин сбоев, показателей качества функционирования системы и подсистем;
- ✚ комплект эксплуатационных документов — содержит МТО, ТО, ПО и ведомость эксплуатационных документов.

Изготовление, отладку и испытания САПР проводят на основании документации РП. Они должны обеспечивать бесперебойную работу подсистем действующей САПР.

На стадии изготовления, отладки и испытаний выполняют: подготовку организации к вводу в действие САПР, включая обучение пользователей; изготовление

и отладку компонентов ТО, ПО и ИО на машинных носителях; монтаж, отладку и испытания КСАП для САПР и всех ее подсистем; организацию работ по оформлению и утверждению актов сдачи компонентов и КСАП.

Работы на стадии ввода в действие САПР предназначены для обеспечения возможности промышленного функционирования САПР и определения технико-экономических показателей системы. На этой стадии проводят опытное функционирование, приемочные испытания, корректировку, доработку и выпуск эксплуатационных документов, промышленную эксплуатацию и развитие САПР.

Опытное функционирование САПР предполагает проверку работоспособности и взаимодействия подразделений организации с подсистемами САПР, выявление неисправностей и отказов, определение фактических технико-экономических показателей системы и корректировку документации, устранение дефектов, оформление протокола.

Приемочные испытания включают в себя оценку качества разработки КСАП, проверку готовности организации к промышленному функционированию САПР, оценку качества опытного функционирования, проверку документации на САПР. Работа оканчивается вводом в действие системы, оформлением и утверждением протокола опытного функционирования и акта приемки САПР в промышленное функционирование.

Промышленную эксплуатацию выполняет служба САПР. Проектная организация для определения соответствия научно-техническому уровню проводит периодические испытания САПР. При этом оформляют заключение о соответствии подсистем и компонентов действующей САПР современным требованиям, определяют оценку эффективности и качества продукции, полученной с помощью САПР, записывают рекомендации о разработке или модернизации подсистем и компонентов проверяемой САПР.

Развитие САПР ведут путем модернизации подсистем, компонентов и средств обеспечения, а также ввода в эксплуатацию новых подсистем и компонентов.

Лекция

по теме №4.2.1. Приборы контроля и управления технологическими процессами

ВОПРОСЫ

1. Состав приборов контроля (п.1.1-1.8 [1]).
2. Функциональные устройства систем автоматизации (п.1.9 [1]).
3. Исполнительные механизмы (1.10 [1]).
4. Приборы учета энергоносителей (п.1.11 [1]).

ЛИТЕРАТУРА

1. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Профессия, 2009. – 592 с. (с.9-168).

1. Состав приборов контроля (п.1.1-1.8 [1])

1.1. Приборы для измерения температуры:

- 1.1.1. Контактные датчики (термопары и термометры сопротивления с унифицированным выходным сигналом);
- 1.1.2. Неконтактные датчики температуры (пирометры излучений);
- 1.1.3. Регуляторы температуры прямого действия.

1.2. Приборы для измерения расхода:

- 1.2.1. Электромагнитные (магнито-индукционные) расходомеры;
- 1.2.2. Ультразвуковые расходомеры;
- 1.2.3. Кориолисовы расходомеры.

1.3. Приборы для измерения давления:

- Распределительные устройства для передачи давления.

1.4. Приборы для измерения уровня:

- 1.4.1. Поплавковые уровнемеры;
- 1.4.2. Гидростатические уровнемеры.
- 1.4.3. Ультразвуковые уровнемеры;
- 1.4.4. Радарные (микроволновые) уровнемеры;
- 1.4.5. Емкостные уровнемеры;
- 1.4.6. Сигнализаторы уровня;
- 1.4.7. Измерение уровня раздела фаз.

1.5. Анализаторы состава и свойств веществ:

- 1.5.1. Газоанализаторы:
 - 1.5.1.1. Термокондуктометрические;
 - 1.5.1.2. Терромагнитные;

- 1.5.1.3. Термохимические;
- 1.5.1.4. Электрохимические;
- 1.5.1.5. Оптико-абсорбционные;
- 1.5.1.6. Плазменно-ионизационные;
- 1.5.1.7. Хроматографы;
- 1.5.1.8. Влагомеры (гигрометры).

1.5.2. Анализаторы жидкости:

- 1.5.2.1. Кондуктометры;
- 1.5.2.2. pH-метры;
- 1.5.2.3. Измерение мутности растворов. Нефелометры;
- 1.5.2.4. Плотнометры жидких сред;
- 1.5.2.5. Вискозиметры.

1.5.3. Спектроскопия. Промышленные спектрометры:

- 1.5.3.1. Спектроскопия;
- 1.5.3.2. Спектрометры;
- 1.5.3.3. Масс-спектрометры.

1.6. Весоизмерительная техника:

- 1.6.1. Весоизмерительное и дозирующее оборудование;
- 1.6.2. Тензометрические датчики веса (тензодатчики).

1.7. Бесконтактные выключатели (сенсоры):

- 1.7.1. Индуктивные;
- 1.7.2. Емкостные;
- 1.7.3. Магниточувствительные;
- 1.7.4. Оптические;
- 1.7.5. Люминисцентные датчики;
- 1.7.6. Видеодатчики.

1.8. Показывающие и регистрирующие приборы:

- 1.8.1. Показывающие аналоговые и цифровые приборы;
- 1.8.2. Регистрирующие приборы;
- 1.8.3. Безбумажные самописцы.

2. Функциональные устройства систем автоматизации (п.1.9 [1])

1.9.1. Нормирующие преобразователи

Нормирующие преобразователи неунифицированных входных сигналов в нормированные выходные сигналы широко используются в системах автоматизации.

Входными сигналами нормирующих преобразователей являются сигналы термопар, термометров сопротивления, дифференциально-трансформаторных и ферродинамических датчиков, датчиков давления, расхода и др.

Выходными сигналами измерительных (нормирующих) преобразователей являются сигналы постоянного тока 0...5 мА, 0/4...20 мА, а также сигналы напряжения 0...5 В, 0...10 В, -5...+5 В или -10...+10 В.

По числу преобразуемых входных или выходных сигналов преобразователи делятся на одноканальные и многоканальные, а по условиям эксплуатации на преобразователи в общепромышленном и взрывозащищенном исполнении. Используемый вид взрывозащиты — «искробезопасная электрическая цепь» уровня «ia» в соответствии с ГОСТ Р 51330.0-99. По зависимости выходного сигнала от входного преобразователи могут быть с линейной или нелинейной зависимостью, а по связи между входными и выходными цепями — с гальванической связью или без нее. Ряд преобразователей имеют ЖК-дисплей для индикации значений преобразуемого параметра.

В табл. 1.58 приведены технические характеристики некоторых нормирующих преобразователей отечественного производства.

Таблица 1.58. Технические характеристики некоторых нормирующих преобразователей

Модель	Тип первичного преобразователя	Число каналов преобразования	Погрешность преобразования, %	Выходной сигнал	Напряжение питания, В	Габаритные размеры, мм
ИПИМ 0104Ех НПП «Элемер»	ТС: 50М, 100М, 50П, 100П, Pt100; ТП: L, K	2	±0,5%	0...5 мА, 4...20 мА	24 VDC	78,5×22,5×60,5
НП-02 ГП «Метран»	ТС: 50М, 100М, 50П, 100П; ТП: L, K, S, B	1	±0,5%	0...5 мА, 4...20 мА	220 VAC	72×144×180
Ш 9322А-2 ГП «Метран»	ТП: L, K, S, B, А-1, А-2, А-3	2	±0,5%	0...5 мА, 4...20 мА	220 VAC	60×160×350
ИПИМ 0196/М1 ГК «Метран»	ТС: 50М, 100М, 50П, 100П, Pt100; ТП: L, K, А	2	±0,5%	0...5 мА, 4...20 мА	24 VDC	23×75×125
ИП-Т10 ОАО «ЗЭиМ»	ТП: L, K, S, B, А-1, А-2, А-3; ТС: 50М, 100М, 10П, 50П, 100П;	1	±0,5%	0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА, 0...10 В	24 VDC; 220 VAC	40×172×162
НП-П10 ОАО «ЗЭиМ»	0...10, -10...0...10 мГц	1	±1,0%	0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА	220 VAC	80×170×162
НП-Н10 ОАО «ЗЭиМ»	0,1...10 кОм	1	±0,5%	4...20 мА	24 VDC через БП24	40×172×162
НП-Р10 ОАО «ЗЭиМ»	До 150 мВ	1	±0,5%		24 VDC через БП24	

Преобразователи имеют возможность перестройки диапазона измерения параметра, а также типа НСХ (например, 50М на 100М, 50П на 100П или Pt100). Крепление нормирующих преобразователей в основном осуществляется на DIN-рейку.

1.9.2 Функциональные блоки

Функциональные блоки служат для выполнения определенных математических и др. функций с входными и выходными сигналами — сложение, умножение, деление, возведение в квадрат, извлечение квадратного корня, сравнение с заданием, интегрирование и др. К функциональным блокам относят также блоки питания. Некоторые блоки питания имеют функцию корнеизвлечения.

Входными сигналами функциональных блоков являются сигналы постоянного тока 0...5, 0...20, 4...20 мА, 0...10В, сигналы от термопар, термометров сопротивления и дифференциально-трансформаторных датчиков.

В табл. 1.59 представлены технические характеристики функциональных блоков.

Таблица 1.59. Технические характеристики функциональных устройств.

Тип	Основная функция
Блок интегрирующего датчика БЗИ (ОАО «ЗЭиМ»)	Преобразование интеграла в унифицированный сигнал постоянного тока; ограничение выходного сигнала и сигнализация при достижении
Блок динамической связи БДС (ОАО «ЗЭиМ»)	Алгебраическое суммирование до 4-х унифицированных сигналов, демпфирование и динамическое преобразование выходного сигнала
Блок суммирования и сигнализации БСС (ОАО «ЗЭиМ»)	Алгебраическое суммирование до 3-х унифицированных сигналов постоянного тока, введение сигнала от датчика, демпфирование выходного сигнала и формирование выходного релейного сигнала
Блок суммирования и демпфирования БСД ОАО «ЗЭиМ»	Алгебраическое суммирование до 4-х унифицированных сигналов постоянного тока, сравнение их с сигналом задания, демпфирование суммы
Блок нелинейных преобразований БНП-2 (ОАО «ЗЭиМ»)	Демпфирование и нелинейное преобразование входного аналогового сигнала, аппроксимированного кусочно-линейным методом
Блок селектирования БСЛ-2 ОАО «ЗЭиМ»	Прием до 4-х унифицированных сигналов с гальваническим разделением и выходом, масштабирование, демпфирование и выделение наибольшего или наименьшего сигнала
Блок вычислительных операций БВО2 (ОАО «ЗЭиМ»)	Алгебраическое суммирование по каждому входу унифицированных сигналов с масштабированием, гальваническим разделением; демпфирование результирующего сигнала; проведение между результирующими сигналами одной из операций: сложение, умножение, деление, возведение в квадрат, извлечение квадратного корня
Блок питания и корнеизвлечения МЕТРАН-611 (ГП «Метран»)	Питание стабилизированным напряжением 24 и 36 VDC датчиков с унифицированным токовым выходным сигналом и функционального преобразования этого сигнала с корнеизвлекающей зависимостью (число каналов-1)
Блок питания БП КАРАТ-22 (ГП «Метран»)	Преобразование напряжения 220 VAC в стабилизированное напряжение 24 или 36 VDC (1, 2, 4 или 8 каналов)
Блок питания БПД-40-Ех (ГП «Метран»)	Питание стабилизированным напряжением датчиков с унифицированным выходным токовым сигналом 4...20 мА и с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» (число каналов 1 или 2)
Блок питания БП96 (ГП «Метран»)	Питание стабилизированным напряжением 24 или 36 VDC датчиков с унифицированным выходным токовым сигналом 4...20 мА (число каналов от 1 до 4-х)

Блоки питания с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» имеют встроенные барьеры искрозащиты. Питание функциональных блоков 220 VAC, габаритные размеры 80x160x537 мм. Корпуса приборов предназначены для щитового монтажа.

1.9.3 Барьеры искрозащиты

Барьеры искрозащиты служат для обеспечения искробезопасности электрических цепей датчиков температуры, давления и др. измерительных преобразователей в системах измерения, сигнализации и регулирования, находящихся во взрыво- и пожароопасных зонах производств различных отраслей промышленности (химической, нефтехимической, нефтегазовой и др.).

Барьеры искрозащиты в зависимости от типа имеют входные или выходные искробезопасные электрические цепи, выполненные с уровнем взрывозащиты по

ГОСТ Р 51330.10-99 «ib» — взрывозащищенный или «ia» — особо взрывозащищенный. Все барьеры устанавливаются вне взрывоопасной зоны и относятся к неразборным изделиям.

В «Правилах устройств электроустановок» (ПУЭ) взрывоопасная зона — это помещение или ограниченное пространство в помещении, в которых имеются или могут образоваться взрывоопасные смеси.

Вид взрывозащиты основан на ограничении энергии искрообразования. Допустимые параметры цепи: максимальное напряжение разомкнутой цепи до 30 В, ток к.з. до 100 мА, допустимая мощность до 0,45 Вт.

Барьеры искрозащиты могут быть активными и пассивными. Активные барьеры обеспечивают искробезопасность и питание датчиков с унифицированными выходными сигналами, электропневматических преобразователей и др. устройств. Напряжение питания активных барьеров составляет величину $36 \pm 3,6$ VDC или $24 \pm 0,5$ VDC. Погрешность преобразования активных барьеров $\pm(0,1..0,2)\%$.

Пассивные барьеры обеспечивают искробезопасность датчиков и др. измерительных преобразователей, не имеющих собственных источников питания (например, электропневматических преобразователей, позиционеров, термопар и термометров сопротивления в обычном исполнении).

В блоках искрозащиты на стабилитронах (БИС) применяются защищенные плавкими предохранителями стабилитроны для ограничения напряжения шунтированием аварийного тока на землю. Барьеры состоят из шунтирующих стабилитронов и последовательно включенных резисторов или резисторов и сменных предохранителей. Искрозащитные элементы обеспечивают искробезопасность электрических цепей посредством ограничения энергии. В нормальном режиме напряжение пробоя стабилитронов не превышает определенного значения и стабилитрон не пропускает ток. При превышении напряжения пробоя в случае аварии стабилитрон переходит в режим стабилизации с увеличением протекающего через него тока. При дальнейшем увеличении тока срабатывает предохранитель, предотвращая передачу критической электрической мощности во взрывоопасную зону.

На рис. 1.84 показана электрическая схема барьера искрозащиты на стабилитронах [1.108], а на рис. 1.85 принципиальная схема соединений 2-канального барьера искрозащиты БИЗ 9712 фирмы "Сенсорика".

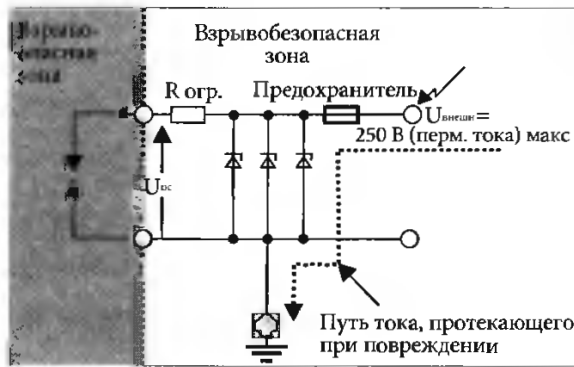


Рис. 1.84

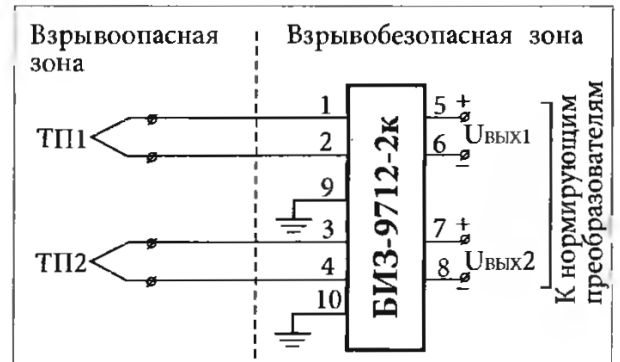


Рис. 1.85

В активных барьерах искрозащиты с гальванической развязкой источник сигнала передается или принимается из взрывоопасной зоны через изолированный тракт (чаще оптрон). Так, в активных барьерах серии Корунд-М500 гальваническое разделение сигнальных цепей входа и выхода происходит благодаря преобразованию входного сигнала постоянного тока в частоту следования импульсов и передачи их через оптрон с последующим восстановлением уровня постоянного тока. На рис. 1.86 приведена принципиальная электрическая схема активного барьера искрозащиты КОРУНД-М510.

Это допускает возможность заземления первичного преобразователя. Для уменьшения вероятности возникновения взрывоопасной ситуации при заземлении необходимо следить, чтобы только одна точка цепи была заземлена, а другая должна быть изолирована от земли (напряжение пробоя не менее 500 В.).

Заземление барьера искрозащиты достигается установкой его на DIN-рельс. Кроме того, обычно имеется одна клемма для заземления проводом. Устройства, установленные во взрывоопасной зоне (измерительные преобразователи, клапаны и др.) должны быть изолированы от земли. Если необходимо их заземление, то используются барьеры искрозащиты с гальванической изоляцией.

В табл. 1.60 приведены технические характеристики барьеров искрозащиты отечественных производителей

Таблица 1.60. Технические характеристики барьеров искрозащиты

Тип	Назначение	Напряжение питания, VDC	Габаритные размеры, мм
1	2	3	4
НПФ «Сенсорика»			
БИЗ-9712-А1 БИЗ-9712-А2	Активный одноканальный барьер для питания 2-проводных датчиков с выходным сигналом 4...20 мА	24 ; 36	120×75×19
БИЗ-9712-А3 БИЗ-9712-А5	Активный одноканальный барьер для управления электропневматическим клапаном Активный одноканальный барьер для управления электроконтактными датчиками		
ГК «Метран»			
РИФ-А1 РИФ-А2 РИФ-А3 РИФ-А4	Активный одноканальный барьер для питания 2-проводных датчиков с выходным сигналом 4...20 мА Активный одноканальный барьер для управления электропневматическими преобразователями и электропневмопозиционерами во взрывоопасных зонах	24 36 36 36	105×73×20
РИФ-А5 РИФ-А6	Активный одноканальный барьер для обеспечения искробезопасности цепей систем сигнализации и управления с электроконтактными датчиками во взрывоопасных зонах	24 24	
РИФ-А7	Активный одноканальный барьер для питания потенциометрических и реостатных датчиков во взрывоопасных зонах и преобразования их выходного сигнала в сигнал 0...5, 0/4...20 мА	36	105×73×20

1	2	3	4
«СТЭНЛИ»			
Корунд-М1	Активный одноканальный барьер для питания 2-х проводных датчиков с выходным сигналом 4...20 мА	24	105×73×20
Корунд-М11	Активный одноканальный барьер для питания пониженным напряжением (до 12 В) 2-проводных датчиков с выходным сигналом 4...20 мА и тензопреобразователей	12	
Корунд-М3	Пассивный 2-канальный барьер для обеспечения искробезопасности датчиков, не содержащих собственных источников электропитания (электропневматические преобразователи, позиционеры, термодары и др.)	12,8	
Корунд-М* DIN	Барьеры искрозащиты в корпусах для установки на DIN-рейль со сменными предохранителями	—	
Корунд-М510	Активный одноканальный барьер с гальванической изоляцией для подключения датчиков, не содержащих собственных источников электропитания (электропневматические преобразователи, позиционеры и др.) с входным сигналом 4...20 мА, подключаемых по 2-проводной схеме	24	
Корунд-М560	Активный одноканальный барьер с гальванической изоляцией для питания и искрозащиты датчиков с выходным сигналом 4...20 мА, подключаемых по 2-проводной схеме. Выходной сигнал барьера по стандарту RS-485	24 VDC	
ООО «Ленпромавтоматика»			
БИ-001	Пассивный одноканальный барьер искрозащиты цепей термодар и 3-проводного подключения терморезисторов	1	114×99×17
БИ-002	Активный одноканальный барьер для питания 2-проводных датчиков с выходным сигналом 4...20 мА	36	
БИ-003	Пассивный одноканальный барьер искрозащиты цепей термодар и 4-проводного подключения терморезисторов	1	
БИ-005	Активный одноканальный барьер для обеспечения искробезопасности цепей систем сигнализации и управления с дискретными датчиками во взрывоопасных зонах	12	
БИА-101	Активный одноканальный барьер с гальванической изоляцией для обеспечения искробезопасности и питания датчиков с выходным сигналом 0/4...20 мА, преобразования в выходной сигнал 0/1...5 В	24	
НПО «ОВЕН»			
ИСКРА-ТС.01	Пассивный одноканальный барьер искрозащиты для подключения терморезисторов типа ТСМ/ТСП;	9	98×82×22
ИСКРА-АТ.01	Пассивный одноканальный барьер искрозащиты для подключения датчиков с выходным сигналом 0...5 мА, 0/4...20 мА;	30	
ИСКРА-ТП.01	Пассивный одноканальный барьер искрозащиты для подключения термодар и датчиков с выходным сигналом -1...+1 В;	6	

На рис. 1.87 представлен общий вид барьера искрозащиты Искра ТС.01 производства НПО «Овен».

Барьеры искрозащиты выпускаются рядом зарубежных фирм, среди которых, прежде всего, следует отметить фирму **Eicon Instruments** (Италия), входящую с 2001 г. в состав группы компаний **Pepperl+Fuchs** (Германия). Фирма выпускает

барьеры искрозащиты с гальванической развязкой серии K, серий HiD 2000 и HiD 3000, барьеры искрозащиты на стабилитронах серии Z.

В табл. 1.61 приведены характеристики барьеров искрозащиты с гальванической изоляцией серии 400 фирмы Eicon Instruments, а на рис. 1.88 показан общий вид барьеров искрозащиты Eicon pZ600.

Таблица 1.61. Характеристики барьеров искрозащиты с гальванической изоляцией серии 400 фирмы Eicon Instruments

Тип модуля	Число каналов	Входной сигнал во взрывобезопасной зоне	Выходной сигнал во взрывоопасной зоне	Питание	Общие характеристики
μD411	1	«СК»	Релейный выход	24 VDC (25 mA)	Рабочая температура 0...60 °С; изоляция 2500 V (для серии 400);
μD412	2	«СК»	Релейный выход	24 VDC (25 mA)	
μD431/432	1/2	«СК»	Релейный выход, 2A	24 VDC (15 mA)	
μD441/442	1/2	«СК»	2 оптотранзистора	24 VDC (20 mA)	Подключение «под винт»; габариты: 16,4×112×92 мм.
μD471/472	1/2	20...30 VDC	2 оптотранзистора (40 mA при 24 VDC, 10 mA при 12 VDC), нагрузка 300 Ом	20...30 VDC	

Рабочий режим модуля конфигурируется пользователем: вход — контакт или проксимитор; входной контакт — нормально разомкнут или нормально замкнут; выходной транзистор нормально закрыт или нормально открыт; сигнализация обнаружения повреждения линии.

К другим барьерам искробезопасности с гальванической развязкой относятся 4-канальные модули дискретного ввода-вывода НШ серии 2000. Модули имеют светодиодные индикаторы статуса сигнала и аварии, малую потребляемую мощность, монтируются на объединительной плате.

Модули HiD серии 3000 объединяются по шине Fieldbus. Задание и контроль параметров с управляющего персонального компьютера осуществляются через шину Profibus.

Группой компаний **Pepperl+Fuchs** выпускается искробезопасная система интерфейсов дистанционного процесса IS-RPI (**Remote Process Interface**). Искробезопасные блоки ввода-вывода могут устанавливаться



Рис. 1.87



Рис. 1.88

прямо во взрывоопасной зоне, что значительно сокращает стоимость электропроводки. Каждый функциональный модуль соединяет 16-канальные блоки ввода-вывода. Межсетевой интерфейс питает до 8 функциональных модулей и соединяет их с внешней полевой шиной (Profibus, ControlNet, Modbus, Foundation Fieldbus). Таким образом, один межсетевой интерфейс обеспечивает питание и сопряжение до 128 входов-выходов с полевой шиной.

В табл. 1.62 представлены функциональные модули искробезопасной системы IS-RPL.

Таблица 1.62. Функциональные модули искробезопасной системы IS-RPI

Тип модуля	Функция	Число каналов	Общие характеристики
RSD-BI-Ex16	Двоичный вход	16	HART- совместимость; искробезопасное питание во взрывобезопасном корпусе; «горячая» замена модулей
RSD-BO-Ex4	Двоичный вход	4	
RSD-CI-Ex8	Аналоговый вход	8	
RSD-CI-Ex8.H	Аналоговый вход с протоколом HART	8	
RSD-CO-Ex8	Аналоговый вход	8	
RSD-CO-Ex8.H	Аналоговый выход с протоколом HART	8	Возможность передачи сигналов из взрывоопасной зоны световодными линиями связи
RSD-TI-Ex8	Аналоговый температурный преобразователь (термопары и термометры сопротивления)	8	
RSD-CTI-Ex2	Счетчик	2	

1.9.4 Блоки питания

Блоки питания предназначены для преобразования сетевого напряжения 220 В переменного тока в стабилизированное напряжение 24 или 36 В постоянного тока. Большинство контроллеров, сенсорных датчиков и датчиков с унифицированным выходным токовым сигналом требуют питающего напряжения 24 В постоянного тока. Ряд датчиков и измерительных преобразователей давления (разрежения), перепада давлений и др. питаются напряжением 36 В постоянного тока.

По числу выходных каналов есть блоки питания с числом выходных каналов от одного до восьми. Одними из важнейших характеристик блоков питания являются поканальная гальваническая развязка, защита от перегрузки и короткого замыкания и др. Ряд блоков питания имеют светодиодную индикацию включения и перегрузки по каждому каналу, совмещение функций блока питания, преобразования, корнеизвлечения и др.

Большинство блоков питания характеризуются коэффициентом пульсации выходного напряжения ($\pm 0,1\%$ при колебании питающего напряжения $\pm 10\%$). Отдельные модификации блоков питания имеют взрывозащищенное исполнение.

В табл. 1.63 представлены модификации блоков питания отечественного производства.

Таблица 1.63. Блоки питания отечественного производства

Тип	Выходное напряжение, В	Число выходных каналов	Максимальный ток нагрузки на канал, мА	Вид монтажа	Потребляемая мощность, Вт	Габариты (Ш×В), мм
Метран-602	24	2	120	Щитовой	10	72×160
Метран-604	24	4	80	DIN-рельс	17	70×75
Карат-22	24 (36)	1...8	50...100	Щитовой	15...60	76×170
БПД-40Ех	24	1; 2	< 100	Щитовой	6; 9	72×144
БП96/24-4	24	4	80	щитовой	15	48×96
БП96/36-4	36	4	80	DIN-рельс	25	70×75
(ГК «Метран»)						
БП-99/24	24	2	300	Щитовой	30	70×125
БП-99/36	36	2	200	Щитовой	30	70×125
БП 2036А/36-4	36	4	45	Щитовой	20	80×160
БП2036А/36-8	36	8	25	Щитовой	20	80×160
БПИ 24-1/1	24	1	1000	DIN	30	30×78
(НПП «Элемер»)						
SITOR Smart 24В/10А (Siemens)	24	1	10А	DIN	200	70×125
SITOR Модульный 24В/40А	24	1	40А	Щитовой	720	240×125

1.9.5 Измерительные преобразователи тока и напряжения

Преобразователи однофазного и трехфазного тока и напряжения применяются в качестве датчиков переменного тока для электроизмерительных приборов и

систем, счетчиков, анализаторов количества и качества энергии, АСКУЭ, защиты электродвигателей и др. потребителей электроэнергии. Преобразование тока и напряжения до уровня 1 (5) А и 100 В осуществляются с помощью трансформаторов тока и напряжения, которые выпускаются многими отечественными и зарубежными фирмами [1.110].

1.9.5.1 Трансформаторы тока

Трансформатор тока предназначен для измерения и контроля больших токов с использованием стандартных измерительных приборов и устройств автоматического управления и контроля. Одновременно трансформаторы тока служат для изоляции аппаратуры от потенциала сети, в которой производится измерение.

Трансформаторы тока Т-0,66 и ТШ-0,66 предназначены для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам в установках переменного тока частоты 50 Гц с номинальным напряжением до 0,66 кВ включительно. Трансформатор тока Т-0,66 является катушечным, а трансформатор ТШ-0,66 — шинным.

Трансформаторы класса точности 0,25; 0,2; 0,55; 0,5 применяются в схемах энергоучета для расчета с потребителями, класса точности 1 — в схемах измерения.

Трансформаторы предназначены для эксплуатации в климатическом исполнении V категории размещения 3 по ГОСТ 15150.

Для трансформатора ТШ-0,66 первичной обмоткой служит шина распределительного устройства, пропускаемая через окно трансформатора. Выводы вторичной обмотки расположены на корпусе трансформатора и закрываются защитной крышкой, что исключает несанкционированный доступ к трансформатору в процессе эксплуатации.

Трансформаторы выполнены в пластмассовом корпусе. По специальному заказу возможна поставка трансформаторов в корпусе из самозатухающих пластмасс. Трансформаторы крепятся к заземленным конструкциям с помощью фланцев или лап (усиленный вариант на токи 20-400 А).

Трансформаторы ремонту не подлежат. Номинальный класс точности трансформаторов Т-0,66 — 0,2; 0,5S; 0,5; 1,0. Номинальные первичные токи — 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000 А.

Номинальный вторичный ток — 5 А. Коэффициент трансформации 2; 3; 4; 6; 8; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 60; 80; 100; 120; 160; 200. Номинальное напряжение — 0,66 кВ. Средняя наработка на отказ порядка 200000 ч.

В табл. 1.64 приведены характеристики трансформаторов тока

Таблица 1.64. Характеристики трансформаторов тока Т-066

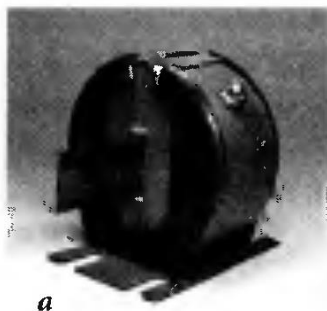
Номинальный первичный ток, А	Номинальная вторичная нагрузка, ВА	Класс точности
5÷75, 100, 150	5	0,5
20÷75, 100, 150, 200	10	
100	5	1
150		0,5
150		1
200		0,5
250		0,5
300, 400		0,2S; 0,2; 0,5S; 0,5

Условия эксплуатации трансформаторов: температура от -45 °С до + 40 °С, габаритные размеры 87х125х93 мм, масса не более 1,3 кг.

На рис. 1.89 показан общий вид трансформаторов Т-0,66 (**а**) и ТШ-0,66 (**б**).

Шинные трансформаторы тока ТНШЛ-0,66. Трансформаторы предназначены для встраивания в комплектные распределительные устройства (КРУ) и служат для передачи сигнала измерительной информации измерительным приборам или устройствам защиты и управления в установках переменного тока частоты 50 или 60 Гц с номинальным напряжением до 0,66 кВ включительно (рис. 1.90).

Опорные трансформаторы тока ТОП-0,66 предназначены для работы в следующих условиях: высота над уровнем моря не более 1000 м; температура окружающей среды при эксплуатации от -45 до +50 °С, при транспортировании и хранении от -50 до +50 °С; окружающая среда невзрывоопасная, не содержащая пыли, химически активных газов и паров в концентрациях,



а



б

Рис. 1.89



Рис. 1.90



Рис. 1.91



Рис. 1.92

разрушающих покрытия металлов и изоляцию; рабочее положение — любое.

Измерительные трансформаторы тока серии ТТ компании LEM. Компания **LEM**, ведущий разработчик решений в области измерения электрических параметров, представляет высокоэффективный трансформатор тока с разрезным сердечником Split-core для мониторинга активной мощности (рис. 1.91).

Отличительные особенности:

- измерение переменного тока первичной обмотки от 0 до 100 А;
- высокие точность, линейность и незначительный сдвиг фаз между первичной и вторичной обмотками;
- сердечник трансформаторов ТТ выполнен из нового типа феррита с улучшенной магнитной проницаемостью, что позволяет осуществлять точные измерения сигналов переменного тока в расширенном диапазоне частот 50/60 Гц. Трансформаторы серии ТТ отличаются высокой точностью, имеют лучший показатель при меньших значениях тока первичной обмотки. Ферритовый материал обеспечивает линейность 0,1% и низкий сдвиг фаз между измеряемым напряжением и током. В отличие от используемых многослойных материалов FeSi или FeNi, новый плотный материал характеризуется незначительными воздушными зазорами, благодаря чему трансформаторы нечувствительны к старению и температурным изменениям.

Технические параметры трансформаторов тока ТТ50-SD и ТТ100-SD:

- ✚ два диапазона измерения тока первичной обмотки: 50А и 100А;
- ✚ габариты ТТ50-SD: 36,5x43x31,5 мм с диаметром отверстия 8 мм; ТТ100-SD: 36,5x43x31,5 мм с диаметром отверстия 16 мм;
- ✚ выходной ток ТТ50-SD до 16 мА, ТТ100-SD — 33 мА;
- ✚ коэффициент трансформации 3000:1.

Трансформаторы тока ASR компании MBS Sulzbach Messwandler GmbH (рис. 1.92). Измерительные трансформаторы с круглым отверстием под кабель или втулку серии ASR, встраиваются в соединения шин или в место подключения кабеля к шине. Втулки из высококачественной меди обеспечивают прочное соединение.

Отличительные особенности:

- первичные токи 30... 1000 А;
- вторичный ток 1 или 5 А;
- классы точности 1.0, 0,5, 0,2, 0,5s, 0,2s;
- диаметр отверстия под втулку 21, 22,5, 42мм;
- толщина трансформаторов 44, 48,5, 49,5, 60мм.



Рис. 1.93

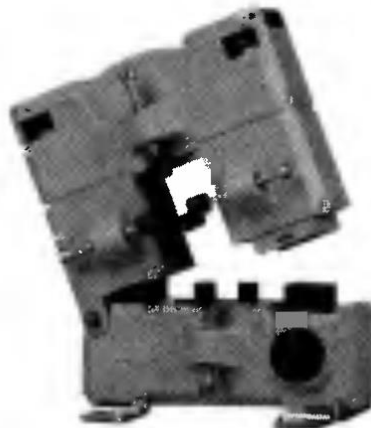


Рис. 1.94

Трансформаторы тока ASK (рис. 1.93). Измерительные трансформаторы серии ASK, имеют универсальное или прямоугольное отверстие с фиксаторами. Отличительные особенности:

- ❖ первичные токи 30...7500 А, вторичный ток 1 или 5 А;
- ❖ классы точности 1,0,0,5,0,2,0,5s, 0,2s;
- ❖ универсальное и прямоугольное окно для шин от 20x5 до 130x130 мм.
- ❖ универсальное окно также для кабеля/ втулки/шпильки диаметром от 17,5 до

Трансформаторы тока KBU (рис. 1.94). Измерительные трансформаторы тока с разъемным сердечником серии KBU обеспечивают легкую замену при изменении нагрузки на шине в случае модернизации объекта. Регулируемые фиксаторы обеспечивают надежное закрепление трансформатора в любом положении на шинах меньше размера окна. Вторичный ток 1 или 5 А. Класс точности 1,0 и 0,5.

Трансформаторы тока с преобразователем 4...20 мА фирмы CIRCUTER (Испания). Трансформаторы тока серий TI-420, TP-420, TCM-420, TCB-420 представляют собой трансформаторы тока и измерительные преобразователи в

одном устройстве. Применяются в системах измерений и автоматики, требующих стандартные входные сигналы постоянного тока 4...20 мА.

Для питания преобразователей необходим либо источник постоянного тока 10...28 В или 7,5...36 В (ТТ420, ТР-420, ТС-420), либо 220...230 В переменного тока (ТСМ-420, ТСВ-420). Для преобразователя ТС 020 дополнительного питания не требуется.

При монтаже трансформаторы тока закрепляются на шине или на любой несущей поверхности. Модель ТСМ-420 монтируется на DIN-рейку. Трансформаторы тока ТР-420 с разъемным сердечником применяются для монтажа на существующих сетях. Их конструкция позволяет вести монтаж



Рис. 1.95

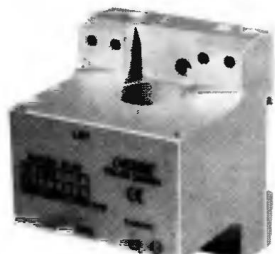


Рис. 1.96

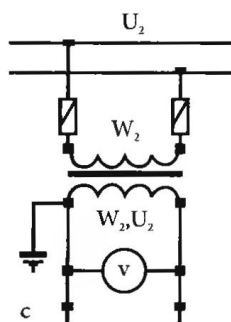


Рис. 1.97

без отсоединения шин и без отключения напряжения.

Серия трансформаторов тока ТТ-420-35 (-70, -105) различается отношением токов входа/выхода, равным 2,5; 5; 10; 20; 50; 100; 250; 500; 750; 1000 и 1500.

Трансформаторы тока применяются в диапазоне температур -10...+50°C, продолжительная перегрузка до 1,5 $I_{ном}$.

При необходимости установки трансформаторов тока и напряжения во взрывоопасной среде выбирается взрывобезопасное исполнение, либо трансформаторы помещаются в специальные корпуса для использования во взрывоопасных средах. Например, корпуса типа Cubo ХРСР фирмы Ensto Control Oy (Финляндия) с категорией взрывозащиты Exe IIU или др.

Материал корпусов поликарбонат или металл.

На рис 1.95 и 1.96 показаны трансформаторы тока фирмы C1RCUTOR с разъемным магнитопроводом и с креплением на DIN-рейку.

Основные технические характеристики трансформаторов токов фирмы CIR-CUTOR приведены в табл. 1.65.

**Таблица 1.65. Технические характеристики трансформаторов токов
фирмы CIRCUTOR**

Тип/ серия	ТТ-420		ТР-420			ТСМ-420		ТСВ-420	ТС-420			ТС-020		
	35	70	23	58	88	25	35	70	ТС5	ТС6	ТС8	ТС5	ТС6	ТС8
Диам. под кабель, мм	35	70	—	—	—	25	35	70	20	28	44	20	28	44
Размер под шину, мм	—		20×30	50×80	80×80	—		70	25×5	40×10	60×12	25×5	40×10	60×10
2,5 А	X					X								
5 А	X		X			X			X			X		
10 А	X		X			X	X		X			X		
20 А	X		X			X	X		X			X		
50 А	X		X			X	X			X			X	
100 А	X	X	X	X	X	X	X	X		X			X	
200 А			X			X	X			X			X	
250 А	X	X	X	X	X			X						
300 А							X			X			X	
500 А		X	X	X	X			X			X			X
750 А		X		X	X			X						
1000 А					X						X			X

1.9.5.2 Трансформаторы напряжения

Трансформаторы напряжения предназначены для преобразования высокого напряжения до стандартного значения 100 В и для гальванической изоляции цепей высокого напряжения от измерительных цепей и цепей релейной защиты. Вторичную обмотку трансформатора рекомендуется заземлять (рис. 1.97).

Среди большого числа трансформаторов напряжения, выпускаемых различными фирмами, освоены в производстве трансформаторы малой мощности со встроенными защитными предохранительными устройствами, трансформаторы класса точности 0,05; 0,1 и 0,2.

Известны понижающие трансформаторы типов ОСО, ОСОВ, ТБС2, ОСМ1 и др.

Понижающие трансформаторы серии ОСО-0,25 выпускаются на напряжения 127/12, 127/36; 220/12 (24, 36, 42, 110); 380/12, 380/220. Понижающие трансформаторы серии ОСОВ-0,25 выпускаются на напряжения 127/12; 220/12 (24, 36, 42, 127); 380/36 (42, 127). Трансформаторы ТБС2-0Д УЗ выпускаются на напряжения 220/36-12, 220/24-12, 380/15-22.

ГОСТ на трансформаторы напряжения измерительные лабораторные 23625-2001 устанавливает номинальную мощность трансформаторов из ряда 5; 10; 15; 25 В-А.

1.10. Исполнительные механизмы

Исполнительные механизмы (электрические, пневматические, гидравлические) предназначены для перемещения (поворотного или поступательного) регулирующего органа в системах управления технологическими процессами. В качестве регулирующих органов в АСУ ТП используются запорные и регулирующие односедельные и двухседельные клапаны, клапаны типа «бабочка», шаровые запорные и регулирующие краны, пробковые краны, заслонки (шибера), поворотные дисковые затворы и др.

1.10.1 Электрические исполнительные механизмы

Электрические исполнительные механизмы (ЭИМ) по принципу действия делятся на электромагнитные (соленоидные) и моторные. Электромагнитные ЭИМ представляют собой электромагнит с плунжером, связанным с регулирующим органом (РО). При подаче командного импульса на электромагнит плунжер втягивается внутрь электромагнита, перемещая РО. При снятии сигнала плунжер под действием возвратной пружины устанавливается в начальное положение. В зависимости от конструкции РО электромагнитные ЭИМ имеют исполнение НО («нормально открыт») или НЗ («нормально закрыт»). Ввиду того, что РО может занимать одно из двух крайних положений («закрыто» или «открыто») электромагнитные ЭИМ применяются в схемах двухпозиционного регулирования, а также в схемах аварийной защиты и блокировки. ЭИМ имеют ряд преимуществ перед пневматическими и гидравлическими ИМ. Подвод питания осуществляется по проводам, монтаж и эксплуатация которых значительно проще, чем монтаж импульсных линий. Недостатком ЭИМ является некоторый выбег сервомотора и люфты редуктора.

Управление электрическим исполнительным механизмом (ЭИМ) осуществляется контактным способом (с помощью контактов реле или магнитного пускателя) или бесконтактным способом (с помощью бесконтактных ключей пускателей, тиристорных или симисторных ключей).

Для контроля положения вала ЭИМ и регулирующего органа ЭИМ комплектуется контактным блоком сигнализации положения (блок концевых выключателей) или бесконтактным (индуктивный, реостатный или токовый). Блок концевых выключателей (БКВ) обеспечивает сигнализацию при нахождении вала ЭИМ в крайних положениях и прерывание перемещения вала в соответствующем направлении.

Концевые выключатели могут быть смещены (раздвинуты или сдвинуты) в пределах сектора угла поворота вала ЭИМ. Поворот вала ЭИМ составляет для большинства однооборотных ЭИМ 0,25 оборота (90°) или 0,63 оборота (225°).

Одним из крупнейших российских производителей ЭИМ является ОАО «Завод Электроники и Механики (ЗЭИМ)» (г. Чебоксары) [1.111]. Предприятие выпускает блоки сигнализации положения индуктивные БСПИ (диапазон 0... 10 мГн), блоки сигнализации положения реостатные БС1ГР (диапазон 0... 120 кОм), блоки сигнализации положения токовые БСГТТ (диапазон 0...5, 0...20 или 4...20 мА). Также для сигнализации положения регулирующего органа ЗИМ может комплектоваться механизмом сигнализации положения МСП-1. Выходной сигнал МСГТ-1 токовый (0...5 мА при сопротивлении нагрузки 2,5 кОм и 0... 20 мА, 4... 20 мА при сопротивлении нагрузки до 1 кОм). Питание блока МСП-1 составляет 220 В, 50 Гц. Для взрывозащищенного исполнения выпускаются блоки сигнализации положения соответственно БСПР-ПВТ6, БСПТ-НВТ6 и блоки концевых выключателей БСП-ПВТ6. Некоторые МЭО имеют ручной маховик для поворота вала редуктора без помощи электродвигателя.

В зависимости от климатических условий работы ЗИМ по ГОСТ 15150 имеют различное климатическое исполнение: У2 (-30...+50°C, относительная влажность до 100% без конденсата), У3 (-10...+50°C, относительная влажность до 95% без конденсата), Т2 (-10...+50°C, относительная влажность до 100% без конденсата), Т3(+5...+50°C, относительная влажность до 100% без конденсата) и ряд др.

В табл. 1.66 приведены характеристики ЭИМ ОАО "ЗЭИМ".

Таблица 1.66. Характеристики ЭИМ ОАО «ЗЭИМ»

Тип	Потребляемая мощность, Вт	Тип электродвигателя	Тип командного устройства	Габаритные размеры, мм
МЭО-6,3/10-0,25-01	46	ДСОР-68-0,25-150 ¹⁾	ПБР-2М	230×200×185
МЭО-16/63-0,25-01	46	ДСОР-68-0,25-150	ПБР-2М	230×200×185
МЭО-40/10-0,63-99К	95	ДСТР-110-0,6-136 ²⁾	ПБР-3А	235×200×185
МЭО-100/63-0,63-99К	170	ЗДСТР-135-1,6-150 ³⁾	ПБР-3А	440×315×305
МЭО-250/63-0,63-99К	250	ЗДСТР-135-4,0-150	ПБР-3А	440×315×305
МЭО-630/63-0,63-92КБ	200	АИР-56А4	ПБР-3А	445×452×402
МЭО-10/10-0,25-ПВТ4-00	110	ДСТР-116-0,6-136-ПВТ4	ПБР-2М	410×265×305
МЭО-16/10-0,25-ПВТ4-00	110	ДСТР-116-1,6-136-ПВТ4	ПБР-2М	410×265×305
МЭО-40/25-0,25-ПВТ4-00	170	ДСТР-116-1,6-136-ПВТ4	ПБР-2М	410×265×305
МЭОФ-6,3/10-0,25-02	46	ДСОР-68-0,25-136	ПБР-2М1	245×200×185
МЭОФ-16/63-0,25-02	36	ДСОР-68-0,25-136	ПБР-2М1	245×200×185
МЭОФ-40/160-0,63-02	46	ДСОР-68-0,25-136	ПБР-2М1	245×200×185
МЭОФ-6,3/12,5-0,25-ПВТ5-03	60	ДСТР-116-1,0-136-ПВТ4	ПБР-3А	320×150×210
МЭМ-6,3/63-10-96	6,3	АИР 56В4	ПБР-3А	255×150×285
МЭМ-16/63-10-96	16		ПБР-3А	255×150×285
МЭМ-63/63-10-ПВТ4-98	6,3		ПБР-3А	152×280×500
МЭП-25000/100-50-99	200	Номин. усилие на штоке: 25 000 Н; ход штока-50 мм	ПБР-2М1	325×330×720
МЭП-20000/240-120-00	200	Номин. усилие на штоке: 20 000 Н; ход штока 120 мм	ПБР-3А	325×330×840
ПЭОЗ-13-1,5-02К ⁴⁾	100	ДСТР-110-0,6-136	ПБР-3А	—
ПЭОЗ-21-1,5-ПВТ4-02	110	ДСТР-116-0,6-ПВТ4	ПБР-3А	375×265×305
ПЭОМ-8/80-0,25-02	10	АИР 63А6	ПБР-2М	—
ПЭМ-А7	180	Асинхронный. Настройка номин. крутящего момента 25...70 Н·м; число оборотов 10...45	ПБР-2М	373×332×559

¹⁾ ДСОР-68 — малогабаритный синхронный двигатель с числом оборотов вала 150 об/мин.

²⁾ ДСТР-110 — малогабаритный синхронный двигатель с числом оборотов вала 136 об/мин.

³⁾ ЗДСТР-135 — малогабаритный синхронный двигатель с числом оборотов вала 150 об/мин.

⁴⁾ ПЭОЗ-13-1,5-02К: 13 — номинальный крутящий момент, 13Н; 1,5 — скорость вращения вала, 1,5 об/мин.



Рис. 1.98



Рис. 1.99



Рис. 1.100



Рис. 1.101

Пример обозначения электрического исполнительного механизма ЗЭИМ:

МЭО-16/10-0,25И-ПВТ4-00-КБ-У2

МЭО — механизм электрический однооборотный;

16 — номинальный крутящий момент на выходном валу, 16 Н·м;

- 10 — номинальное время полного хода выходного вала, 10 с;
- 0,25 — номинальный полный ход выходного вала, 0,25 об. (90°);
- И — индуктивный блок сигнализации положения выходного вала;
- ПВ — категория взрывоопасности смеси;
- T4 — температура воспламенения смеси от 135 до 200 °С;
- 00 — год разработки, 2000 г.;
- К — трехфазное напряжение питания;
- Б — токовый датчик и встроенный блок питания;
- У2 — климатическое исполнение.

Помимо однооборотных механизмов типа МЭО ОАО «ЗЭиМ» выпускает механизмы однооборотные фланцевые — МЭОФ, многооборотные — МЭМ, прямо-

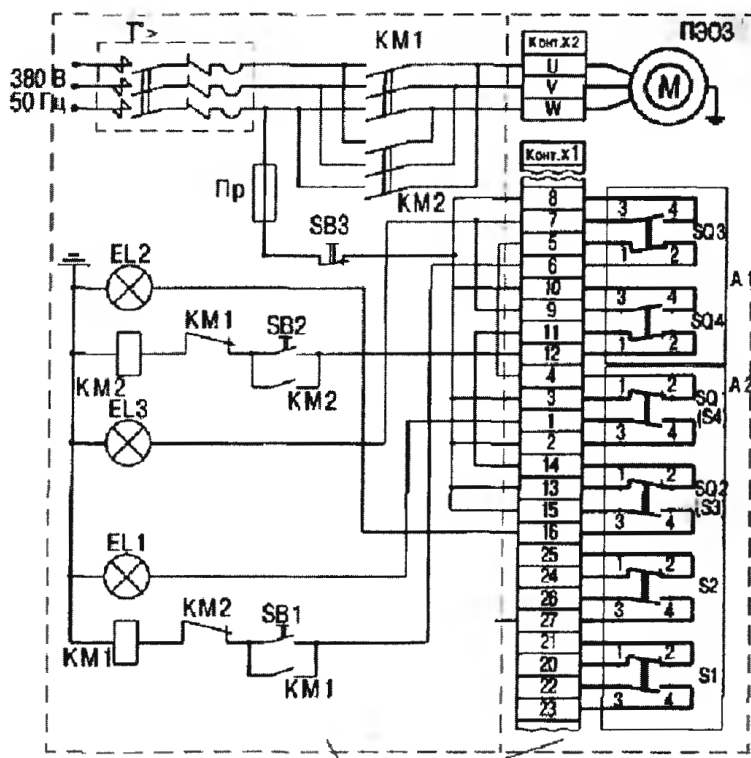


Рис. 1.102

ходные — МЭГТ и МЭПК, приводы однооборотные запорные — ПЭОЗ, приводы однооборотные малой мощности — ПЭОМ, приводы многооборотные — ПЭМ. Механизмы МЭО объединяются с регулирующим органом посредством рычагов и тяг. Механизмы МЭОФ, МЭМ, МЭП и приводы ПЭОЗ, ПЭОМ и ПЭМ устанавливаются непосредственно на трубопроводную арматуру.

На рис. 1.98 представлен механизм типа МЭО-6,3, на рис. 1.99 — МЭО-630, на рис. 1.100 — МЭОФ 250/ 63-0.25-ПВТ4-01. На рис. 1.101 показан привод однооборотный запорный ПЭОЗ-ОЗК.

Помимо ОАО «ЗЭиМ» электрические исполнительные механизмы выпускаются рядом предприятий РФ, среди которых МЗТА, ОАО «Тулаэлектропривод», ЗАО «НПП «Автоматика» (г. Владимир), ОАО НПП «Эра» (г. Пенза), ЗАО «Армагус» (г. Гусь-Хрустальный), а также «Днепродзержинский завод электрических исполнительных механизмов» (Украина), «Термо-К» (Беларусь) и др.

На рис. 1.102 приведена схема дистанционного управления электропривода ПЭОЗ-ОЗК.

1.10.2 Электропривод с преобразователем частоты

Необходимость регулирования скорости вращения механизмов возникает во многих производственных процессах. Это насосы, вентиляторы, конвейеры, подъемно-транспортное оборудование, станки, вытяжные машины, центрифуги, мельницы, экструдеры, буровые механизмы и др.

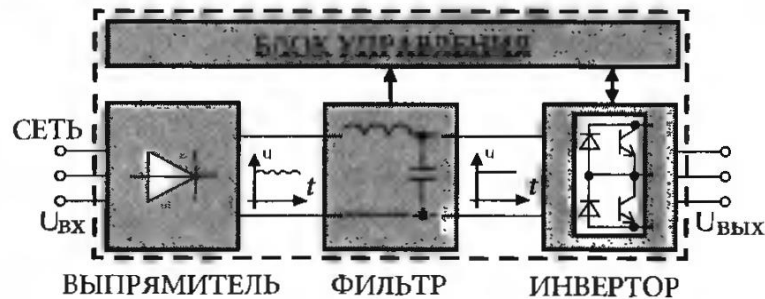
Наибольшее применение в промышленности нашли преобразователи частоты с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором. Регулирование скорости вращения вала двигателя осуществляется путем изменения частоты и напряжения питания двигателя. Преимуществом такого электропривода является его простота и надежность, вызванная отсутствием трущихся частей (коллектора и щеток, характерных для электропривода постоянного тока), механических узлов (характерных для механических вариаторов скорости) или гидросистем (для гидравлического двигателя).

Основными достоинствами регулирования скорости двигателя с помощью преобразователя частоты являются:

- высокая точность поддержания заданной скорости;
- мягкий пуск без механических и электрических перегрузок;
- регулируемое время ускорения и замедления вращения;
- возможность дистанционного управления приводом, в том числе по локальной сети;
- экономия электроэнергии (режим энергосбережения);
- возможность работы двигателя во взрывоопасной зоне;
- увеличение срока службы привода;
- снижение эксплуатационных затрат и др.

Преобразователь частоты состоит из стандартного выпрямителя однофазного или трехфазного напряжения питания, звена постоянного тока (фильтра) и инвертора с реализацией алгоритмов скалярного или векторного управления для

разомкнутой или замкнутой систем. Как правило, инвертор выполнен на базе силовых транзисторных ключей IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor — биполярный транзистор с изолированным затвором), способных работать при высоких токе и напряжении и высокой частоте коммутации (рис. 1.103). Новые силовые модули IPM (Intelligent Power Modules) в ближайшие годы могут заменить IGBT.



Принцип работы и устройство преобразователей частоты рассмотрены в работах [1.112-1.117]. К основным техническим характеристикам различных типов частотно-регулируемых электроприводов относятся:

- 29) максимальные выходная мощность и ток преобразователя частоты и максимальная мощность электродвигателя;
- 30) вольт-частотный и (или) векторный способы управления скоростью;
- 31) перегрузочная способность преобразователя частоты;
- 32) диапазон регулирования частоты (скорости) при управлении с датчиком или без датчика обратной связи;
- 33) функция автоматического энергосбережения при работе с насосами и вентиляторами;
- 34) защитные функции преобразователя (защита от короткого замыкания, перегрева, холостого хода, обрыва фаз, бросков напряжения и др.);
- 35) автоматический рестарт после пропадания сетевого напряжения с возможностью «подхвата» частоты вращения;
- 36) работа по циклограмме;
- 37) способы торможения двигателя (торможение постоянным током с внутренним или внешним тормозным резистором, комбинированное, рекуперативное и скольжением);
- 38) наличие встроенных ГТИ-, ПИД-регуляторов, последовательных интерфейсов;
- 39) характеристики и число входных и выходных сигналов;
- 40) программное обеспечение работы электропривода;
- 41) многофункциональная панель управления (пульт оператора);

42) возможность синхронного управления несколькими приводами от одного преобразователя и ряд др.

Как правило, мощность частотного преобразователя выбирается равной (или чуть больше) мощности электродвигателя. Это правило распространяется на электродвигатели с номинальным числом 1500 и 3000 об/мин. При использовании др. электродвигателей или в некоторых особых случаях выбор частотного преобразователя должен соответствовать условию, при котором номинальный выходной ток преобразователя должен быть не меньше номинального тока электродвигателя.

Для повышения надежности работы преобразователя в его схеме предусмотрены сетевые (входной и выходной) дроссели, фильтры электромагнитной совместимости (ЭМС-фильтры), соответствующие нормам излучения EN 55011 класса А и В, радиочастотные фильтры и др. аксессуары.

Входной дроссель применяется для компенсации высших гармоник из сети в преобразователь и обратно, а также для защиты конденсаторов промежуточного контура, диодов и тиристорov выпрямителя при бросках тока в сети и нагрузке.

Выходной дроссель используется при длине кабеля между преобразователем и электродвигателем более 50... 100 м. Назначение дросселя — подавление высокочастотных гармоник в токе двигателя, вызывающих его дополнительный нагрев. Преобразователь формирует ток в обмотках двигателя методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) по синусоидальному закону. Высокая частота ШИМ гарантирует бесшумную работу электродвигателя. К другим функциям выходного дросселя относятся ограничение амплитуды тока короткого замыкания за счет индуктивности дросселя, компенсация емкостного тока в случае длинного кабеля, сглаживание бросков напряжения на обмотках двигателя и др. Выбор дросселя зависит от напряжения сети, диапазона рабочих частот и максимального тока электродвигателя.

Радиочастотные фильтры используются для снижения радиочастотных помех, излучаемых преобразователем в питающую сеть. ЭМС-фильтры снижают излучение силовой части аппаратуры привода до пределов, необходимых в соответствии со стандартом EN 55011 класс А и В. Класс А — длина экранированного силового кабеля до 100 м, класс В — длина кабеля до 20 м. При установке ЭМС-фильтра контролируется ток заземления (утечки), величина которого для преобразователя со встроенным или внешним ЭМС-фильтром не должна превышать порядка 30 мА.

Выбор преобразователя частоты со скалярным или векторным способом управления определяется требуемой мощностью преобразователя, видом нагрузки и др. требованиями. Традиционно преобразователи частоты со скалярным способом управления применяются для управления электродвигателями небольшой мощности. В большинстве преобразователей частоты предусмотрены как скалярный, так и векторный алгоритмы управления.

Принцип скалярного способа управления состоит в том, что скорость вращения магнитного поля статора пропорциональна частоте источника питания. При вольт - частотном способе управления, когда $U = F(f)$, электромагнитный момент зависит от частоты и напряжения питания. В зависимости от вида нагрузки используются различные формы взаимосвязанного управления напряжением и частотой:

- при постоянном моменте нагрузки: $U_s/f_s = \text{const}$;
- при постоянной мощности: $U_s / \sqrt{f_s} = \text{const}$.

В случае вентиляторной нагрузки, когда нагрузка зависит от скорости, - имеем квадратичную зависимость: $U_s / f_s^2 = \text{const}$.

Для реализации принципа скалярного управления следует согласованно управлять напряжением (током) статора электродвигателя при изменении частоты питания. В режиме скалярного управления используются схемы с датчиком скорости или без него. Для улучшения качества выходных характеристик в алгоритм скалярного управления без датчика обратной связи введена функция компенсации скольжения, при которой частота тока статора определяется алгебраической суммой заданной и текущей частоты вращения ротора. Также известен алгоритм скалярного управления с контролем потокосцепления ротора (FCC — Flux Current Control), которое поддерживается постоянным. В переходных режимах, однако, величина потокосцепления не является постоянной, что ухудшает динамические характеристики электропривода. Этот недостаток устраняется в электроприводе с системой векторного управления. Системы векторного управления называют также системами с ориентированием поля электродвигателя [1.115].

При использовании режима векторного управления возможно управление с постоянным крутящим моментом на валу (СГ — Constant Torque) или переменным крутящим моментом (VT — Variable Torque). Управление переходными процессами электродвигателя переменного тока основано на следующих переменных состояния: вектор тока статора I_s , вектор тока ротора I_r , потокосцепление статора ψ_s ,

потокосцепление ротора ψ_r . Преобразование сигналов, пропорциональных переменным состояниям, осуществляется с помощью преобразователя координат.

Векторное управление при разомкнутой системе (без датчика обратной связи по скорости) обеспечивает поддержание скорости с точностью порядка $\pm 0,5\%$ и диапазон скоростей 1:100. В этом режиме скорость вращения вала может быть рассчитана путем точного измерения формы сигнала и обратной связи по трем выходным фазам привода. Векторное управление в замкнутом контуре (с импульсным датчиком скорости) обеспечивает более высокое быстродействие и повышенную точность по скорости (от $\pm 0,02$ до $\pm 0,001\%$), а также широкий диапазон скоростей 1:1000. В качестве датчика обратной связи используется энкодер, с помощью которого производится расчет и управление углом поворота и скоростью вращения вала электродвигателя. В случае потери связи с энкодером, привод автоматически переходит в режим векторного управления с разомкнутым контуром. Известны алгоритмы векторного управления с помощью вектора тока (CFC — Current Flux Control) и вектора напряжения (VFC — Voltage Flux Control). Теоретические основы алгоритмов векторного управления и системы электропривода с векторным управлением приведены в работах [1.114-1.117].

Преобразователь частоты имеет функцию энергосбережения, позволяющую экономить от 5 до 60% электроэнергии путем поддержания оптимального КПД. Преобразователь автоматически отслеживает потребление тока, рассчитывает нагрузки и при необходимости снижает выходное напряжение. При этом снижаются потери на обмотках двигателя и повышается КПД.

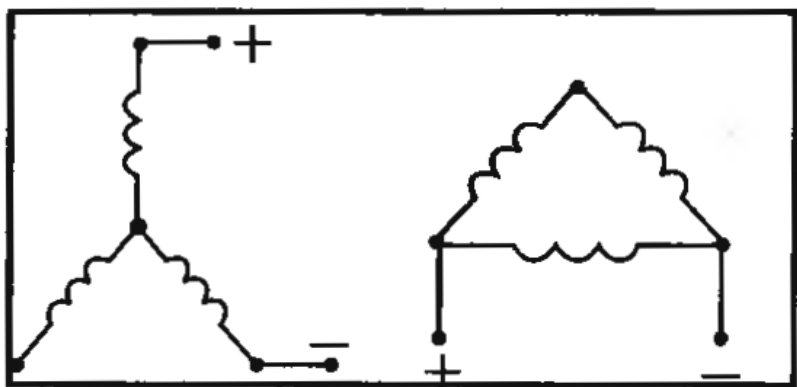


Рис. 1.104

1

Функции торможения основаны на подачах в одну из фаз двигателя напряжения постоянного тока (рис. 1.104). Взаимодействие магнитного поля в этой фазе с магнитным полем ротора приводит к быстрой остановке двигателя. Существует

также режим генераторного торможения с подключением внутреннего тормозного резистора (до мощности примерно 7,5 кВт) или внешнего при больших мощностях.

На рис. 1.105 приведена схема подключения силовых цепей и цепей управления преобразователя частоты Micromaster 420 фирмы Siemens.

Имеется ряд других функций, а именно:

- функция встроенного ПИД-регулятора и разнообразных модулей расширения позволяет организовать контроль и управление технологическими параметрами, интегрируя преобразователь частоты в существующие и проектируемые системы управления;
- функция многоступенчатого регулирования скорости с переключением электропривода на ряд фиксированных скоростей;
- функция предотвращения опрокидывания ротора или функция ограничения момента при разгоне, торможении и в процессе работы; при разгоне, торможении в случае задания большого ускорения и недостатка мощности двигателя увеличивается время разгона (торможения); при перегрузке – снижается скорость вращения двигателя;

43) функция «подхвата» скорости (частоты) работающего двигателя; в случае пуска преобразователя при вращающейся нагрузке для предотвращения опрокидывания используется функция поиска скорости (функция подхвата работающего двигателя); после определения скорости вращения нагрузки привод начинает регулирование с текущей скорости;

44) защитные функции электропривода: токовая защита двигателя от перегрузки по току; защита двигателя от перегрева; защита от короткого замыкания; -защита от перенапряжения в звене постоянного тока; защита от замыкания выходных фаз, в том числе на землю; защита от обрыва сетевых фаз; защита от колебаний напряжения (до $\pm 15\%$); защита от перегрева выходных каскадов; защита от про-

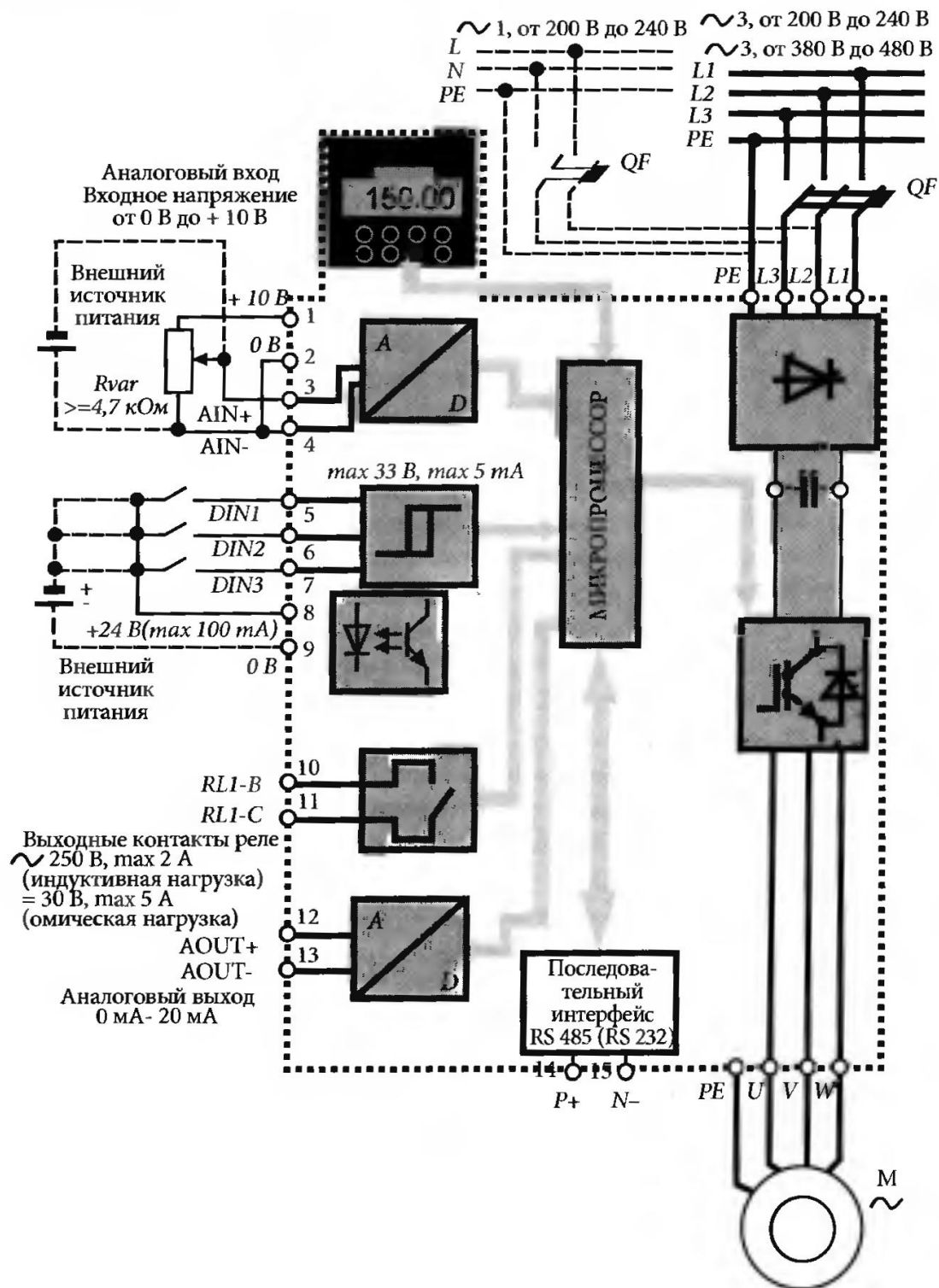


Рис. 1.105

пуска резонансных частот, могущих привести к механическому резонансу.

Интерфейс пользователя преобразователя частоты основан на принципах HMI и реализуется с помощью встроенной панели управления, программного обеспечения, сетевых плат и открытых стандартов на промышленные сети. С помощью коммуникационных модулей преобразователь частоты может быть подключен к различным открытым промышленным сетям: Modbus RTU, Modbus Plus, Profibus DP, Device Net, Interbus, Ethernet и др.

Пульт управления преобразователя служит для выполнения следующих функций:

- настройки параметров преобразователя;
- управления включением-отключением, изменения направления вращения;
- отображение основных параметров и состояния преобразователя (скорость, частота, величина тока, выходное напряжение, потребляемая мощность и др.);
- вывод сообщения об ошибках и диагностических сообщений и др.

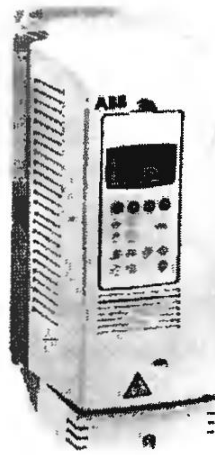


Рис. 1.106



Рис. 1.107

Для отображения параметров используется встроенный черно-белый или цветной жидкокристаллический дисплей. Имеется возможность подключения выносной ЖК-панели для управления и настройки параметров.

Программное обеспечение большинства преобразователей частоты работает под управлением ОС Windows и позволяет выполнить настройку, конфигурирование, диагностику, визуализацию, тестирование и архивирование параметров.

Большинство преобразователей имеют степень защиты IP20, однако известны модели со степенью защиты IP54 и IP65.

К настоящему времени известно свыше 50 крупных фирм, производящих различные типы преобразователей частоты. В табл. 1.67 приведены основные технические характеристики преобразователей частоты. На рис. 1.106 приведен общий вид преобразователей частоты Micromaster 440 фирмы Siemens, а на рис. 1.107 преобразователь типа FR-F 700 (до 630 кВт) фирмы Mitsubishi Electric.

Помимо перечисленных в табл. 1.67 преобразователи частоты производят фирмы Yaskawa Electric (Япония), Delta Electronics Inc. (Тайвань), Emetron AB (Швеция), LG Industrial System Co. (Корея), Matsushita Automation Controls (Япония) и др.

Таким образом, высокие технические характеристики, простота управления, компактные размеры и низкая стоимость определили широкое применение частотно-регулируемого электропривода в промышленности.

1.10.3 Сервопривод

Сервоприводом или сервомеханизмом (от латинского слова *servus* — слуга) называется устройство с обратной связью, осуществляющее за счет вспомогательного источника механическое перемещение регулирующего органа системы управления в соответствии с сигналами управления [1.118-1.120]. Таким образом, сервосистема воспроизводит на выходе с требуемой точностью входные сигналы (осуществляет высокоточное позиционирование).

Отличие сервомеханизма как следящей системы, от классической системы с обратной связью, заключается в том, что сервосистемы обладают свойством усиления мощ-

Таблица 1.67 Технические характеристики преобразователей частоты

№ п/п	Тип (фирма)	Напряжение (В), мощность (кВт)	Режим управления двигателем	Диапазон выходной частоты, Гц	Входы	Выходы	Способ торможения	Перегрузочная способность, %	Интерфейс	Программное обеспечение
1	ACS-800-01/02 (ABB)	3~ (380–415) 1,5...110 3~ (380–500) 110...500	Прямое регулирование момента (DTC)	0...300	AI — 3 DI — 7	AO — 2 RO — 3 (CK)	Торможение постоянным током	150	ProfibusDP, Interbus, DeviceNet, CANopen, Modbus +, Modbus RTU, Ethernet	DriveSize, Drive OPC, DriveAP, Drive Windows 2.0
2	FR-D700 (Mitsubishi Electric)	1~ (230) 0,1 - 2,2 кВт 3~ (400) 0,4 - 7,5 кВт	Векторное управление	0,5...400	AI — 2 DI — 5	AO — 1 DO — 2	Торможение постоянным током	200	RS-485, Modbus RTU	VFD Setup
3	FR-A700 (Mitsubishi Electric)	3~ (380–480) 0,4 ... 630	Векторное управление	0,2...400	AI — 3 DI — 12	AO — 2 DO — 6	Торможение постоянным током	120 - 200	RS-485, Modbus RTU	VFD Setup
4	Altivar 31 (Schneider Electric)	1~ (200–240) 0,18...2,2 3~ (200–240) 0,18...15	Вольт-частотное, векторное управление	0...500	AI — 3 DI — 6	RO — 1 DO — 1 (OK)	Торможение постоянным током	200	ProfibusDP, Modbus RTU, Modbus+, Fipio, Ethernet	PowerSuite
5	Altivar 71 (Schneider Electric)	3~ (200–240) 0,35...75 3~ (380–500) 0,75...500	Вольт-частотное и векторное управление	0 ...1000	AI — 4 DI — 20	AO — 3 DO — 8 RO — 4	Торможение постоянным током	150	CANopen, Modbus RTU, Modbus Plus, Fipio, ProfibusDP, Ethernet, DeviceNet, Interbus	PowerSuite
6	Micromaster 420 (Siemens)	1~ (200–240) 0,12...3 3~ (380–480) 0,37...11	Вольт-частотное и управление с контролем потока сцепления (FCC)	0...650	AI — 1 DI — 4	AO — 1 RO — 1 (CK)	Торможение постоянным током и комбинированное торможение	150	ProfibusDP, DeviceNet, CANopen, RS-232	Starter, Drive Monitor

№ п/п	Тип (фирма)	Напряжение (В), мощность (кВт)	Режим управления двигателем	Диапазон выходной частоты, Гц	Входы	Выходы	Способ торможения	Перегрузочная способность, %	Интерфейс	Программное обеспечение
7	Micromaster 440 (Siemens)	1~ (200–240) 0,12...3 3~ (380–480) 0,37...200	Вольт-частотное, векторное и управление потоком сценарием (FCC)	0...650	AI — 2 DI — 6	AO — 2 RO — 3 (СК)	Торможение постоянным током, комбинированное, генераторное	150...200	RS-485, ProfibusDP, DeviceNet, CANopen, RS232	Drive Monitor
8	NXS (Vacon Oy)	3~ (208–240) 0,37...30 3~ (380–500) 0,75–200 3~ (525–690) 2,2...200	Скалярное и векторное управление	0...7200	AI — 2 DI — 6 (базовая плата OPT—A8)	AO — 1 DO — 1 (базовая плата OPT—A8)	Внешний или встроенный тормозной резистор	200	RS232, RS-485, Profibus DP, CANopen, DeviceNet, Ethernet	NC1131-3 Engineering, NCLoad, NCDrive
9	F5 General (KEB)	3~ (180–280) 0,37...75 3~ (305–500) 0,37...315	Векторное управление	0...1600	AI — 2 DI — 8	AO — 2 RO — 2 (СК) DO (OK)—2	Торможение постоянным током	150	ProfibusDP, Interbus, CAN, DeviceNet, KEB-HSP 5	COMBIVIS 5
10	VAT2000 (GE Power Controls)	3~ (200–230) 0,4...37 3~ (400–460) 1,7...75 3~ (400–460) 100...450	Вольт-частотное, векторное управление	0...440 (вольт-частотное), 0...120 (векторное)	DI — 8 RI — 2	AO — 2 RO — 2 (СК) DO — 3 (OK)	Торможение постоянным током	120...150	ProfibusDP, RS232/RS-485	Power DriveAid-1
11	Movidrive MDV (SEW Eurodrive GmbH)	3~ (380–500) 1,5...90	Векторное управление	0...400	AI — 1 DI — 6	RO — 1 (СК) DO — 2 (OK)	Торможение постоянным током	50	Profibus DP, Interbus, CAN, CANopen, DeviceNet, RS-485	MOVI Tool

№ п/п	Тип (фирма)	Напряжение (В), мощность (кВт)	Режим управления двигателем	Диапазон выходной частоты, Гц	Входы	Выходы	Способ торможения	Перегрузочная способность, %	Интерфейс	Программное обеспечение
12	VLT 5000 (Danfoss)	3~ (200–240) 0,75...37 3~ (380–500) 0,75...400	Вольт-частотное, векторное управление	0...1000	AI — 3 DI — 8	AO — 2 DO — 2 (OK) RO — 2 (СК)	Торможение постоянным током	150	RS-485, ProfibusDP, Interbus, DeviceNet, Modbus +, Modbus RTU, LonWorks	VLT Motion Control Tool (MCT 10)
13	Commander SX (Control Techniques)	1~ (200–240) 0,25...2,2 3~ (200–240) 0,75...7,5 3~ (380–480) 0,75...37	Вольт-частотное, векторное управление	0...1000	AI — 2(3) DI — 4(6)	AO — 1 RO — 1 (СК) DO — 1(2) (OK)	Торможение постоянным током	150	RS-485, ProfibusDP, Interbus, DeviceNet, CANopen	CT Soft
14	VFD-V (Delta Electronics Inc.)	3~ 380 (0,75...75)	Вольт-частотное, векторное	0...600	AI — 3 DI — 8	AO — 1 DO — 2 RO — 2	Торможение постоянным током	150...200	RS-485	VFD Communication Program
15	Varispeed F7 (Yaskawa Electric Corp.)	3~ (380–400) (0,4...160)	Вольт-частотное, векторное	0...400	AI — 1 DI — 7	AO — 1 RO — 3	Торможение постоянным током	150	RS-485, ProfibusDP, Interbus, DeviceNet, CANopen	Custom Application Software Environment (CASE)
16	Starvert iH (LG Industrial Systems)	3~ (220–230) 30...55 3~ (380–460) 30...220	Вольт-частотное, векторное управление	0,5...400	A/D — 6 (программируемая)	AO — 1 DI — 3, RO — 2	Торможение постоянным током	150	RS-485, DeviceNet, F-Net, Profibus DP, Modbus-RTU	Driveview 2.0

ности за счет использования энергии вспомогательного источника. В состав сервопривода входят сервоусилитель, серводвигатель и датчик обратной связи. Таким образом, сервомеханизм представляет собой звенья замкнутой динамической системы автоматического регулирования с обратной связью. Сервопривод осуществляет высокоточное отслеживание входного сигнала в зависимости от изменения которого происходит перемещение регулирующего органа системы управления. В

качестве задающего сигнала может быть, например, угол поворота командного вала, угловая скорость командного вала или напряжение потенциометра. Сигнал рассогласования в этих случаях усиливается и прилагается к одной из обмоток возбуждения серводвигателя, управляемый вал которого поворачивается до положения, когда рассогласование не станет равным нулю. При этом за счет инерционности и запаздывания может наблюдаться колебательный процесс установления выходной величины. Поэтому оптимальная настройка выходного параметра достигается за счет настройки таких величин, как коэффициент усиления, чувствительность, запаздывание, демпфирование и др.

В качестве силового привода сервосистемы используются обычно электродвигатели переменного (постоянного) тока, гидро- или пневмосистемы.

Динамические характеристики сервопривода в составе следящей системы должны согласовываться с динамическими характеристиками других звеньев системы.

Основные требования, предъявляемые к сервоприводу, призваны обеспечить необходимые показатели качества и прежде всего быстродействие и точность позиционирования. Поскольку сервопривод должен воспроизводить управляющие сигналы с высокой точностью без искажений, особое внимание при проектировании или выборе сервопривода уделяется не только статическим и динамическим характеристикам сервопривода, но и характеристикам объекта управления и промежуточных звеньев системы.

Помимо быстродействия и точности к характеристикам сервопривода относят мощность серводвигателя, номинальный крутящий момент, скорость вращения и момент инерции.

Быстродействием сервопривода называется время перехода сервопривода из одного установившегося состояния в другое при подаче на вход системы единичного ступенчатого воздействия.

Точность сервопривода определяется ошибкой установления сервоприводом нового состояния равновесия. На показатель точности влияют автоколебания в системе, наличие люфтов, трения и пр.

Таблица 1.68. Характеристики сервоприводов фирмы *Mitsubishi Electric*

Тип сервопривода	Тип серводвигателя	Мощность серводвигателя, кВт	Номинальный вращающий момент, Н·м	Скорость вращения, об/мин
MR-J3 <i>Mitsubishi Electric</i>	HF-SP	0,5...7	2,4...33,4	2000/3000
	HF-KP	0,05...0,75	0,16...24	3000/6000
MR-J3 <i>Mitsubishi Electric</i>	HC-SFS	0,5...7	2,4...33,4	2000/2500
	HF-RFS	1,0...5	3,18...15,9	3000/4500
	HC-KFS	0,05...0,75	0,16...2,4	3000/4500

Мощность серводвигателя — это предельная выходная мощность, развиваемая сервоприводом, находящимся под номинальной нагрузкой. Под номинальной нагрузкой понимается момент (усилие), развиваемое сервоприводом, работающим с максимальной полезной мощностью.

Коэффициент полезного действия сервопривода есть отношение максимальной полезной мощности, развиваемой на выходе серводвигателя, к потребляемой мощности от сети.

Помимо этих основных характеристик при исследовании сервопривода используются и ряд др. характеристик, свойственных замкнутым системам автоматического регулирования. К ним относятся постоянная времени сервопривода, время запаздывания, время установления номинальной скорости и др., а также конструктивные характеристики, определяемые габаритами и массой сервопривода.

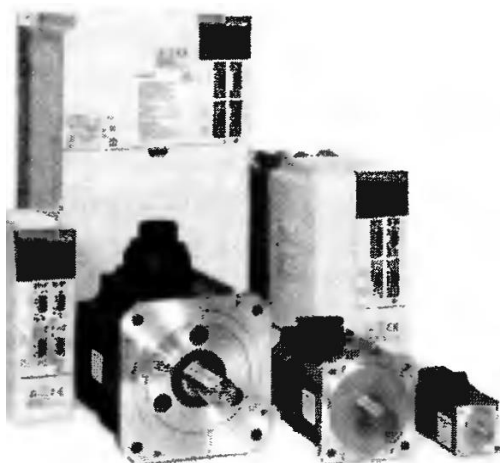


Рис. 1.108

В табл. 1.68 приведены технические характеристики сервоприводов фирмы Mitsubishi Electric. Сервоприводы применяются для точного позиционирования датчиков систем управления, в следящих системах, системах перемещения исполнительных устройств в станках ЧПУ и в др. устройствах. На рис. 1.108 приведен общий вид сервоприводов MELSERVO MR-J2S фирмы Mitsubishi Electric.

1.10.4 Шаговые двигатели и устройства управления

Шаговые двигатели (ШД) широко используются для управления станками с ЧПУ, в качестве маломощных приводов роботов и манипуляторов, для приборов управления позиционированием, в приборах телемеханики и вычислительной техники.

Шаговые двигатели работают в комплекте с контроллерами, выполняющими функции логических устройств и электронных коммутаторов. Функциональная схема ШД приведена на рис. 1.109.



Рис. 1.109

Формирователь импульсов (ФИ) преобразует входные импульсы произвольной формы в прямоугольные импульсы определенной длительности. Электронный коммутатор (ЭК) преобразует импульсы в напряжение, подаваемое через усилитель мощности (УМ) на обмотки статора ШД.

Шаговый двигатель состоит из зубчатых статора и ротора, сердечники которых выполнены из магнитомягкой стали. При возбуждении соответствующей фазы ШД постоянным током его ротор поворачивается на фиксированный угол, называемый углом шага или шагом. Величина шага различна для различных моделей ШД. Таким образом, в ШД цифровой сигнал преобразуется в механическое перемещение ротора ШД [1.121].

Шаговые двигатели имеют ряд достоинств, а именно:

отсутствует обратная связь, необходимая для управления положением вала в электроприводах;

- 45) удобство управления с помощью цифровых систем управления;
- 46) высокая точность частоты вращения (положения вала ротора).

За каждый импульс ШД поворачивается на фиксированный угол. Чем меньше шаг, тем больше частота вращения. Число шагов за один оборот вала называется шаговым числом. Шаговое число $S=360/\alpha$, где α — угол шага двигателя.

Применяются 3- и 4-фазные двигатели с величиной шага $1,8^\circ$; 2° ; $2,5^\circ$; 5° ; $7,5^\circ$; 15° . Известны ШД с шаговым углом $0,72^\circ$. Обычно 4-фазные ШД имеют шаговое число 200. Кроме того, используются ШД с постоянными магнитами. Частота вращения ШД (шаговая частота вращения) задается числом шагов в секунду и может обозначаться в Гц.

Различают однополярное управление, при котором напряжение на каждой фазе изменяется от 0 до +U и двухполярное управление — напряжение изменяется от -U до +U. Кроме того, управление ШД называется импульсным, когда напряжение на фазу или группу фаз подается в момент поступления сигнала, а по истечении определенного времени фаза обесточивается. Зубцы ротора такого ШД устанавливаются по оси зубцов статора за счет реактивного момента. Другой способ управления называется потенциальным управлением, при котором напряжение на фазе (группе фаз) сохраняется неизменным вплоть до прихода управляющего импульса. Положение ротора при этом фиксируется магнитным полем фазы, находящейся под напряжением [1.120].

Напряжение, приложенное к фазе ШД, определяется уравнением

$$U_{\phi} = r_{\phi} I_{\phi} + d\psi_{\phi} / dt$$

где r_{ϕ} и I_{ϕ} — активное сопротивление и ток фазы; ψ_{ϕ} — потокосцепление фазы (зависит от конструкции ШД и способа коммутации обмоток статора).

Режимы работы ШД подразделяют на статический, квазистатический, резонансный и установившийся режимы.

В статическом режиме ($f_{\text{имп}} = 0$) по статорным обмоткам протекает постоянный ток, создающий неподвижное поле статора, при котором ротор ШД неподвижен.

В квазистатическом режиме при низких частотах ($f_{\text{имп}} < f_0$) ШД работает в режиме отработки единичных импульсов. Переходные процессы, характеризующиеся периодом собственных колебаний ротора при отсутствии нагрузки на валу $T_0 = 1 / f_0 = 2 \pi / \omega_0$, где f_0 — частота собственных колебаний ротора, угловая частота которых ω_0 зависит от момента инерции ротора, числа пар полюсов и статического момента. Все переходные процессы затухают к началу каждого следующего шага, а положение ротора устойчивое.

Резонансный режим ($f_{\text{имп}} = f_0$) является неустойчивым. Для снижения колебаний ротора в области резонансных частот применяется его торможение за счет встречной коммутации фаз ШД.

Установившийся режим ($f_{\text{имп}} > f_0$) характеризуется установившейся средней частотой вращения ротора. Помимо этих режимов работа ШД характеризуется переходными режимами (пуск, торможение, реверс).

Для каждого типа ШД существует предельная частота коммутации или частота приемистости (f), которая для современных ШД находится в пределах от 100 до 1000 Гц.

Согласно классификации ШД делятся на реактивные, с постоянными магнитами и гибридные [1.121].

Реактивные ШД. Принцип работы ШД приведен на рис. 1.110. Статор этого трехфазного ШД имеет 6 зубцов. Каждые два противоположных зубца, отстоящие друг от друга на 180° , образуют фазу. Катушки каждой фазы могут быть соединены последовательно или параллельно. Когда фаза возбуждена (замкнут один из переключателей S_1 , S_2 или S_3), в зубцах фазы возникает вращающий момент, приводящий к тому, что зубцы ротора (в данном случае их 4) устанавливаются на одной прямой с возбужденными зубцами статора. Это положение называется положением равновесия, когда магнитное сопротивление является минимальным. При этом зубцы I, II и III в возбужденном состоянии представляют северный полюс, а I' , II' и III' — южный. Если отключить фазу I и возбудить фазу II, то возникнет магнитный поток, создающий «натяжение» магнитных силовых линий. В результате этого магнитное сопротивление увеличивается и под действием возникшего вращающего момента ротор повернется на угол 30° . После выполнения ротором трех шагов он вернется в исходное положение.

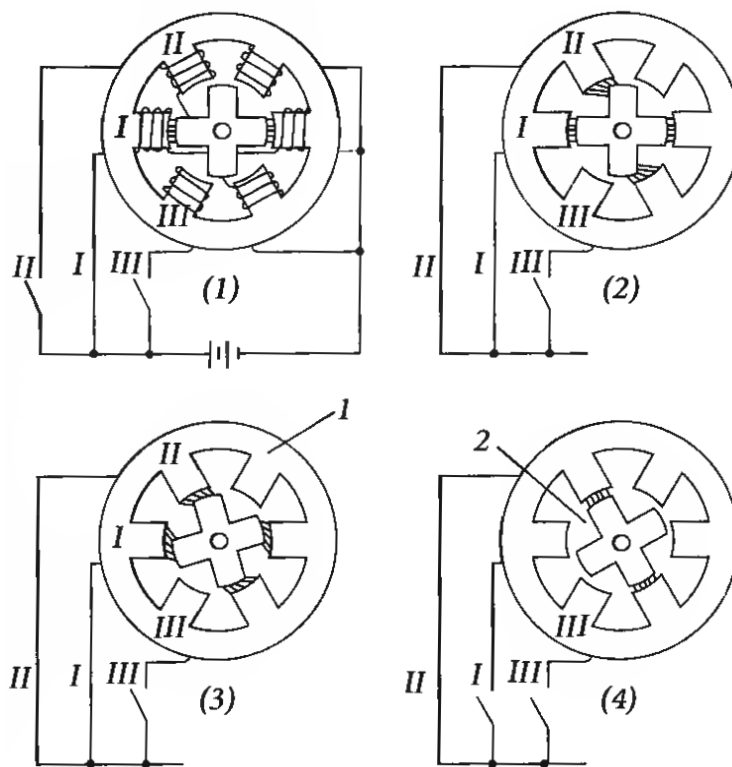


Рис. 1.110

Помимо величины шага в градусах к основным параметрам ШД относятся:

- Максимальный статический (удерживающий) момент в Н·м. Это момент, который может быть приложен к валу возбужденного ШД без последующего его вращения.
- Фиксирующий момент — максимальный статический момент, приложенный к валу невозбужденного ШД без его последующего вращения (Н·м) для ШД с постоянными магнитами.
- Точность позиционирования (погрешность углового шага) в градусах или процент от полного оборота (ошибка для реактивного ШД с шагом 15° составляет около $\pm 0,1^\circ$).
- Отношение крутящего момента (г·см) к моменту инерции ротора ($\text{кг} \cdot \text{м}^2$); это отношение должно быть большим, чтобы при подаче входного импульса ротор ШД смог повернуться с максимальным ускорением, а при прекращении последовательности импульсов — остановиться в положении, определяемым последним импульсом.
- Шаговая частота вращения (число шагов в секунду) и частота импульсов, выраженные в Гц. Для перехода к частоте вращения n в об/мин используется формула: $n = 60 f / S$, где f — шаговая частота вращения, S — число шагов.
- Ток фазы (А), сопротивление фазы (Ом), индуктивность фазы (мГн), напряжение питания (В). Эти данные определяются типом ШД и приводятся в характеристиках ШД.

Для реактивных ШД в целях увеличения крутящего момента, высокой точности позиционирования и уменьшения габаритов воздушный зазор между статором и ротором должен быть минимальным (обычно он находится в пределах 30... 100 мкм). Также желательно иметь малый угол шага, что достигается увеличением числа зубцов статора и ротора. Известны четырехфазные ШД с числом зубцов ротора равным 50 и числом шагов 200.

Число шагов S в зависимости от числа фаз m и числа зубцов ротора N_p определяется формулой: $S = m \cdot N_p$. Число шагов S при известном угловом шаге Q_s определяется значением: $S = 360 / Q_s$.

Помимо рассмотренных одноpaketных реактивных ШД, в которых фазы выполнены в виде одного слоя (пакета), применяются многоpaketные реактивные ШД.

Шаговые двигатели с постоянными магнитами. В этих ШД ротор представляет собой цилиндрический постоянный магнит, а статор имеет 4 зубца с обмотками — фазы 1...4 (рис. 1.111).

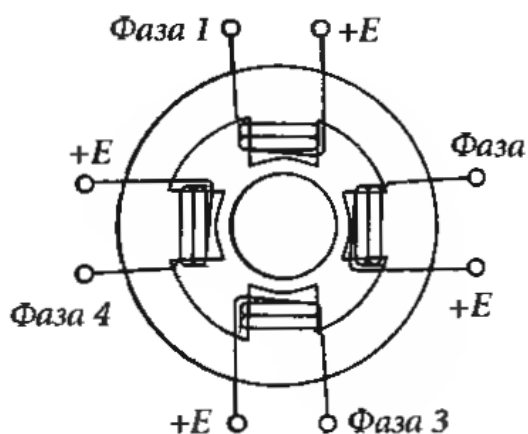


Рис. 1.111

При возбуждении фаз в последовательности 1-2-3-4 ротор будет поворачиваться по часовой стрелке с угловым шагом 90° . При удвоении числа зубцов статора угол шага будет 45° .

Поскольку намагниченность постоянных магнитов невысокая, крутящий момент ШД с постоянными магнитами ограничен.

Гибридные ШД. В ШД этого типа используются принципы как реактивного, так и ШД с постоянными магнитами. В 4-фазном гибридном ШД на полюсе статора располагаются не одна обмотка фазы, а две обмотки двух различных фаз, намотанных по бифилярной схеме. При возбуждении катушки создают магнитные потоки различной полярности. Ротор представляет собой цилиндрический постоянный магнит, на каждый из полюсов которого надет сердечник ротора с зубцами. Крутящий момент создается за счет взаимодействия магнитных полей катушек и постоянного магнита ротора. Гибридные ШД применяются там, где требуется малый угловой шаг. Наибольшее применение находят 4-фазные гибридные ШД с числом шагов 200 и углом шага $1,8^\circ$. В работе [1.121] приведены примеры др. типов гибридных ШД — гибридные ШД с постоянным магнитом в статоре, ШД с внешним ротором и др. Основные характеристики шаговых двигателей приведены в табл. 1.69.

Таблица 1.69. Характеристики шаговых двигателей

Тип	Рабочий ток (фаза), А	Сопротивление (фаза), Ом	Индуктивность (фаза), мГн	Крутящий момент, кгс·см
Гибридные шаговые двигатели с угловым шагом $1,8^\circ$				
FL20STH30	0,6	6,5	1,7	0,18
FL39ST20	0,5	13	7,5	0,8
FL57STH41	2,8	0,7	1,4	5,5
FL110STH201	8	0,5	11	300
ДШР60-0,1-1,8	2	0,66	1,3	0,3...16 Н·м
Шаговые двигатели с постоянными магнитами с угловым шагом $7,5^\circ$				
PM 2515-01	0,5	10	2,7	0,11
PM 3522-01	0,5	60	77,5	0,55
PM4222-02	1,27	15	49,8	1,1

1.10.5 Энкодеры

Энкодером называется устройство для преобразования углового или линейного перемещения в цифровой код (двоичный, код Грея и др.). Принцип действия энкодеров заключается в фотоэлектронном сканировании оптических кодов.

Для контроля угловых перемещений в датчиках скорости вращения, ускорения, положения, углов и пр. используются угловые или поворотные кодирующие устройства, для контроля перемещений — линейные.

По способу преобразования энкодеры делятся на инкрементные и абсолютные энкодеры. Инкрементные энкодеры (энкодеры приращений) определяют приращение относительно начального фиксированного (базового) положения. Абсолютные энкодеры формируют выходной сигнал, определяющий абсолютную величину углового или линейного перемещения.

Как инкрементные, так и абсолютные энкодеры могут быть одно- или многооборотными.

Принцип действия инкрементного энкодера заключается в формировании с помощью источника света (инфракрасных светодиодов) световых потоков, проходящих через защитную диафрагму и поступающих на фотодиодную матрицу и далее к микропроцессору (рис. 1.112). В зависимости от угла поворота на выходе формируется код, соответствующий определенной позиции вала энкодера. Число импульсов за один оборот вала для различных типов энкодеров достигает от 2048 до 10000. Число импульсов, соответствующих углу поворота вала, подсчитывается счетчиком. Точность измерения угла поворота составляет несколько тысячных градуса, а при измерении линейных смещений — доли миллиметра.

Абсолютные энкодеры формируют уникальный код для каждой позиции вала. При этом счетчик импульсов не требуется, так как угол поворота вала определен в каждый момент времени. Диск абсолютного энкодера имеет несколько концентрических дорожек, каждая из которых формирует уникальный цифровой код для каждой позиции вала. Абсолютный энкодер сохраняет значение сигнала при потере питания, устойчив к вибрациям и практически не подвержен помехам.

Однооборотный (single-turn) энкодер выдает абсолютное значение параметра в пределах одного оборота. После каждого оборота значение кода возобновляется с его начального значения.

Многооборотный (multi-turn) энкодер (рис. 1.113) имеет встроенный передаточный механизм (редуктор) из нескольких кодовых оптических дисков и способен

фиксировать не только угол поворота, но и число оборотов вала. Многооборотные энкодеры способны фиксировать до 4096 оборотов вала.

Для определения направления вращения вала энкодера по часовой стрелке (CW) или против часовой стрелки (CCW) используются два выходных канала (А и В).

Для определения точностных характеристик энкодера рассматривается разрешение энкодера — число выходных импульсов за оборот вала и количество двоичных слов за

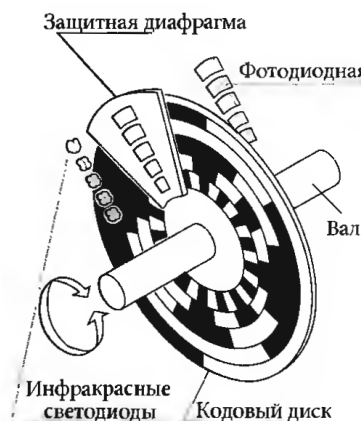


Рис. 1.112

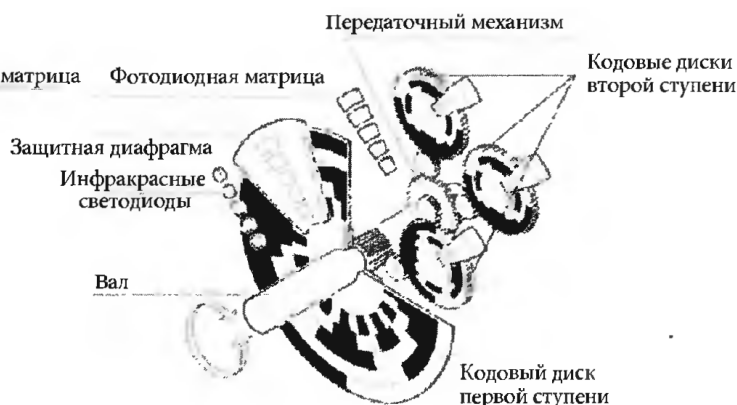


Рис. 1.113

Для линейных перемещений используются энкодеры на диапазон измерений от 30.. 40 мм до 1700 мм и более. Разрешение при этом составляет 0,1 мм и менее. В качестве выходных интерфейсов широко используются RS-422, Profibus и CANopen. У большинства энкодеров степень защиты не хуже IP65 и IP67.

Энкодеры выпускаются многими фирмами, среди которых Omron, SICK, Siemens, Lenie&Linde, Fagor и др.

В табл. 1.70 приведены характеристики энкодеров фирмы Lenie&Linde (Швеция).

Таблица 1.70. Характеристики энкодеров фирмы *Lenie&Linde* (Швеция)

Тип энкодера ¹	Кол-во имп./об	Диапазон частоты, кГц	Тип выхода	Питание, VDC	Потребляемый ток (максим.), мА	Диаметр корпуса, мм
RS 310	25...1200	0...200	TTL	5/9...30	70	30
RS 510	1...2500	0...100	TTL	5/9...35	55	58
RS 560	1...5000	0...200	TTL, RS422	5/9...30	45	68
DUO 525	5000	0...200	TTL, 2xRS422	5/9...30	90	68
XH 860	2048	0...100	HTL	5/9...30	60	100
TACHO	10 бит на 360°	—	4...20 мА	9...36	60	89

¹ Степень защиты по IEC 529 для RS 310 составляет IP67, для остальных — IP65. Допустимая вибрация <100 м/с² (50...2000 Гц), ударопрочность <1000 м/с², температура окружающей среды -25...+75 °С.

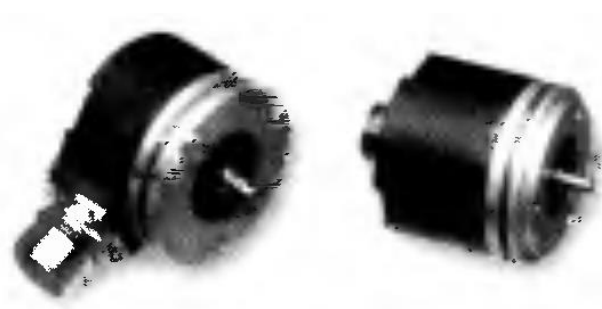


Рис. 1.114

Новая линейка энкодеров фирмы Lenie&Linde имеет расширенный температурный диапазон до $+100^{\circ}\text{C}$ (RSI504, RHI504), рабочая температура энкодеров серии 500 составляет $-40\ldots+70^{\circ}\text{C}$, вибрации до 300 м/с^2 . Энкодеры фирмы **Lenie&Linde** Profibus DP и CANopen повышенной точности (8192 дискрета) способны контролировать до 4096 оборотов. Серия энкодеров 800 предназначена для эксплуатации в тяжелых условиях производства. На рис. 1.114 приведен общий вид энкодеров фирмы **Lenie&Linde**.

1.10.6 Пневматические исполнительные механизмы

Пневматические исполнительные механизмы (ПИМ) наиболее эффективно работают в пожаро- и взрывоопасных производствах, в условиях агрессивных сред, характеризующихся наличием повышенной температуры, радиации, вибрации, магнитных полей и пр. Пневматические устройства просты по конструкции, надежны в эксплуатации и обслуживании. Как правило, пневматические системы дешевле электрических и гидравлических систем, а по сравнению с последними не требуют замкнутого цикла использования рабочей среды.

Наряду с перечисленными достоинствами пневматические системы имеют и ряд недостатков, обусловленных самой рабочей средой. Это прежде всего сжимаемость воздуха, которая подчас исключает плавность движения рабочих органов исполнительных устройств, а также необходимость очистки воздуха во избежание появления конденсата. Кроме того, пневматические устройства, по сравнению с электрическими, имеют меньшую скорость срабатывания, а по сравнению с гидравлическими исполнительными механизмами развивают значительно меньшие усилия.

Существуют определенные ограничения на длину трассы от регулятора до ПИМ во избежание больших запаздываний (примерно до 300 м).

Устройства пневмоавтоматики можно классифицировать по функциональному назначению (системы подготовки и транспортирования воздуха, датчики, пре-

образователи, измерительные и регистрирующие приборы, регуляторы, функциональные блоки, исполнительные устройства) и по давлению питания (системы низкого, нормального и повышенного давления). К исполнительным устройствам относятся пневмоцилиндры, поворотные однооборотные и многооборотные двигатели, мембранные, шланговые и сильфонные исполнительные механизмы [1.122-1.132].

Системы с повышенным давлением питания представляют собой пневмопривод и предназначены для силового воздействия на рабочие органы машин. В качестве управляющих устройств в таких системах в основном применяются клапанные или золотниковые распределители, а в качестве двигателей — пневмоцилиндры поступательного действия, поворотные и многооборотные двигатели.

В зависимости от типа привода ПИМ делят на мембранные и поршневые исполнительные механизмы. Мембранный исполнительный механизм в качестве преобразователя давления сжатого воздуха в перемещение штока и связанного с ним РО использует герметичную мембранную камеру с мембраной из резинотканевого материала. На мембрану действуют сила давления от командного прибора, с одной стороны, и сила противодействия возвратной пружины, с другой стороны. Условие равновесия этих сил выражается равенством

$$\Delta P \cdot F_{\text{эф}} = cS,$$

где: ΔP — разность давлений на мембране; $F_{\text{эф}}$ — эффективная площадь мембраны; c — жесткость пружины; S — величина хода мембраны.

Мембранные исполнительные механизмы представляют собой механизмы прямого действия (движение штока вниз) и обратного действия. При этом в зависимости от конструкции РО обеспечивается исполнение механизма НО (нормально открыт) или НЗ (нормально закрыт).

Статические характеристики мембранных исполнительных механизмов близки к линейным, однако они обладают зоной гистерезиса, составляющей до 10... 15% от наибольшего значения командного сигнала. Для уменьшения зоны гистерезиса мембранные исполнительные механизмы комплектуются позиционером, который представляет собой усилитель с обратной связью по положению штока. Управляющий сигнал поступает в область мембраны позиционера, перемещение которой через золотник регулирует расход и давление воздуха, поступающего к мембранной камере мембранного исполнительного механизма. Перемещение основной мембраны ИМ через толкатель и пружину отрицательной обратной связи уравнивает

вают силу, действующую на мембрану позиционера. Позиционер обеспечивает точность позиционирования около 0,5% от диапазона регулирования. Для надежной работы позиционера необходимо стабилизировать давление воздуха, поступающего к позиционеру, и обеспечить его фильтрацию.

Поршневые исполнительные механизмы применяются в тех случаях, когда от ИМ необходимо получить перемещение РО на значительное расстояние. Поршневые исполнительные механизмы имеют зону нечувствительности не более 1%. Силовая часть пневмопривода содержит пневмоцилиндр, шток которого соединен с РО. При цикловом управлении приводом происходит перемещение исполнительного механизма из одной крайней точки в другую. Для контроля положения поршня пневмоцилиндра в настоящее время вместо концевых выключателей используется магнитный датчик, устанавливаемый непосредственно на корпусе пневмоцилиндра, и магнит, установленный в поршне [1.133,1.134].

В настоящее время ряд зарубежных фирм, таких как FESTO (Германия), SMS (Япония), ENOTS (Англия), SAMSON (Германия), HI-FLEX (Финляндия), ASCO/Joucom — Tic (Нидерланды), PARKER, CAMOZZI и др., имеющие свои представительства во многих развитых странах, сосредоточили в своих руках разработку и выпуск оборудования пневмоприводов, управляемых от ПЭВМ и контроллеров. В этих фирмах налажен массовый выпуск основных компонентов силовых пневмосистем, в состав которых входят технические средства подготовки сжатого воздуха, пневмораспределители, пневмоцилиндры и контрольно-измерительная аппаратура.

Фирма SAMSON выпускает большую серию регулирующих клапанов (проходных, трехходовых, угловых), пневматические и электропневматические позиционеры, электропневматические и пневмоэлектрические преобразователи, датчики положения, концевые выключатели и пр. К числу выпускаемых цифровых позиционеров относятся HART-позиционер, PROFIBUS-PA- позиционер и FOUNDATION Fieldbus-позиционер. На рис. 1.115 представлен общий вид клапана с электропневматическим позиционером 3730-2 фирмы Samson.

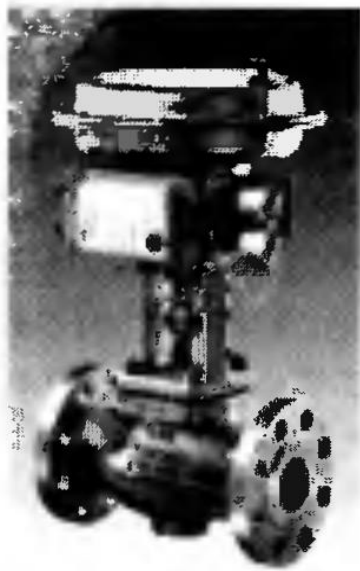


Рис. 1.115

Среди отечественных производителей отметим ПНФ «ЛГ автоматика», которая выпускает отсечные (запорные), регулирующие-отсечные и клеточные регулирующие клапаны с D_y от 10 до 200 мм и условной пропускной способностью от 0,06 до 630 м³/ч на условное давление от 1,6 до 16 МПа (марки КМР, КМО, КМРО), футерованные клапаны для агрессивных сред (УИФ, МИУФ), клапаны высокого давления до 40 МПа (КВДР, КВДО), виброустойчивые угловые клапаны, регулирующие клапаны для малых расходов (ПОУ-7М, -8М, - 9М) и др.

Для взрывоопасных производств клапаны комплектуются позиционерами SIPART PS2 фирмы Siemens. На рис. 1.116 показан клапан ПОУ-8М с позиционером SIPART PS2.

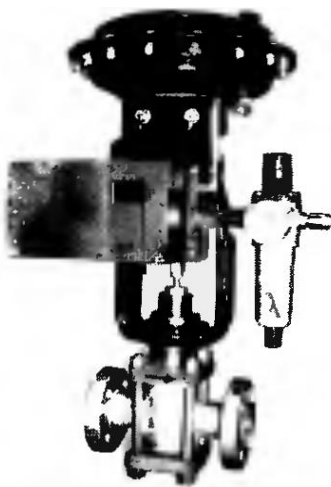


Рис. 1.116

Характеристики пневмоприводов находятся в пределах: диаметр поршня 0,008...0,5 м, величина перемещения штока с поршнем до 3 м, давление питания в

пределах 0,4... 1,0 МПа (в отдельных случаях до 10 МПа), скорость перемещения до 3 м/с, число циклов доходит до 10 млн.

В настоящее время ввиду достижения высоких показателей надежности и безопасности исполнительные устройства пневмоавтоматики находят широкое применение при создании промышленных роботов, управляемых программируемыми логическими контроллерами с помощью электропневматических преобразователей.

Как в России, так и за рубежом ряд фирм США, Франции, Японии, Италии, Швеции и др. стран выпускают гамму роботов с пневмоприводом для обрабатывающих и сборочных производств. Это роботы PM-12 фирмы KIKI, MNU 500 фирмы BOSH (Германия), UNIMATE фирмы KAWASAKI (Япония), E-401 фирмы VERSA-TRAN (Япония), AUTOPLACE фирмы AUTO-PLACE (США), MECMAN (Франция) и др. Современные сборочные роботы имеют цифровой пневмопривод и систему управления, обеспечивающую связь рабочего цикла сборочного робота с циклом работы обслуживаемого технологического оборудования. Такие роботы успешно применяются в гибких производственных системах (ГПС) сборочных машиностроительных производств [1.128-1.132] и наряду с другим оборудованием входят в интегрированные производственные системы, управляемые с помощью ЭВМ. Это основное направление, в котором совместно с электро- и гидроприводом будут совершенствоваться и применяться пневматические системы управления.

1.10.7 Гидравлические исполнительные механизмы

Гидравлические исполнительные механизмы или гидропривод имеют перед пневматическими исполнительными механизмами ряд преимуществ, к которым следует отнести более высокую мощность и быстродействие, малую удельную массу (масса гидропривода, отнесенная к передаваемой мощности, кг/кВт), защиту от перегрузок и большую надежность. Основным недостатком гидроприводов является их пожароопасность, большие затраты на рабочую жидкость (масло), чувствительность к загрязнению рабочей жидкости и снижение КПД по мере износа движущихся частей. Поэтому гидроприводы не используются в пожаро- и взрывоопасных производствах, в частности в химической и нефтеперерабатывающей промышленности [1.135-1.142].

Гидроприводом называют совокупность гидромашин, гидроаппаратуры, трубопроводов и вспомогательных устройств, предназначенных для передачи энергии и преобразования движения посредством жидкости.

К числу гидромашин относятся насосы (в данной работе не рассматриваются) и гидродвигатели. Гидродвигатели подразделяются на гидродвигатели поступательного движения на базе поршневых устройств (гидроцилиндров), гидродвигатели ограниченного поворота выходного звена (применяются в промышленных роботах) и гидромоторы или гидродвигатели с непрерывным вращением выходного звена (применяются в подъемных и поворотных устройствах). Поршневые исполнительные механизмы подразделяются на механизмы одностороннего и двустороннего действия (рис. 1.117).

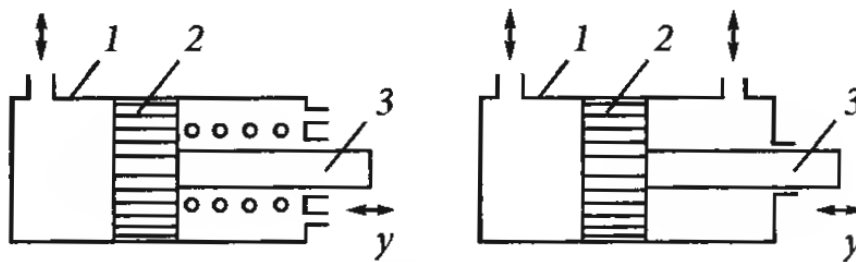


Рис. 1.117

В гидроцилиндрах одностороннего действия жидкость под давлением от насоса поступает к цилиндру 1 с одной стороны поршня 2 со штоком 3, а в гидроцилиндрах двустороннего действия — с двух сторон. При анализе гидравлических САП принято рассматривать гидравлический исполнительный механизм как единую систему, включающую управляющие устройства и соединительные трубопроводы. В качестве управляющих устройств используются золотниковые преобразователи, преобразователи типа «сопло-заслонка» и др. При этом входной величиной системы является перемещение подвижных элементов управляющего устройства (плунжера золотника или заслонки), а выходной — перемещение штока исполнительного механизма.

Характеристики гидроцилиндров: диаметр поршня составляет 80, 120 и 150 мм, максимальный ход поршня 250...300 мм, время перемещения поршня до 25 с.

Гидроаппаратура — это дроссели, клапаны и гидрораспределители, служащие для управления гидроприводом. Дросселем называется устройство, регулирующее расход рабочей жидкости в зависимости от перепада давления до и после дросселя. Клапаны представляют собой устройства, изменяющие под действием потока рабочей жидкости проходное сечение клапана. По назначению клапаны делятся на напорные и редукционные (для стабилизации давления рабочей жидкости

независимо от расхода), проходные (для сбрасывания излишнего давления жидкости), обратные (для движения жидкости только в одном направлении).

Гидрораспределители служат для изменения направления движения потоков рабочей жидкости. В основном применяются золотниковые гидрораспределители.

К вспомогательным устройствам относятся устройства, служащие для фильтрации и нагрева/охлаждения рабочей жидкости. Также к вспомогательным устройствам относятся гидробаки.

В промышленности получил применение регулируемый гидропривод, в котором скорость выходного звена может изменяться по заданному закону. Для этого используются два вида регулирования — дроссельное и объемное. При дроссельном регулировании скорость выходного звена изменяется дросселированием потока рабочей жидкости с отводом части потока через дроссель или клапан, минуя гидродвигатель. При объемном регулировании скорость выходного звена изменяется за счет изменения рабочего объема гидродвигателя.

Принцип наиболее часто используемого дроссельного регулирования заключается в том, что часть жидкости от насоса отводится через дроссель или клапан на слив, минуя гидродвигатель. Схемы гидроприводов с дроссельным управлением приведены на рис. 1.118 [1.141]. На рисунке обозначены гидродвигатель 1, гидрораспределитель 2, дроссель 3, переливной клапан 4, нерегулируемый насос 5. Дроссель может быть установлен на входе в гидродвигатель (рис. 1.118, а), на выходе (рис. 1.118, б) или одновременно на входе и выходе (рис. 1.118, в). При полном открытии дросселя скорость поршня гидроцилиндра максимальная. По мере уменьшения открытия дросселя давление перед ним повышается, клапан 4 приоткрывается и часть жидкости от нерегулируемого насоса 5 идет на слив. При полном закрытии дросселя скорость поршня становится равной нулю, а вся жидкость от насоса идет через клапан на слив в бак.

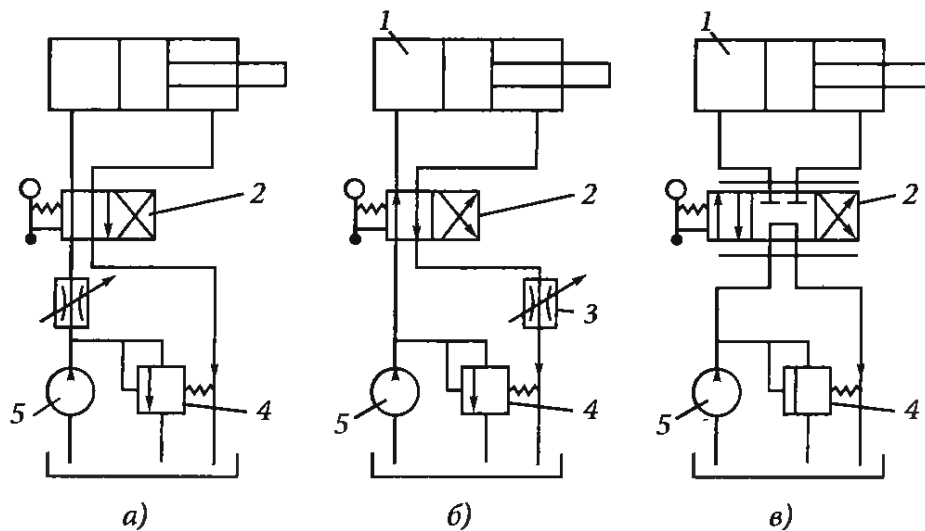


Рис. 1.118

Связующим звеном между электронной схемой управления, получившей наибольшее применение ввиду более высокой точности, быстродействия, многоканальности, и гидродвигателями являются электрогидравлические усилители (преобразователи). К их числу относятся:

- электромеханические преобразователи (с перемещающейся катушкой или перемещающимся якорем) электромагнитного типа. Принцип действия основан на взаимодействии магнитного поля, создаваемого током управления, с подвижным якорем, помещенным в магнитное поле.
- однокаскадные усилители мощности, к которым относятся усилитель мощности типа сопло-заслонка, струйная трубка, клапанного типа (шариковые, конусные и тарельчатые клапана) и золотникового типа (2-, 3- и многопозиционные золотники с числом каналов управления от 2 до 5).
- двухкаскадные усилители мощности. В качестве 1-го каскада обычно используется сопло-заслонка, а в качестве 2-го каскада — золотниковый усилитель мощности. Выпускаются также усилители без обратной связи, с обратной связью по положению, с обратной связью по расходу и с обратной связью по давлению.
- пропорциональные усилители мощности — используются в гидромашинах со сложными циклограммами движений.

Гидролинии, используемые в гидроприводах, делят на всасывающие (рабочая жидкость движется к насосу), напорные (рабочая жидкость под давлением движется от насоса), сливные (рабочая жидкость движется в сливной гидробак). Среди гидробаков используются в основном гидробаки открытого типа.

В качестве рабочей жидкости в гидроприводах используется рабочая жидкость минерального происхождения: трансформаторное, веретенное или промышленное масло с вязкостью 10...40 сСт при температуре до 50°С. При более высоких температурах используются синтетические жидкости на кремнийорганической основе.

1.11. Приборы учета энергоносителей

К приборам учета энергоносителей относят средства учета тепловой энергии (тепловычислители и теплосчетчики), электрической энергии и мощности (электросчетчики и сумматоры энергии), расхода технических газов и газовых конденсатов, счетчики воды [1.143-1.149].

1.11.1 Теплосчетчики

Теплосчетчики предназначены для измерения и регулирования параметров тепловой энергии и теплоносителя в закрытых и открытых (водяных и паровых) системах теплоснабжения. Теплосчетчики применяются для коммерческого учета тепловой энергии и массы теплоносителя при расчетах между потребителем и теплоснабжающей организацией.

Принцип работы теплосчетчика состоит в измерении расхода, температуры и давления теплоносителя (воды или пара) в системах теплоснабжения с последующим расчетом по этим параметрам тепловой энергии и массы теплоносителя.

Теплосчетчики способны обеспечивать измерение и регистрацию параметров теплоносителя по 1...8 трубопроводам, а также передачу данных о текущих или усредненных среднечасовых, среднесуточных и других параметрах по интерфейсам RS-232, RS-485, CAN

Расчет основных параметров энергоносителя осуществляется с помощью тепловычислителей, являющихся составной частью теплосчетчиков. Тепловычислители рассчитаны на прием сигналов от датчиков расхода, давления, перепада давлений, температуры, градиента температур. Входными сигналами датчиков могут быть токовые сигналы (0...5 мА, 0/4...20 мА), сигналы напряжения (0,4...2 В.), частотные сигналы (0...1000 Гц), изменение сопротивления термометров сопротивления с НСХ 50М, 50П, 100М, 100П, 500П, Pt100, Pt500.

В состав теплосчетчиков, выпускаемых фирмами РФ, входят отечественные преобразователи расхода серии ВЗЛЕТ, ПРЭМ, СУР, ВСТ и др., преобразователи температуры ТСПУ-205, Метран-205, КТСПР, КТПТР и др., преобразователи давления Сапфир-22, Метран-55 и др., а также зарубежные преобразователи с унифицированными выходными сигналами фирм Danfoss, JUMO, Preetex и др. В составе

теплосчетчиков вместо преобразователей расхода с аналоговым или частотным выходным сигналом могут использоваться счетчики горячей воды крыльчатые ($D_u < 50$ мм) или турбинные ($D_u > 50$ мм) с дискретным выходным сигналом [1.147-1.149].

Принцип работы теплосчетчика основан на измерении сигналов от преобразователей расхода, температуры и давления в подающем и обратном трубопроводах и вычислении потребления количества тепла Q с использованием значений массового расхода G и разности энтальпий (теплосодержания) в подающем и обратном трубопроводах (h_1 и h_2 соответственно) по формулам:

$$Q = G_1 h_1 - G_2 h_2; Q = \int_{t_1}^{t_2} G (h_1 - h_2) dT$$

Единицы измерения параметров теплосчетчиков:

- количество теплоты: ГДж, Гкал;
- объемный расход теплоносителя: м³/ч;
- массовый расход теплоносителя: т/ч;
- объем теплоносителя: м³;
- температура теплоносителя: °С;
- избыточное давление в трубопроводах: МПа.

Помимо функций измерения и регистрации теплосчетчики осуществляют регулирование (поддержание) теплового режима и параметров теплоносителя в системах тепло- и водоснабжения. С помощью теплосчетчиков может быть задан температурный график отопления в зависимости от температуры наружного воздуха с дистанционным (или автоматическим) переводом системы отопления в режим с повышенным или пониженным теплоснабжением (ночной режим). При этом поддерживается определенная температура в контурах отопления и горячего водоснабжения. Уравнения измерения тепловой энергии и количества теплоносителя соответствуют МИ 2451-98.

На рис. 1.119, а приведен общий вид тепловычислителя СПТ961М «НПФ Логика», на рис. 1.119, б — теплосчетчика-регистратора «Взлет ТСП-М» ЗАО «ВЗЛЕТ», на рис. 1.119, в — тепловычислителя ВКТ-7 ЗАО «НПФ Теплоком» и на рис. 1.119, г — электромагнитного теплосчетчика КМ-5 «ТБН Энергосервис».

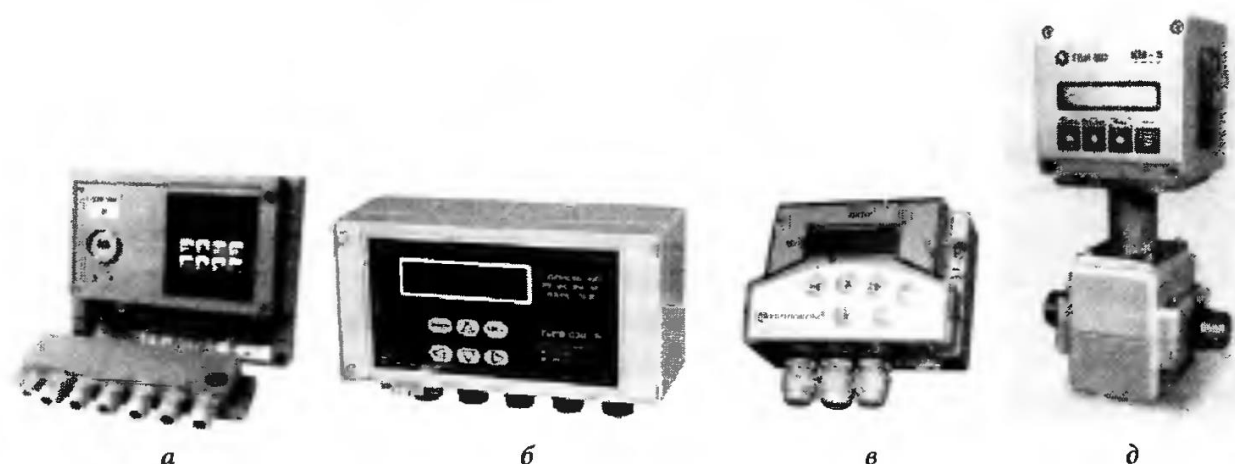


Рис. 1.119

В табл. 1.71 приведены технические характеристики отечественных теплосчетчиков.

Таблица 1.71. Характеристики отечественных теплосчетчиков

Тип теплосчетчика	Тип тепловычислителя	Диапазон и тип преобразователя			Погрешность, %	Выходной сигнал	Степень защиты
		расход	температура, °С	Давление, МПа			
Логика 961К (ЗАО «НПФ Логика»)	СПТ 961	0...105 м³/ч; ВЗЛЕТ-ЭР	0...160; КТПТР, КТСПР	0...1,6	±2	RS-232, RS-485	IP54
Взлет ТСП-М (ТСП-031) (ЗАО «ВЗЛЕТ»)	—	3×(0,01...1360) м³/ч, ВЗЛЕТ - ЭР 420Л	3×(0...180), «Взлет ТПС»	0...2,5	±2	RS-232, RS-485	IP54
ВКТ-7 ЗАО «НПФ Теплоком»	ТСК-7	Вых. сигнал: 0...10 (1000) Гц	0...175; НСХ: 100М, 100П, 500П, Pt100, Pt500	Вых. сигнал: 4...20 мА	±0,25	RS-232, RS-485	IP54
ТЭРМ-02 («Эталон», г. Владимир)	ИП-02С	5...220 (Д _у 15...100 мм); ПРЭ-0114	0...150; КТСПР (НСХ 100П)	0...1,6; 4...20 мА	±1,5	RS-232, RS-485	IP54
СТЭ-0115 («Эталон», г. Владимир)			0...160; КТСПР (НСХ Pt100)	4...20 мА	±3	RS-232, RS-485	IP54
КМ-5 (ТБН «Энергосервис», Москва)	—	2,5...2500 (Д _у 15...300 мм); РМ-5	0...150; КТПТР	КРТ-1-1,0; 4...20 мА	±4	RS-232, RS-485	IP54
КМ-5-Б (ТБН «Энергосервис», Москва)	—	2,5...2500 (Д _у 15...300 мм); РМ-5-Б		ИД; 0...1,6 МПа	±2; ±5	RS-485	IP54

Учет расхода природного и др. технических газов (азот, аргон, аммиак, водород, кислород, ацетилен и др.) осуществляется с помощью вычислителей количества газов по выходным сигналам преобразователей температуры, давления и объема газов и определения значений расхода и объема газа, приведенных к нормальным условиям.

Вычислители количества газов входят в состав измерительных комплексов, обеспечивающих индикацию и регистрацию измеряемых и вычисляемых параметров, а также среднечасовых и среднесуточных значений. Возможно создание часовых, суточных, декадных и месячных архивов данных.

Уравнения вычислений расхода газов соответствуют ГОСТ 8.563.1-97, ГОСТ 8.563.2-97, ГОСТ 8.563.3-97, ГОСТ 30319.2, ГОСТ 8.563.

На рис. 1.120 показан общий вид корректора газов «Взлет КГ-411» ЗАО «ВЗЛЕТ».

В табл. 1.72 приведены технические характеристики вычислителей количества газов.



Рис. 1.120

Таблица 1.72. Характеристики вычислителей количества газов

Тип	Число преобразователей; выходные сигналы			Погрешность, %	Выходной сигнал	Степень защиты	Напряжение питания
	Температура	Давление	Расход				
СПГ741 ЗАО «НПФ Логика»	5×(4...20 мА); 2х (0...18/500 Гц); 2×ТС (НСХ 50П, 100П, 50М, 100М)			±0,2	RS-232, Centronics	IP54	9...24 VDC
СПГ761 ЗАО «НПФ Логика»	8×(0...5, 0/4...20 мА); 3×(0...1000 Гц); 3×ТС (НСХ 50П, 100П, 50М, 100М)			±0,15	RS-485, Centronics	IP54	220 VAC
ВКГ-2 ЗАО «НПФ Теплоком»	3×ТС (50М, 50П, 100М, 100П, 500М, 500П)	8×(0...5 мА, 0/4...20 мА)	3×(4...20 мА)	±0,15	RS-232, RS-485, Centronics	IP54	220 VAC
ВКГ-3Т ЗАО «НПФ Теплоком»	100П, 500П, Pt100, Pt500	4...20 мА	1000 Гц	±0,2	RS-232, RS-485	IP54	9...24 VDC
Взлет КГ-411 ЗАО «ВЗЛЕТ»	-50...+180 °С	0...15 МПа	0...1·10 ⁶ м³/ч	±0,2	RS-232, RS-485	IP54	36 VDC

1.11.2 Электросчетчики

Учет потребляемой электроэнергии осуществляется с помощью электросчетчиков и сумматоров электрической энергии.

Счетчики электрической энергии подразделяют на одно- и трехфазные, электронные и индукционные, одно- и многотарифные.

Счетчики по вариантам исполнения делят на счетчики непосредственного включения и трансформаторного включения. Счетчики используются для измерения активной и реактивной электрической энергии в однофазных двухпроводных, трехфазных трехпроводных и четырехпроводных цепях переменного тока.

К числу основных технических характеристик электросчетчиков относят класс точности, номинальный ток и номинальное напряжение, число тарифов, выходной сигнал, габариты, массу, устойчивость к температурным и механическим воздействиям и др. К числу характеристик электросчетчика относят также встроенную защиту от самохода (отсутствие сигнала при отсутствии тока в токовых цепях электросчетчика), наличие ЖК-дисплея или счетного механизма и др [1.150,1.151.

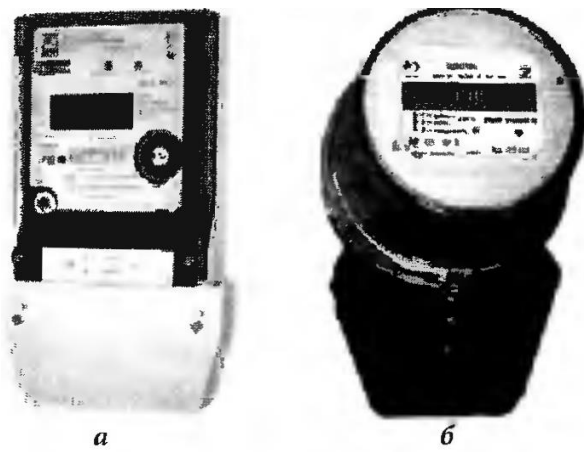


Рис. 1.121

На дисплей помимо электрических параметров выводится текущее время (часы, минуты), текущая дата (день, месяц, год), текущее значение средней мощности, энергия потребления по тарифным зонам и др.

Ниже рассмотрены основные функции и технические характеристики электронных электросчетчиков с выходным сигналом.

А. Учет и индикация параметров:

- количество потребленной и отпущенной активной и реактивной электроэнергии отдельно, нарастающим итогом, суммарно и отдельно;
- по нескольким тарифам (число тарифов от одного до восьми);
- количество потребленной и отпущенной активной и реактивной электроэнергии отдельно по тарифам за прошедшие дни и месяцы;
- вывод графиков усредненной на заданном интервале времени потребляемой активной мощности;
- измерение и регистрация потребляемой электроэнергии после перерыва питания;
- регистрация ежесуточных максимумов и минимумов получасовых мощностей с фиксацией даты и времени;
- фиксация отключения силовой цепи на время более чем на заданную длительность (до нескольких минут);
- фиксация даты обмена информацией с внешними устройствами, а также попыток несанкционированного доступа к данным;
- автоматическое изменение сезонного времени (летнее/зимнее), ведение календаря.

Б. Параметры, задаваемые по интерфейсу (RS-232, RS-485, CAN):

- коэффициенты тока и напряжения;
- текущее время и дата;

- величина суточной коррекции хода часов;
- разрешение (запрет) перехода на летнее/зимнее время;
- задание тарифного расписания;
- пароли для доступа и редактирования параметров;
- скорость обмена по интерфейсу;

Электросчетчики соответствуют ГОСТ 30206-94, ГОСТ 30207-94, ГОСТ Р 52320-2005, ГОСТ Р 52323-2005, ГОСТ Р 52425-2005.

На рис. 1.121, а показан общий вид электросчетчика Ф669М, на рис. 1.121, б — ЦЭ2726 ОАО «ЛЭМЗ».

В табл. 1.73 приведены основные технические характеристики отечественных электронных электросчетчиков.

В случае большого числа электросчетчиков и необходимости решения задач диспетчеризации интегрированной системы учета и распределения электрической энергии применяются сумматоры. Сумматор рассчитан на работу с электросчетчиками, имеющими выходной электрический сигнал (числоимпульсный или аналоговый).

Сумматоры обеспечивают комплексное решение задач многотарифного учета потребления и отпуска электрической энергии и мощности, многозонного контроля максимумов энергопотребления, управление нагрузками и организации систем диспетчеризации распределения электрической энергии.

Таблица 1.73. Характеристики отечественных электронных электросчетчиков

Тип	Варианты подклю- чения	Число тарифов	Класс точности	Номинальные значения		Выходной сигнал
				Ток, А	Напряжение, VAC	
Однофазные электросчетчики						
СЭА11-2 (ОАО «Сигнал», г. Ставрополь)	Непосредственное ¹⁾	2	2	5 (65)	220	Импульсный
СОЛО (ОАО «ЛЭМЗ», С.-Петербург)	Трансформаторное	1	1; 2	5 (60)	220	Импульсный
ЦЭ-2726 (ОАО «ЛЭМЗ», С.-Петербург)	Непосредственное	4	1	5 (50)	220	RS-485
СОЭТ-1 (ОАО «МЭТЗ», г. Мытищи)	Непосредственное	4	2	5 (60)	220	Импульсный
СЭТ1-2К5 («ГРПЗ», г. Рязань)	Непосредственное	2	1	5 (50)	220	Импульсный
СЭБ-2А.07 («НЗиФ», г. Н. Новгород)	Непосредственное	4	2	5 (50)	220	RS-485
Трехфазные электросчетчики						
ОАО «Сигнал», г. Ставрополь						
СЭА3-1	Непосредственное	1	2	5 (55)	3×220	Импульсный
СЭА3-2	Трансформаторное	2	2	1 (8)	3×220	Импульсный
СЭА32	Трансформаторное	8	1	5 (50)	3×220/380	RS-232, RS-485
СЭ 3000	Непосредственное	4	0,5	0,025(7,5)	3×220	RS-232, RS-485, CAN
«МЗЭП», Москва						
СТЭ-561/П5 СТЭ-561/П50 СТЭ-561/П100	Непосредственное Трансформаторное Трансформаторное	4	1	5 (7,5) 5 (50) 10 (100)	3×220/380	RS-485
«МЭТЗ», г. Мытищи						
СЭТ4-1/1 СЭТ4-1М СЭТ4-1/2М	Непосредственное	1	1	5 (7,5) 5 (60) 10 (100)	3×220/380	Импульсный
«ИНКОТЕКС», Москва						
Меркурий-230ART-03	Непосредственное	4	1	5 (7,5)	3×220/380	GSM
ОАО «ЛЭМЗ», С.Петербург						
ЦЭ-2727	Непосредственное	8	1		3×220/380	RS-232, RS-485
ТРИО	Непосредственное	1	1; 2	1(2); 5(10); 5(50); 10(100)	3×(76...264)	Импульсный
Ф669М	Непосредственное	8	0,5	5 (10)	3×230/400	RS-232, RS-485
Альфа «АВВ ВЭИ Метроника»	Трансформаторное	4	0,5	5	3×220/380	RS-485, ИРПС

¹⁾ При величине тока до 5 А применяется прямое подключение, при токе >5 А — подключение через измерительные трансформаторы тока.

Так, сумматор СПЕ 542 «НПФ Логика» имеет 16 универсальных числоимпульсных входов и 4 дискретных управляющих выхода. Система учета, построенная на базе сумматора СПЕ 542, может объединить 32 учетные группы с общим числом измерительных каналов до 128 каналов. Для увеличения числа обслуживаемых каналов к сумматору можно подключить от одного до семи расширителей, каждый из которых имеет до 16 входов (итого, 8х16 до 128 каналов). Основные параметры энергопотребления заносятся в архивы, которые размещаются в энерго-независимой памяти. Там же находится массив параметров настройки (база данных). Управление базой данных производится с клавиатуры сумматора или с помощью компьютера. Сумматор имеет интерфейсы RS-232 (для связи с компьютером или для подключения модема), RS-485 и оптический интерфейс по стандарту IEC 1107 (для связи с переносным компьютером).

1.11.3 Автоматизированные системы контроля и учета энергоресурсов (АСКУЭ)

Первоначальное название автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) к настоящему времени претерпело изменение. Это связано с интеграцией средств учета электроэнергии и технического учета потребления тепловой энергии. Таким образом, речь идет о системе контроля и учета энергоресурсов.

Системы АСКУЭ предполагают объединение в единую систему всех приборов и средств контроля параметров энергоносителей (давление, расход, температура, активная и реактивная электрическая мощность) на базе единого программно-технического комплекса. Этим добиваются сокращения времени и финансовых ресурсов на оптимальный выбор технических средств, их монтаж и эксплуатацию на объектах тепло- и электроэнергетики.

Вопросам учета и управления энергоресурсами посвящено много работ [1.143- 1.146]. По принятой терминологии АСКУЭ подразделяются на системы коммерческого и технического учета.

Коммерческий учет подразумевает учет выработанной или отпущенной потребителю энергии для денежного (финансового) расчета с поставщиком. Техническим учетом называется учет при контроле потребления энергии внутри предприятия его подразделениями (цехами, отделами и т. п.).

АСКУЭ по классификации могут быть централизованными или децентрализованными, двух- или трехуровневыми, с аналоговыми, дискретными или смешанными измерительными каналами, одно- или многопоточными и др.

Основные требования, предъявляемые к АСКУЭ:

- коммерческий учет тепловой и электрической энергии, газа, воды и т. п. на вводе в предприятие;
- коммерческий учет энергоресурсов, отпускаемых потребителям;
- технический учет энергоресурсов по подразделениям предприятия;
- контроль энергопотребления в заданных временных интервалах (минуты, часы, смена, сутки и т. д.);
- фиксация отклонений контролируемых параметров энергоучета и их сигнализация;
- автоматическое управление энергопотреблением по заданным критериям;
- внутренний расчет потребления энергоресурсов подразделениями предприятия.

Управление цифровых образовательных технологий

На практике получили применение трехуровневые АСКУЭ.

Нижний уровень представлен первичными преобразователями параметров энергоносителей (температура, давление, расход, электрическая мощность) с унифицированным выходным сигналом (аналоговым и/или дискретным)

Средний уровень представляют специализированные измерительные и вычислительные устройства или программно-технические комплексы, осуществляющие сбор, обработку, хранение и передачу сигналов на верхний уровень (теплосчетчики, сумматоры, ИИС, контроллеры и т. п.).

Верхний уровень представляют рабочие станции на базе персональных компьютеров, в задачу которых входят сбор информации, поступающей со среднего уровня, обработка информации по отдельным абонентам и группам, ее отображение и документирование (печать) для анализа и принятия решений службами главного энергетика, главного метролога и др. службами предприятия.

Основные функции систем среднего и верхнего уровней АСКУЭ:

- создание нормативно-справочной базы предприятия по каждой точке и группе с учетом тарифов, зон и временных интервалов энергоучета;
- создание базы данных параметров АСКУЭ по каждой точке энергоучета с заданным интервалом дискретизации (большинство АСКУЭ работает с реляционными базами данных);
- обработка данных энергоучета в соответствии с действующими тарифами и отображение информации в виде графиков, таблиц и рапортов с возможностью печати;
- сигнализация о выходе параметров энергоучета за пределы нормального функционирования, диагностика неисправностей и др.

В целом уровень энергопотребления предприятия обусловлен энергоемкостью используемого технологического оборудования и режимами его эксплуатации.

Снижение энергопотребления может быть достигнуто заменой устаревшего малоэффективного оборудования (или его модернизации) и выбором оптимального режима энергопотребления. Последнее достигается изменением режима работы оборудования во времени и по величине энергопотребления в течение суток (в пиковых зонах) для минимизации затрат в рамках многотарифной системы платежей. Примерами комплексных информационно-измерительных систем являются:

Управление цифровых образовательных технологий

- измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) «СПРУТ» ЗАО «ОВ», предназначенный для автоматизированного учета и контроля за потреблением основных энергоносителей (вода, пар, газы, тепло, электроэнергия);
- комплекс технических средств «ИСТОК» НПЦ «Спецсистема», предназначенный для учета потребления (выработки) природного газа, пара, воды, сжатого воздуха;
- информационно-измерительная система «ЛОГИКА» НПФ «ЛОГИКА», предназначенная для технического и коммерческого учета тепловой энергии теплоносителя (вода, пар, природный и др. технические газы), электрической энергии и мощности;
- система учета и регулирования энергии «Энергоучет» НПО «Системотехника», предназначенная для учета теплоносителей (вода, пар) и многотарифного учета электроэнергии;
- комплекс технических средств ОАО «Энергомера» («КТС Энергомера») предназначенный для автоматизации контроля коммерческого и технического учета электроэнергии и мощности на энергетических объектах промышленных предприятий.

Не рассматривая в целом зарубежные АСКУЭ, приведем в качестве примера АСКУЭ типа Teleperm фирмы Siemens, работающую в структуре PCS7. Система построена на базе контроллеров Simatic, станции распределенного ввода-вывода Simatic ET200, SCADA-системы WinCC и другого серверного и сетевого оборудования. Основные характеристики отечественных систем представлены в табл. 1.74.

Таблица 1.74. Характеристики информационно-измерительных систем

Тип	Средства контроля параметров				Число каналов	Интерфейс
	Давление	Расход	Температура	Электроэнергия		
ИВК «СПРУТ» (ЗАО «ОВ»)	Входные сигналы: канал 1: токовый импульсный; канал 2: 0...5 мА, 0/4...20 мА; канал 3: ТС; канал 4: «СК»			Электросчетчики: ЕвроАльфа; ЦЭ6823; СЭТ-4ТМ; СТС5605	16	RS-232, RS-485
«ИСТОК» (НПЦ «Спецсистема»)	0...10 МПа; РС-28, PR-28 (Aplisens, Польша)	Диапазон 1:10; Prowirl 72 (Endress+Hauser); Метран-300 (ГК Метран); UFM-001 (ЗЭиМ)	-50...+450 °С ТС (НСХ 50П, 100П)	—	4	GSM, Centronics
ИИС «Логика» (ЗАО НПФ «Логика»)	Теплосчетчики СПТ941, СПТ961. Корректоры СПГ741, СПГ761, СПГ762, СПГ763			Сумматор СПЕ542	4; 8	RS-232, RS-485, IEC 1107
«Энергоучет» (НПО «Системотехника»)	Теплосчетчик НС-200W			32х(МГУ-32)	4	RS-232, RS-485, УКВ-радиоканал
	4х(Сапфир 22МДИ, Метран 43, МИДА-ДИ, МТ-100)	4х(UFM-001, ВЗЛЕТ-РС, УРСВ, ПРЭМ, Метран-300ПР и др.)	4х(ТС НСХ 100М, 100П), КТПТР-01, КТСПР-001 и др.			
«КТС Энергомера» ОАО «Энергомера»	—	—	—	Электросчетчики ЦЭ6805, ЦЭ6811, ЦЭ6850; УСПД-164-01	16... 256	RS-485, CAN, GSM

Дальнейшей интеграцией средств и систем учета тепловой энергии является создание автономных тепловых пунктов на заданную мощность теплоносителя.

Примером такого тепlopункта является автоматизированный тепловой пункт «ВЗЛЕТ АТП» фирмы «Взлет», включающий в себя датчики температуры, давления, узел учета расхода тепловой энергии и теплоносителя, регулирующие клапаны и насосы. Общий вид тепlopункта приведен на рис. 1.122, а его структура — на рис. 1.123.

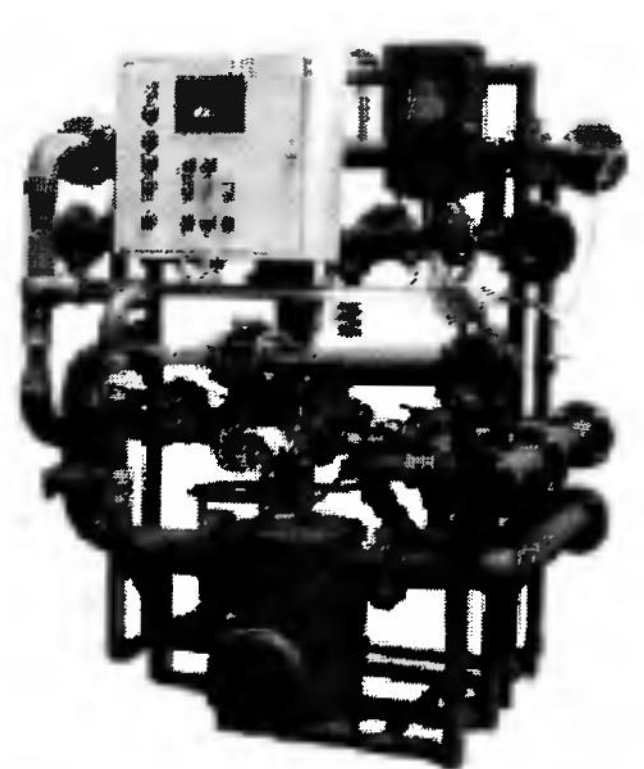


Рис. 1.122

Теплопункт «Взлет АТП» обеспечивает постоянную подачу тепла в систему отопления в соответствии с заданным расписанием и с учетом температуры наружного воздуха, а также постоянство температуры воды в системе горячего водоснабжения (ГВС).

Помимо этого теплопункт обеспечивает постоянство напора теплоносителя, регулирование температуры воды, возвращаемой в теплосеть, сигнализацию при возникновении нештатных ситуаций. Насосы теплового пункта работают с 50%-ным резервированием. В автоматическом режиме через определенные промежутки времени, задаваемой пользователем, один из насосов останавливается на короткое время для промывки его фильтра другим насосом.

АТП могут использоваться в индивидуальных тепловых пунктах (ИТП), центральных тепловых пунктах (ЦТП), локальных автоматизированных котельных или в индивидуальных котельных частных зданий.

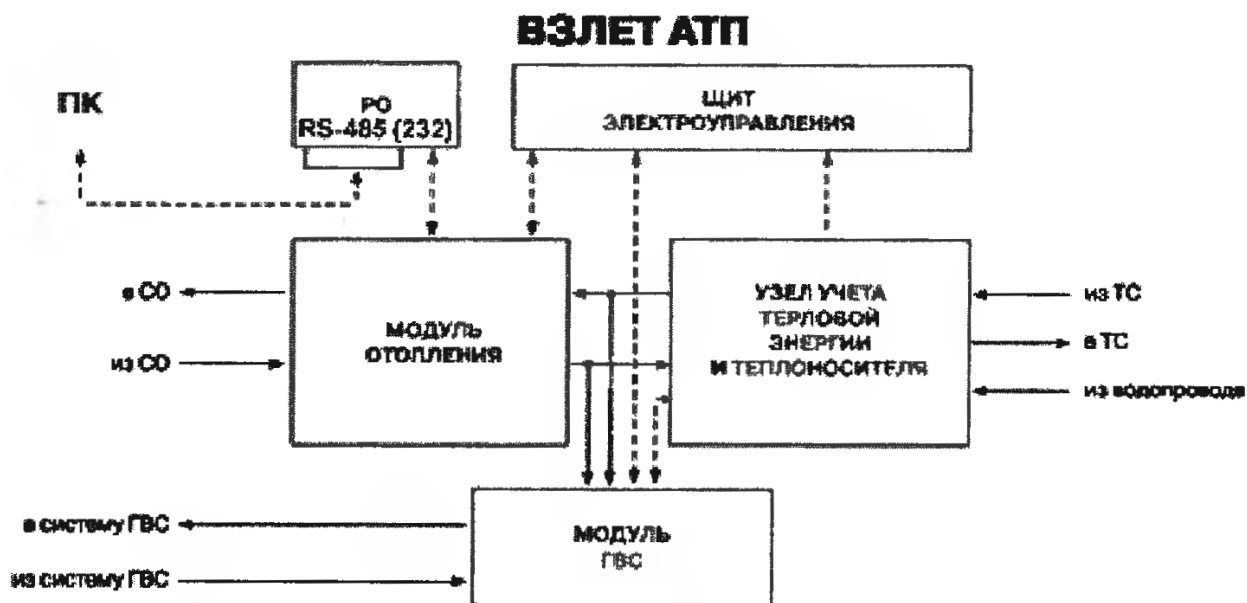


Рис. 1.123

Важной особенностью модификаций «Взлет АТП» модульного исполнения является то, что это универсальное средство регулирования измерения, коммерческого учета и регистрации управления и контроля (щит электроуправления с регулятором отопления и возможностью управления по модему), собранное в единое модульное устройство, позволяет осуществить полную автоматизацию системы теплоснабжения. АТП подключается по входу к тепловой сети централизованного теплоснабжения и/или городскому водопроводу, а по выходу — к системам отопления, ГВС ит. д.

Информация выводится на жидкокристаллический индикатор регулятора отопления «Взлет-РО» с помощью интерфейса RS-232.

Основные технические характеристики АТП.

- 47) давление в подающем трубопроводе 1,6 МПа;
- 48) давление в обратном трубопроводе 0,8 МПа;
- 49) температура теплоносителя в подающем трубопроводе 5... 150 °С;
- 50) температура теплоносителя в обратном трубопроводе 5... 95 °С;
- 51) температура окружающей среды 5...50°С;
- 52) напряжение питания 3х380 VAC;
- 53) потребляемая мощность 0,44 кВА.

В работе [1.145] приведен пример АСКУЭ на базе программно-технического комплекса ЭКОМ. Типовая структура ПТК ЭКОМ приведена на рис. 1.124. Компонентами ПТК являются: Энергокомпьютер ЭКОМ-3000, MS SQL-сервер (могут использоваться базы данных Oracle, Dbase, Paradox) и программное обеспечение.

ЭКОМ-3000 представляет собой проектно-компонуемый модульный PC-совместимый промышленный компьютер (на шине ISA) с модулями аналогового, дискретного и числоимпульсного (частотного) ввода и дискретного вывода («СК»). В структуре ЭКОМ-3000 также используются измерительные преобразователи, счетчики и модули ввода-вывода с интерфейсами RS-232, RS-485, ИРПС. В качестве графического редактора используется MS Visio 2000. ПТК ЭКОМ применяется в электроэнергетике, металлургии и других отраслях промышленности.

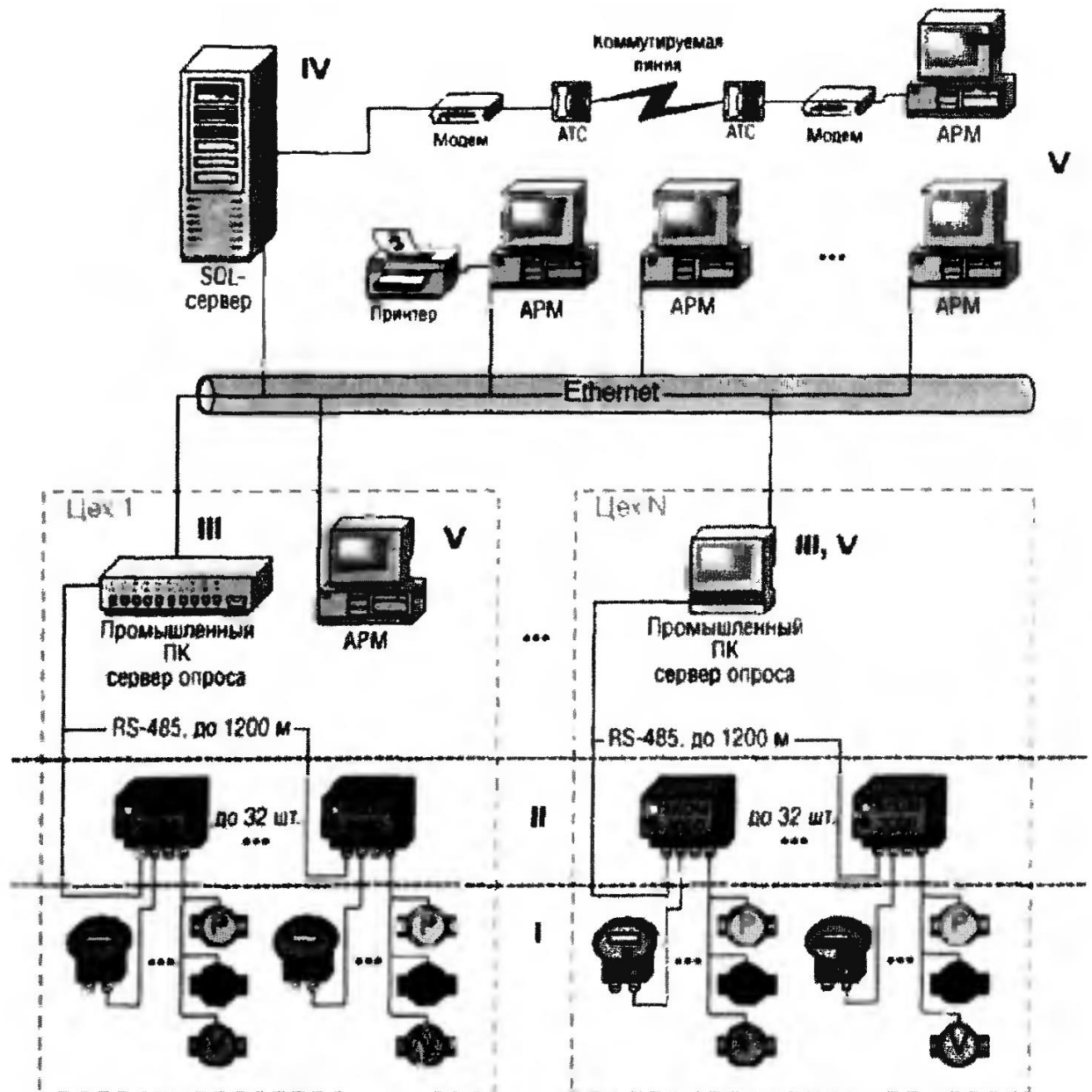


Рис. 1.124

Лекция

по теме №4.2.2. Программируемые логические контроллеры

ВОПРОСЫ

1. Общее описание и классификация ПЛК.
2. Контроллеры, производимые предприятиями РФ.
3. Компоненты ПЛК.
4. Методика выбора ПЛК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Профессия, 2009. – 592 с. (169-269).

1. Общее описание и классификация ПЛК

Контроллеры могут быть классифицированы по различным признакам: функциональным, конструктивным, объему вычислительных ресурсов, числу каналов ввода/вывода и др.

Вопросам выбора различных микропроцессорных устройств, и, прежде всего контроллеров, их характеристикам и особенностям применения в АСУ ТП посвящены работы [2.1-2.9]. В работе [2.9] предложено все контроллеры в зависимости от функциональных возможностей, вычислительной мощности и конструктива (по критерию цена/производительность) разделить на моноблочные (компактные), модульные, РС-совместимые (PC-based) и встраиваемые (Embedded Controller). Следует отметить, что эта классификация носит условный характер, поскольку моноблочные или модульные контроллеры могут быть РС-совместимыми, а РС-совместимые контроллеры могут иметь модульную или моноблочную конфигурацию. Однако для проектирования АСУ ТП малой, средней или большой информационной мощности предварительный выбор аппаратно-программного обеспечения системы определяется выбором того или иного типа контроллера по вышеприведенной

классификации, прежде всего с учетом функциональных особенностей, производительности и числа каналов ввода/вывода. В последние годы наметился также класс мезонинных контроллеров.

Моноблочный контроллер представляет собой микропроцессорное устройство, в едином конструктиве которого располагаются источник питания (не обязательно), центральный процессор (сопроцессоры), память, включающая память программ и память переменных (как правило, энергонезависимая), встроенный порт(ы) для выхода в сеть, фиксированное число встроенных каналов аналогового и/или дискретного ввода/вывода, встроенный ПИД-регулятор с автонастройкой (не обязательно), слот расширения для подключения дополнительных модулей, ЖК-дисплей (не обязательно), индикаторы состояния контроллера. Так, новый моноблочный контроллер Twido фирмы Schneider Electric имеет 24 входа/выхода с расширением до 88 каналов, моноблочный контроллер FPO фирмы Matsushita имеет 16 дискретных входов и 16 дискретных выходов, моноблочный контроллер Unitronics M90 Micro фирмы Industrial Automation Systems имеет аналоговый вход и 16 дискретных входов/выходов и т.д.

Увеличение вычислительной мощности моноблочных контроллеров достигается с помощью блоков расширения, объединенных цифровыми линиями связи, и мезонинных модулей.

Модульные контроллеры представляют собой крейт (корзину) с модулем питания, процессорным модулем и различным числом модулей ввода/вывода, коммуникационных и специальных модулей. Число модулей в корзине доходит до 16 и более. Число модулей может быть увеличено за счет плат расширения и добавления новых корзин. При выборе коммуникационных модулей промышленных сетей следует иметь в виду скорость и дальность передачи данных в сети, число узловых станций, наличие питания по шине, топологию сети. Следует отметить, что наблюдается расширение применимости Ethernet-сетей, Internet-технологий и GSM-телемеханики (на базе сотового телефона, модема и SIM-карты) и ряда др.

PC-based или PC-совместимые контроллеры составляют отдельный класс программируемых контроллеров, значение и роль которых с развитием Internet-технологий существенно возрастает. PC-based контроллеры характеризуются наличием встроенной PC-совместимой операционной системы (Windows 9x/2000/NT/ XP/CE, QNX, MS DOS, Linux, MiniOS7, OS-9 и др.), использованием стандартных системных шин (PC-104, VME, AT96 и др.), возможностью использования стандартного программного обеспечения (ISaGraph, Си, Турбо-Си, Си++,

Паскаль, Assembler, SCADA-систем Trace Mode, InTouch, Citect и др., а также баз данных), коммуникационных стандартов, наличием OPC-сервера и др. PC-based контроллеры, таким образом, могут использовать богатое программное обеспечение независимых производителей, имеют значительно больший объем памяти, чем традиционные ПЛК, возможности расширения и модернизации, а также лучшие возможности диагностирования. PC-based контроллеры на базе промышленных ПК позволяют сосредоточить функции управления и визуализации в одном месте, используя встраиваемые системы — платы УСО, памяти, коммуникационные модули и др., а SCADA-системы, требующие больших объемов памяти и недоступные ПЛК, легко реализуются на ПК. Промышленные компьютеры, выпускаемые рядом фирм (Advantech, Axiom, Portwell и др.), удовлетворяют самым жестким условиям эксплуатации, — степень защиты лицевой панели IP65, диапазон рабочих температур от 0 до 50 °С. Стандартные операционные системы позволяют использовать инструментальные средства разработки прикладного программного обеспечения (ПО) различных фирм. Наличие коммуникационных портов ввода/вывода, механизма взаимодействия OPC позволяют ПК взаимодействовать с любым оборудованием — от ПЛК до любых рабочих станций. Однако эти контроллеры зачастую обладают избыточностью вычислительных ресурсов и функций ввиду их универсальности, возможностью зависания с длительным временем рестарта, пониженной надежностью за счет множества компонентов (приложений) на платформе PC. Для большинства практических применений влияние этих недостатков может быть устранено или снижено.

Встраиваемые ПЛК (Embedded Controller) представляют собой полнофункциональные системы, выполненные в форматах PCI, CompactPCI, ISA, PC/104, MicroPC и др., устанавливаемые в слот компьютера или объединительной платы, входящей в состав оборудования. При этом встраиваемый ПЛК использует внешнее питание, степень защиты базовой системы, имеет малые габариты, легкость замены и ряд других достоинств. Среди производителей встраиваемых систем фирмы Advantech, Fastwel, Octagon Systems и др. Примерами встраиваемых контроллеров служат RTU188 и CPU188-5 фирмы Fastwel, модель 5070 фирмы Octagon Systems и др. Новым направлением встраиваемых систем является применение SOM-модулей, представляющих собой компактные высокоинтегрированные компьютеры, устанавливаемые на базовую плату.

В работе [2.8] предложена классификация микропроцессорных программно-технических комплексов, включающих контроллеры и промышленные компьютеры

в зависимости от выполняемых функций (специальных, функций контроля и управления, оптимизации, диспетчеризации и планирования). Так, PS-based контроллерам отведены специальные функции управления в медицине, научных исследованиях и для управления небольшими объектами в промышленности. Следующий класс локальных контроллеров включает контроллеры, встраиваемые в оборудование, и автономные контроллеры для управления небольшими объектами. По вышеприведенной классификации это моноблочные и встраиваемые контроллеры. Наконец, сетевой класс контроллеров (PLC Network) с числом входов/выходов сотни и тысячи каналов представляют модульные контроллеры.

Следует отметить, что программируемые логические контроллеры по сетевым возможностям приближаются к ПК, их память Флэш-memory обладает достаточной емкостью для размещения небольших SCADA-систем. Примером может служить SCADA-система Trace Mode, размещенная в виде SoftPLC в памяти контроллеров «Лагуна», Ломиконт, Теконик, АДЭМ и др. ПЛК обладают повышенной надежностью, высоким быстродействием (0,9 мкс и менее на базовую команду), малыми габаритами, возможностью «горячей замены модулей» (замена модулей без выключения питания) и др. К дополнительным возможностям относятся наличие сторожевого таймера, самодиагностика, режим автонастройки параметров регулятора.

Программирование контроллеров осуществляется в зависимости от задачи и типа контроллера на различных языках программирования по стандарту IEC 61131-3. Широко применяется программный пакет ISaGRAF как интегрированный пакет разработки и отладки приложений для ПЛК и связи с ПО верхнего уровня. Таким образом, отмечается сближение технических характеристик ПК и ПЛК, удовлетворяющих требованиям единого стандарта IEC 1131, и имеющим общий механизм взаимодействия программных средств в виде OPC-сервера (OLE for Process Control), что позволяет на их базе создавать оптимальные структуры PCY

Как правило, контроллеры устанавливаются на DIN-рейку, а соединения с другими модулями, например с модулем питания, модулем аналогового ввода и др. осуществляются с помощью разъемов, жгутов или проводников с наконечниками «под винт».

В разделе 2.2 приведены технические характеристики большинства контроллеров, используемых на российском рынке промышленной автоматизации. Для

удобства анализа и полноты описания все контроллеры рассматриваются по фирмам- производителям. Это позволяет проследить изменения в существующих контроллерах и появление новых контроллеров фирмы-производителя.

В последние годы получили развитие станции удаленного ввода/вывода, включающие в состав модули УСО, процессорный модуль обработки входных сигналов, блок питания и коммуникационный модуль для связи с базовым контроллером. При этом станции ввода/вывода располагаются вблизи объекта управления и обмениваются данными по сети с контроллером, находящимся в операторском помещении (в шкафу или универсальной стойке). Этим достигается существенная экономия кабельных трасс, а базовый контроллер освобождается от функций обработки сигналов (фильтрация, масштабирование, усреднение и др.). Станции управления представляют собой каркас со встроенными модулями (устройства I/O) или отдельные модули, объединенные цифровым каналом приема/передачи данных и устанавливаемые, как правило, на DIN-рейке. Модули могут быть распределены территориально или располагаться в непосредственной близости друг от друга на общей DIN-рейке.

В табл. 2.1–2.5 представлены контроллеры различных фирм-производителей.

Таблица 2.1. Моноблочные контроллеры

№ п/п	Наименование контроллера	Фирма-производитель
1	FP0, FP1	Matsushita, Япония
2	Direct Logic DL05, DL105, DL06	Koyo Electronics, Япония
3	Modicon TSX Twido, TSX Zelio	Schneider Electric, Франция
4	Alpha, Alpha XL, FX1S, FX1N	Mitsubishi Electric, Япония
5	Sysmac CPM 1A/2A	Omron, Япония
6	Simatic S7-200, S7-300C, C7-620, LOGO	Siemens, Германия
7	VIPA System 100V	VIPA GmbH, Германия
8	VersaMax Nano, VersaMax Micro	General Electric Fanuc, США—Япония
9	Unitronics M90/M91Micro, Visio 230	Industrial Automation Systems, Израиль
10	MicroLogix, PICO	Rockwell Automation, США
11	ROC 306, ROC 312	Fisher, США
12	TeleSafe, SmartWire, SCADAPack	Control Microsystems, Канада
13	DVP	Delta Electronics Inc.,
14	Comat BoX	Turck GmbH, Германия
15	Facon	Fatec Automation Corp., Тайвань
16	Easy 500, 600, 700, 800, MFD Titan, PS4	Möller GmbH, Германия
17	FATEK	Fatek Automation PLC, Тайвань
18	Decont – 182	«ДЭП», Россия
19	MC8	МЗТА, Россия.
20	TKM-410	Группа компаний «Текон», Россия
21	ПЛК 100, ПЛК 150	«ОВЕН», Россия
22	NE-1600	«ИКОС», Россия

Таблица 2.2. Модульные контроллеры

№ п/п	Наименование контроллера	Фирма-производитель
1	FP2	Matsushita, Япония
2	DL205, DL405	Koyo Electronics, Япония
3	Modicon TSX 37 Micro, TSX 57 Premium, TSX Quantum	Schneider Electric, Франция
4	FX 2N, FX 3N, MELSEC AnSH, QnAS, QnA	Mitsubishi Electric, Япония
5	CS1, CQM1H, CJ1	Omron, Япония
6	Simatic S7-300, S7-400	Siemens, Германия
7	VIPA System 200V, System 300V	VIPA GmbH, Германия
8	GE Fanuc Series 90-30, Series 90-70, VersaMax, PACSystems	General Electric Fanuc, США—Япония
9	MicroLogix SLC500, CompactLogix, FlexLogix, ControlLogix	Rockwell Automation, США
10	PS-416, XC100, XC200, XC600	Möller GmbH, Германия
11	B&R SYSTEM 2000	Bernecker&Rainer, Австрия
12	BX 3100	Beckhoff, Германия
13	ADAM-8000	Advantech, Тайвань
14	TKM 700	ГК «Текон», Россия
15	P-130	ПО «Промприбор», Россия
16	КОНТРАСТ КР-300Ш (ИШ), КР-500	ЗАО «ВОЛМАГ», Россия
17	ЭК-2000	ЗАО «Эмикон», Россия
18	СОНЕТ, КП-ПР	ФГУП «ЭЗАН», Россия

Таблица 2.3. PC-based контроллеры

№ п/п	Наименование контроллера	Фирма производитель	CPU	ОС	ПО
1	Direct Logic 470	Koyo Electronics, Япония	Pentium MMX 200 МГц	Windows CE	Think&Do
2	WinPLC	Koyo Electronics, Япония	Hitachi SH3, 40, 100 МГц	Windows CE	Think&Do
3	ROC 809, ROC 812	Fisher-Rosemount (США)	PowerPC	Многозадачная ОСРВ	ROCLink 800
4	i-7188, i-8000	ICP DAS (Тайвань)	AMD 80188, 40 МГц	MS DOS, Mini OS7	ISaGRAF, Си, Паскаль, Ассемблер
5	ADAM 4500, 5510/5511	Advantech, Тайвань	i80186, 40 МГц	DataLight ROM-DOS	C, C++, Ассемблер, UltraLogik, Paradum-31
6	ADAM 6500	Advantech, Тайвань	StrongArm 206 МГц	Windows CE. Net 4.1	C++, VBasic
7	WAGO серия 758	WAGO, Германия	SC 1200 266 МГц	RT-Linux	WAGO-I/O-PRO CAA
8	RTU188	Fastwel Inc., Россия	Am188ES, 40 МГц	MS-DOS 6.22	C, C++, Паскаль, Qbasic, Ассемблер
9	TREI-5B	TREI GmbH, Россия	i80486DX4, 80 МГц	Windows	ISaGRAF
10	МФК	АО «Текон», Россия	i80586, 133 МГц	ОС РВ под DOS 6.x, ОС Linux	ISaGRAF, Си++, Trace Mode
11	TKM52	АО «Текон», Россия	AMD DX5, 133 МГц	DOS, СПО на базе ОС Linux	ISaGRAF, Trace Mode Tecon CX
12	КРОСС	ОАО «ЗЭИМ», Россия	MC68302/ 68360 20 МГц	OS-9000	ISaGRAF, Trace Mode
13	P-130 ISa	ОАО «ЗЭИМ», Россия	PC-совместимый процессор	RTOS-32	ISaGRAF
14	NZ-6000	«Ниешанц-Автоматика», Россия	i80386SX, 40 МГц	MS DOS, Linux	ISaGRAF PRO
15	УК-753 УНИКОНТ	НПО «Квантор», Украина	i80C186EC, 20 МГц	MS DOS, ОС РВ	СИ, ТурбоСИ, Паскаль, КварцТ
16	Ломиконт ТМ	ОАО «Электроприбор», Россия	i80486DX4, 80 МГц	Windows	ISaGRAF, Trace Mode
17	Микроконт-Р2	НПО «Системотехника», Россия	i80486DX4, 133 МГц	MS DOS, QNX, Windows 95/NT	LD, FBD, Ассемблер
18	ПТКУМИКОН (КТС МикКОН)	ЗАО «Инкоммет», Россия	i80386	Windows	SFC, FBD
19	ПКЭМ-3	«Электромеханика», Россия	MC68302, 20 МГц	OS-9	ISaGRAF
20	МИК СМ9107	ООО «Электронмаш-Систем», Россия	StrongArm, i80386	MS DOS, Linux	Ассемблер

Таблица 2.4. Встраиваемые контроллеры

№п/п	Наименование контроллера	Фирма – производитель
1	HiCO486, HiCOSH4, HiCOGEODE	Hitex Automation, Германия
2	Модули 6010, 6020, 6030, 6040, 6050	Octagon Systems, США
3	Модуль CPU188-5	Fastwel Inc., Россия
4	ICPCon7000/8000	ICP DAS, Тайвань
5	RT	National Instruments, США
6	KMn-20 MCKY2M	АО «Импульс», Украина

Таблица 2.5. Системы распределенного ввода/вывода и управления

№ п/п	Наименование системы	Фирма-производитель
1	ADAM 4000, ADAM 6000	Advantech, Тайвань
2	i-7000, M-7000	ICP DAS, Тайвань
3	Bus Terminal	Beckhoff, Германия
4	I/O Phoenix Contact	Phoenix Contact, Япония
5	MELSEC ST	Mitsubishi Electric, Япония
6	Simatic ET 200M/200S/200iS/200X/200R	Siemens, Германия
7	Momentum M1E (связь по Ethernet)	Schneider Electric, Франция
8	SmartSlices	Omron, Япония
9	Genius	GE-Fanuc, США—Япония
10	FieldControl	GE-Fanuc, США—Япония
11	Terminator I/O	Koyo Electronics, Япония
12	Flex Integra I/O (1793)	Rockwell Automation, США
13	Flex I/O (1794)	Rockwell Automation, США
14	Flex Logix	Rockwell Automation, США
15	SLX 200	Rockwell Automation, США
16	Think I/O	Kontron, Германия
17	WAGO I/O System	WAGO, Германия
18	I/O System XI/ON	Möller GmbH, Германия
19	I/O System BL 67	Turck GmbH, Германия
20	Excom	Turck GmbH, Германия
21	ioLogik 4000	MOXA, Тайвань
22	NI CompactDAQ	National Instruments, США
23	Fastwel I/O	Fastwel Inc, Россия
24	X67 System	B&R, Австрия
25	IS-RPI	Pepperl+Fuchs, Германия
26	Jet I/O 6500	Korenix, Германия
27	RIO	Allen-Bradley, США
28	IS1	ITC Electronics, Германия
29	I/A Series RTU20	Foxboro, США
30	LB	Cooper Crouse-Hinds/CEAG, США
31	TREI 5B-05	TREI GmbH, Германия
32	Деконт, Деконт-Ех	«ДЭП», Россия
33	КРОСС-500	«ЗЭИМ», Россия
34	ТРАССА-500	«ЗЭИМ», Россия
35	MIRageN	«Модульные системы Торнадо», Россия
36	DCS-2000	«Эмикон», Россия
37	Smart-RTU	«РТСофт», Россия

Программируемые контроллеры зарубежного производства

Ниже приводится описание, состав и технические характеристики контроллеров, систем распределенного ввода/вывода и управления ряда фирм-производителей, представленных на Российском рынке промышленной автоматизации. С учетом того, что многие фирмы выпускают целый ряд контроллеров разного класса (моноблочные, модульные, PC-совместимые и т. д.), перечень аппаратно-программных средств дан применительно к различным фирмам. Тем самым легче следить за постоянно обновляющейся номенклатурой контроллеров, модулей ввода/вывода, программным обеспечением и т. п. В большинстве случаев (по заверениям производителей), новые модификации контроллеров и версии программного обеспечения поддерживают предыдущие модификации и версии.

2.2.1 Контроллеры компании Advantech, Тайвань

Фирма Advantech производит контроллеры различных классов — компактные, модульные, PC-совместимые и встраиваемые. К компактным контроллерам можно отнести управляющие модули ADAM-4500 и ADAM 6500/6501. Семейство модульных контроллеров представлено серией ADAM-8000. К PC-based контроллерам относятся контроллеры серии ADAM-5000 и промышленные компьютеры MIC-3000 с модулями ввода/вывода на шине CompactPCI.

Контроллер ADAM-4500 (рис. 2.1) в компактном корпусе представляет собой IBM PC-совместимый управляющий модуль с процессором 80188 и ОС ROM-DOS. Память ОЗУ — 256 кбайт, флэш-ПЗУ — 256 кбайт. Коммуникационные порты: COM1 — RS-232/RS-485, COM2 — RS-485, COM3 — RS-232. Скорость обмена — до 115,2 кбит/с, длина линии связи — до 1200 м. Напряжение питания: 10.. 30 VDC.

Контроллер ADAM-6500/6501 с набором модулей аналогового и дискретного ввода/вывода в аналогичных корпусах предназначен для построения систем сбора данных и управления на основе интерфейса Ethernet. Для этого в каждый модуль сбора данных встроен Web-сервер. Для взаимодействия со SCADA-системой в модулях реализована поддержка протокола Modbus TCP/IP и обмен данными осуществляется с помощью OPC-сервера. Контроллер ADAM-6500/6501 со встроенной ОС Windows CE снабжен процессором Intel StrongArm 206 МГц (ADAM-6500) или Intel XScale 400 МГц (ADAM-6501). Память ОЗУ — 64 Мб, флэш-ПЗУ — 16 Мб (ADAM-6500) и 32 Мб (ADAM-6501). Интерфейс Ethernet: 10BaseT (ADAM-6500) и 10/100 BaseT (ADAM- 6501). Последовательные интерфейсы ADAM-6500: 3xRS-232 и 2xRS-485. Интерфейсы ADAM-6501: 1xRS-232, 1xRS-232/RS-485.

В состав серии ADAM-6000 входят 8-канальный модуль аналогового ввода ADAM-6017 и 8-канальный модуль для подключения термопар, 16-канальный модуль дискретного ввода/вывода ADAM-6051, конверторы Ethernet в оптический интерфейс 100 BaseFX и USB в RS-232/RS-422/RS-485 и др.

Модульный контроллер распределенной системы сбора данных и управления ADAM-8000 (рис. 2.2) программно совместим с контроллерами серии Simatic S7-300 фирмы Siemens. Программирование контроллера возможно как с помощью пакета STEP7, так и с помощью пакетов ADAM-WinPLC7 и ADAM-WinNCS. Контроллеры серии ADAM-8000 могут объединяться в сетях Profibus DP, Modbus TCP и CAN. Контроллер имеет сменные процессорные модули и модули ввода/вывода. В табл. 2.6 приведены основные характеристики

Таблица 2.6. Характеристики процессорных модулей ADAM-8000

Тип модуля/CPU	Память ОЗУ/ программ, кбайт	Число таймеров/ счетчиков	Время исполнения бита/слова, мкс	Интерфейс
ADAM-8214-1B/ CPU214	32/40	128/256	018/0,78	RS-232
ADAM-8214-2B/ CPU214	32/40	128/256	018/0,78	RS-232, Profibus DP
ADAM-8215-1B/ CPU215	64/80	128/256	018/0,78	RS-232
ADAM-8215-2B/ CPU215	64/80	128/256	018/0,78	RS-232, Profibus DP
ADAM-8216-2B/ CPU216	128/192	128/256	018/0,78	RS-232, Profibus DP

Для всех моделей контроллера допускается объединение до 32 модулей ввода/вывода по MPTинтерфейсу. При наличии интерфейса Profibus DP (скорость обмена данными от 9600 бит/с до 12 Мбит/с) число ведомых устройств — до 125 (до 32 без повторителя). В состав серии ADAM-8000 входят коммуникационные модули Profibus DP Master и Profibus DP Slave, CANopen Master и CANopen Slave, а также DeviceNet Slave.



Рис. 2.1

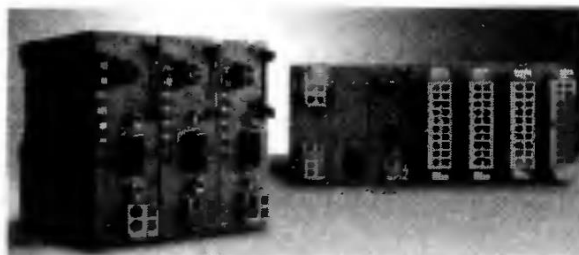


Рис. 2.2



Рис. 2.3

Модули аналогового ввода — 4- и 8-канальные (ADAM8231-1BD52 и ADAM8231- 1BF00), аналогового вывода — 4-канальные ADAM8232-1BD50, модули дискретного ввода и вывода — 8-, 16- и 32-канальные. Помимо этих модулей в состав ADAM-8000 входят модуль интерфейса Modbus, модуль счетчика и др.

Модульные контроллеры серии ADAM-5000 включают IBM PC-совместимые контроллеры: ADAM-5510/5510M/5510E, различающиеся объемом памяти и числом

последовательных портов; ADAM-5511 — с поддержкой Modbus; ADAM-5000/ TCP, ADAM-5510/TCP, ADAM-5510E/TCP и ADAM-5510EKW/TCP — с поддержкой Ethernet; ADAM-5550 с ОС Windows CE 5.0; ADAM-5000/485 на базе интерфейса RS- 485; ADAM-5000/TCP с 32-разрядным RISC-процессором Strong ARM фирмы Intel.

Контроллеры ADAM 5000 состоят из процессорного модуля, кросс-платы с блоком питания и модулей ввода/вывода (от 4 до 8). Питание контроллера — 10...30 **VDC**, диапазон рабочих температур от -10 до +70 °С. Для примера рассмотрим контроллер ADAM-5550.

Контроллер ADAM-5550 с ОС Windows CE (рис. 2.3) снабжен процессором AMD Geode GX533, объем ОЗУ — 128 Мбайт, флэш-ПЗУ — 1,5 Мбайт. Контроллер имеет встроенные Web-сервер и FTP-сервер. Шасси рассчитано на установку 8 модулей ввода/вывода. Коммуникационные порты: 2хRS-232/RS-485, 1хRS-485, 1хRS-232, 2хUSB 1.1, 2хEthernet 10/100 BaseT. Программирование контроллера осуществляется с помощью пакета KW MULTIPROG.

В табл. 2.7 представлены характеристики некоторых других моделей контроллеров серии ADAM-5000.

Таблица 2.7. Технические характеристики контроллеров серии ADAM-5000.

Тип контроллера	Тип процессора	ОС	Объем памяти ОЗУ/ПЗУ	Интерфейсы	Сетевой протокол	ПО
ADAM-5510M	16-разрядный микропроцессор 80188	ROM-DOS	640 кбайт/ 1,5 Мбайт	2хRS-232, 1хRS-485, 1хRS-232/RS-485	Modbus/ RTU	UltraLogik
ADAM-5511			256 кбайт/ 512 кбайт	2хRS-232, 1хRS-485		UltraLogik, SCADA ADAMView
ADAM-5510/TCP			640 кбайт/ 1,5 Мбайт	2хRS-232, 1хRS-485, 1хRS-232/ RS-485, Ethernet 10/100 BaseT	Ethernet TCP/IP	Turbo C++

Новые модели ADAM-5510/HC и ADAM-5510/HCG со встроенной SCADA-системой Trace Mode поддерживают новые функции, в том числе возможность программирования в единой среде контроллера и операторской станции, функции автоматического построения проекта, использование единой базы данных и др. Также имеется возможность приема и передачи данных в формате SMS по GSM-каналу. Со встроенной системой Trace Mode ADAM-5510 поддерживают до 128 точек ввода/вывода и до 32 FBD-программ.

Среди модулей ввода/вывода для контроллеров серии ADAM-5000 отметим 8-канальные модули аналогового ввода (ADAM-5017 и ADAM-5017H), 4-канальный модуль аналогового вывода ADAM-5024, 8- и 16-канальные модули дискретного ввода и вывода, модули релейного вывода и др.

Максимальное число встроенных каналов ввода/вывода достигается при использовании контроллера ADAM-5000/TCP, позволяющего установку 8 модулей на 128 каналов ввода/вывода. Контроллер имеет 32-разрядный RISC-процессор Strong ARM фирмы **Intel**, встроенные порты Ethernet 10/100 BaseT и RS-485. Использование протокола Ethernet Modbus/TCP позволяет интегрировать ADAM-5000/TCP со SCADA-системой и другими пользовательскими приложениями.



Рис. 2.4

Промышленный компьютер серии MIC3000 (рис. 2.4) базируется на системной шине CompactPCI и имеет конструктивное исполнение по стандарту Евро-механика высотой 3U и 6U. Исполнение 3U применяется в системах промышленной автоматизации, исполнение 6U — в телекоммуникационных системах. В табл. 2.8 приведены основные технические характеристики процессорных модулей MIC-3000.

Таблица 2.8. Характеристики процессорных модулей MIC-3000

Тип модуля	Тип процессора	Объем ОЗУ	Интерфейс шины	Периферийные интерфейсы	Сетевой интерфейс
MIC-3316	Intel Celeron 650 МГц	До 384 Мбайт	PICMG 32 бит/33 МГц	4×RS-232/422/485, 1×USB 1.1	Ethernet 10/100 BaseT
MIC-3318	Intel Pentium 4 1,2/1,7 ГГц	До 512 Мбайт	PICMG 32 бит/33 МГц	2×RS-232/422/485, 2×USB 2.0	2x Ethernet 10/100 BaseT
MIC-3351	Intel Pentium MMX 266 МГц	До 256 Мбайт	PICMG 32 бит/33 МГц	2×RS-232, 2×USB 1.1, 1×FDD, 1×Parallel	Ethernet 10/100 BaseT

Исполнение процессорных модулей — безвентиляторное. Также на платах установлены контроллер VGA (C&T 69000 с разрешением 1280x1024) и контроллер IDE (UDMA/33). Имеется возможность установки жесткого диска формата 2,5" и твердотельного накопителя Сотрай Флэш.

Для увеличения числа портов последовательной передачи (RS-232/422/485) предназначены 4-портовая плата MIC-3612 и 8-портовая плата MIC-3620. В табл. 2.9 приведены характеристики модулей ввода/вывода MIC-3000.

Таблица 2.9. Характеристики модулей ввода/вывода MIC-3000

Тип модуля	Число аналоговых входов	Число аналоговых выходов	Число дискретных входов	Число дискретных выходов	Частота опроса
МПС-3714	4×12 бит	—	—	—	30 МГц
МПС-3716	16×16 бит	2×16 бит	16 каналов ввода/вывода + 1 счетчик		250 кГц
МПС-3753	—	—	96 TTL-каналов ввода/вывода + 1 счетчик		1,6 МГц
МПС-3756	—	—	32 изолированных × 24 VDC		40 кГц
МПС-3761	—	—	8 изолированных 24 VDC	4 реле типа А и 4 реле типа В	40 кГц

2.2.2 Контроллеры компании *Beckhoff* (Германия)

Контроллеры делятся на 3 класса: контроллеры промышленной шины серии BC и BX, серия Embedded-PC CX1000 и промышленные PC.

Контроллеры относятся к классу контроллеров, программируемых по стандарту МЭК 61131-3. Концепция компьютерного управления компании **Beckhoff** базируется на модульном принципе построения контроллеров и систем ввода/вывода, встраиваемых компьютерах, программном обеспечении TwinCAT, высокоскоростной сети EtherCAT, сети Lightbus на основе оптоволокну и др.

Модульные PC-based контроллеры включают контроллеры серии CX — CX1000, CX1020 и CX9000 различных модификаций в зависимости от типа процессора, объема памяти, системных интерфейсов и пр.

Контроллер CX1000 (рис. 2.5) относится к контроллерам средней производительности. Все модули контроллера устанавливаются на DIN-рейке.

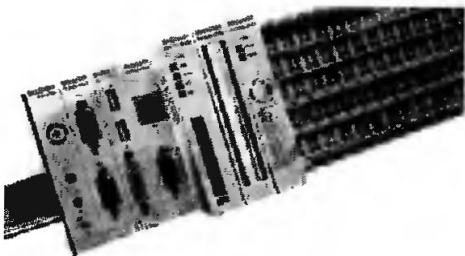


Рис. 2.5

Контроллер CX1000 может работать в автономном режиме, без монитора и клавиатуры (в этом случае соответствующие компоненты не требуются). Если управляющая система не имеет средств визуализации, существует возможность ее обслуживания через встроенный Ethernet или интерфейс RS-232.

При необходимости визуализация подключение осуществляется через DVI/USB модуль (DVI-Digital Video Interface — цифровой видеоинтерфейс) к любой управляющей панели **Beckhoff**. Контроллеры серии CX1000 представляют собой систему, модули которой соединяются между собой с помощью стандартной системной шины PC/104. Отдельные компоненты системы представляют собой модули одинарной (19 мм) или двойной (38) ширины. Базовый блок состоит из одного

модуля CPU (CX100х-0xxx), поставляемого в различных модификациях, и одного модуля питания (CX1100-(100х).

Различие модификаций процессорных модулей касается объема памяти (16 МВ Флэш/32 МВ RAM или 64 МВ Флэш/128 МВ RAM). Последний вариант является обязательным условием для работы системы в среде Windows XP Embedded. Также модули отличаются наличием различных интерфейсов (Ethernet, RS-232, USB), встроенной операционной системой (Windows CE.NET или Windows XP Embedded). Общими для контроллеров серии CX являются: системная шина PC/104 Standard или ISA, блок питания на 24 **VDC**. Все варианты блоков питания оборудуются двустрочным (по 16 знаков в каждой строке) ЖК-дисплеем с подсветкой для вывода сообщений о статусе. Пользовательские программы могут использовать дисплей также для вывода специальных текстовых сообщений.

Среди модулей серии CX1000 имеются модули с интерфейсами промышленных шин Profibus, CANopen, DeviceNet, SERCOS Interface и Lightbus как в исполнении Master, так и в исполнении Slave.

Для программирования контроллеров используется программное обеспечение TwinCAT. Сочетание модульной аппаратной части и мощного программного обеспечения позволяет позиционировать CX1000 как контроллер для универсального применения.

Контроллер CX9000 (рис. 2.6) включает процессорный модуль, блок питания, интерфейсы ввода/вывода, EtherCAT-модули или K-bus модули. Операционная система — Microsoft Windows CE, оперативная память 64 Мбайт с расширением до 128 Мбайт., интерфейс — 2xEthernet. Программное обеспечение контроллера — TwinCAT CE PLC или CE NC PTP runtime.



Рис. 2.6

Модульная система ввода/вывода Bus Terminal. Станция ввода/вывода представляет собой сетевой контроллер BC (Bus Coupler), обеспечивающий связь модулей ввода/вывода с промышленной шиной. Контроллер станции ввода/вывода может также выполнять самостоятельные функции по управлению процессом, диагностике и др. В систему ввода/вывода входят более 150 типов модулей, в том числе модули Bus Terminal с интерфейсами RS-232, RS-485, Ethernet для связи с различными интеллектуальными устройствами (подключение к сети Ethernet только для контроллера BC9000). Дискретные модули выполнены в виде 2-, 4- и 8-канальных устройств. Стандартные аналоговые входы сигналов ± 10 В, 0 ... 10 В, 0/4 ... 20 мА выполнены в 1-, 2-, 4- и 8-канальном варианте. В стандартном корпусе модуля шириной всего 12 мм компактно сосредоточены входы и выходы аналоговых сигналов. Благодаря этому достигается высокая плотность системы, позволяющая экономично использовать занимаемое пространство. Е1а рис. 2.7 показан контроллер BC9000 из серии BC.

Управление каналами ввода/вывода осуществляется по промышленной шине через интерфейсный модуль Bus coupler, который выбирается по типу шины, в соответствии с необходимыми требованиями.

Модуль расширения K-bus позволяет подключать до 255 модулей ввода/вывода к одному контроллеру. Контроллеры промышленных шин **Beckhoff** поддерживают протоколы Lightbus, Profibus DP/FMS, Interbus, CANopen, DeviceNet, ControlNet, Modbus, Fipio, SERCOS Interface, RS-232, RS-485, Ethernet TCP/IP и USB.

Модуль ввода/вывода может быть мастер-устройством промышленной шины. Как правило, это целесообразно для интегрирования подсистем в систему более высокого уровня. Мастер-устройства доступны для следующих шин: AS-Interface, EIB, LON, DALI, LIN и EnOcean.

Различные типы Bus Terminal контроллеров (рис. 2.8) используют различные сети. Сеть Lightbus поддерживает ПЛК типа BC2000; Profibus — BC31xx; Interbus — BC4000; CANopen — BC51xx; DeviceNet — BC52xx; Modbus — 7300; RS-485 — BC8000, BX8000; RS-232 — BC81xx; Ethernet TCP/IP — BC90xx, BX9000, BC91xx.

В зависимости от типа шины интерфейсные модули BUS Coupler подразделяются на следующие типы: EtherCAT — BK1120, BK1250; Lightbus — BK20xx; Profibus — BK30xx, BK31xx, BK35xx; Interbus — BK4500; CANopen — BK51xx, LC51xx; DeviceNet — BK52xx, LC5200; ControlNet — BK7000; CC-Link — BK7150; Modbus — BK73xx; Fipio —

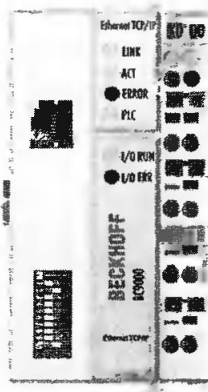


Рис. 2.7

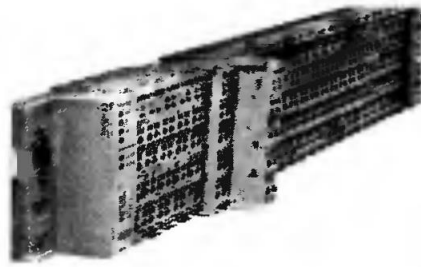


Рис. 2.8

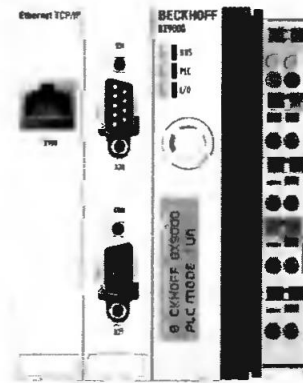


Рис. 2.9

BK7420; Sercos Interface— BK75xx, RS-485 — BK8000; RS-232 — BK8100; Ethernet TCP/ IP— BK90xx, 9100; ASi— KL/KS62xl, LON— KL/KS6401; MP-bus— KL/KS6771.

Серия контроллеров VX (BX3100, BX5120, BX5200, BX8000 и BX9000) отличается от серии BC большим объемом памяти (ОЗУ-512 кбайт, флэш ПЗУ — 1 Мбайт), а также наличием дополнительного интерфейса RS-485, ЖК-дисплея и часов реального времени. Кроме того, контроллеры серии VX поддерживают промышленную сеть CANopen. На рис. 2.9 показан общий вид контроллера BX9100.

Промышленные ПК (рис. 2.10) базируются на процессоре Intel Pentium от 266 МГц до 2 ГГц, объем ОЗУ — от 64 Мбайт до 1 Гбайт. Возможно оснащение промышленного ПК встроенным ЖК- дисплеем или удаленным на расстояние до 100 м.

Новая серия промышленного ПК C6300 обладает малыми габаритами, высокой производительностью, большим набором интерфейсов промышленных шин. ПО промышленного компьютера —TwinCAT под Windows NT/2000/XP. ера BX9100.



Рис. 2.10

2.2.3 Контроллеры компании *Bernecker & Rainer Industrial Elektronik GmbH*, Австрия

Компания **B&R** выпускает серию промышленных контроллеров B&R System2003, System2005 и System2010, серию контроллеров и модулей ввода/вывода X20/X67. Новой продукцией является PC-совместимый контроллер, встроенный в операторскую панель PP100/PP200.

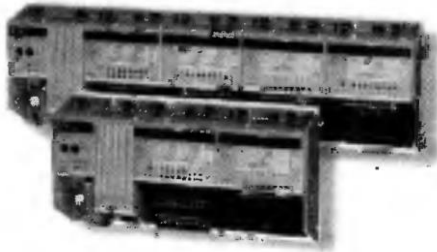


Рис. 2.11

Модульный контроллеры B&R System2003 (рис. 2.11) представляют серию промышленных контроллеров и модулей для систем управления при решении задач малой и средней автоматизации. Процессорные модули серии построены на процессорах Intel Pentium или Motorola, имеют среднюю наработку на отказ (MTBF) больше 1 000 000 ч. Контроллер способен обрабатывать до 10 000 дискретных и до 5000 аналоговых сигналов. Время выполнения типовой инструкции — 0,5 мкс. Интерфейсы связи контроллера: RS-232, RS-422, RS-485, CAN, Ethernet TCP/IP, Ethernet PowerLink, TTY, USB, Profibus DP и др). Для конфигурирования контроллера используется пакет Automation Studio™.

Операционная система контроллера — мультизадачная, реального времени. Максимальное количество входов/выходов — 272 дискретных и 80 аналоговых. Модули центрального процессора (CP 430/470/474/476/770/774): память SRAM — 750 кбайт, Флэш PROM — 1,5 Мбайт. Процессорный модуль CP 570 на базе x86 процессора имеет встроенные интерфейсы Ethernet 10/100 BaseT и USB.

Конструкция крейта позволяет устанавливать 2, 3, 4, 5, 6, 8 или 10 модулей. При использовании удаленных входов/выходов общее число станций достигает 31. Система удаленного ввода/вывода (RIO) B&R применяется для приложений с большей производительностью. Она обеспечивает скорость передачи данных до 2 Мбит/с. Время отклика RIO (считывания цифрового входа и установки цифрового выхода) менее 3 мс. Общая ширина крейта в зависимости от числа модулей N составляет от 161,5 до 773,5 мм ($76,5 \times N + 8,5$ мм). Размеры модулей в металлическом корпусе: 77x115x70 мм. Модули устанавливаются на базовой плате, выполненной из алюминия, и крепятся винтами. Модули дискретного ввода/вывода рассчитаны на 2, 4, 8, 16 или 32 канала. Выходные элементы дискретного выхода — транзистор, реле, семистор. Модули аналогового ввода/вывода с числом каналов от 1 до 4-х

рассчитаны на сигналы ± 10 VDC, 0...20 мА. Помимо этих модулей имеются температурные модули, модули ЧПУ и позиционирования, смешанные модули и интерфейсные модули. Напряжение питания контроллера: 18...30 VDC или 190...220 VAC. Рабочая температура — от 0 до 60 °C.

Модульный контроллеры B&R System2005 (рис. 2.12) применяется для создания средних и больших систем автоматизации. Процессорные модули контроллера построены на процессорах Pentium III, время цикла типовой инструкции — 0,012 мкс. Модульная концепция и масштабируемость, полный спектр модулей для любых типов задач, поддержка всех основных промышленных интерфейсов и полевых шин расширяют применение данного типа контроллеров. Основные характеристики контроллера: операционная система — мультизадачная, реального времени с квантованием по времени; минимальное время цикла — 0,2 мс; минимальное время обработки команды — 0,012 мкс; напряжение питания: 18...30 VDC или 190...220 VAC.

Модули B&R System 2005 имеют пластмассовые корпуса и крепятся к модулю базовой платы, который присоединяется к монтажному основанию. На базовой плате может быть установлено до 15 модулей. Если необходимо большее число модулей систему легко увеличить, используя сегменты расширения. Основной сегмент содержит CPU и модуль питания, расположенный в левом конце сегмента. Центральный процессор, расположенный на основной базовой плате справа от модуля питания, занимает два места. CPU отличаются друг от друга производительностью, возможностью работы с параллельным процессором и быстродействием. Модули CPU (CP260/340/360/380/382) имеют интерфейсы RS-232, CAN, Ethernet PowerLink, USB; память — SRAM 512 кбайт, DRAM - 64 Мбайт, флэш-память 1 Гбайт. В модулях CP360, CP380 и CP382 (рис. 2.13) в качестве процессора используется Pentium 266 МГц, SRAM 512 кбайт, DRAM 32 Мбайт (CP360) и Pentium III 500 МГц, SRAM 512 кбайт, DRAM 64 Мбайт (CP380 и CP382).

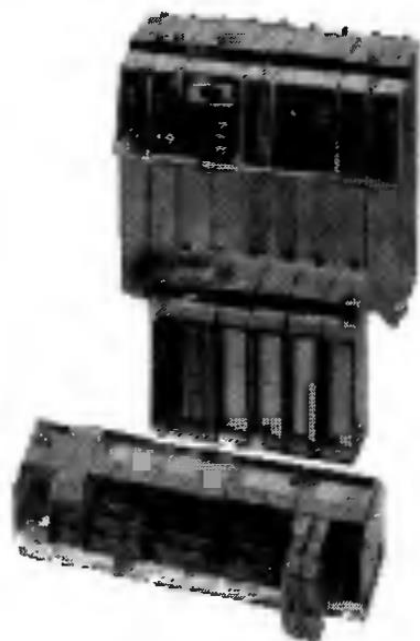


Рис. 2.12

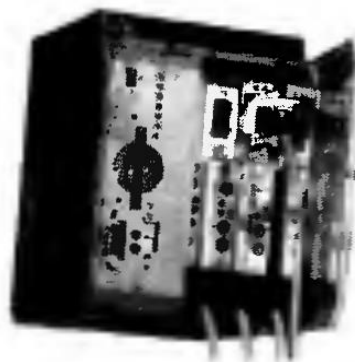


Рис. 2.13

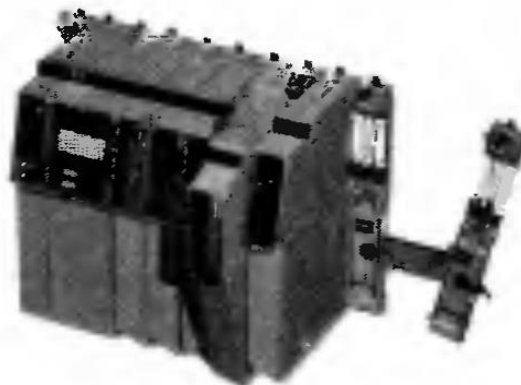


Рис. 2.14

Модули дискретного ввода/ вывода рассчитаны на 16 и 32 канала (дискретный ввод) и на 8, 16 и 32 канала (дискретный вывод). Модули аналогового ввода/ вывода— на 8 каналов (сигналы: ± 10 **VDC**, 0...20 мА). Помимо этих модулей имеются температурные модули, модули ЧПУ и позиционирования, смешанные модули, интерфейсные модули, модули дополнительной памяти, модули расширения и модули параллельных процессоров.

Модульный контроллеры B&R System 2010 (рис. 2.14) имеет базовую плату с системной шиной на 8 модулей и разъемом для установки на DIN рейке до 20 модулей ввода/вывода. Поддерживаются интерфейсы RS-232, Ethernet 10/100 BaseT, CAN, Profibus DP. Модуль питания — с напряжением питания 24 **VDC** или 90... 270 **VAC**.

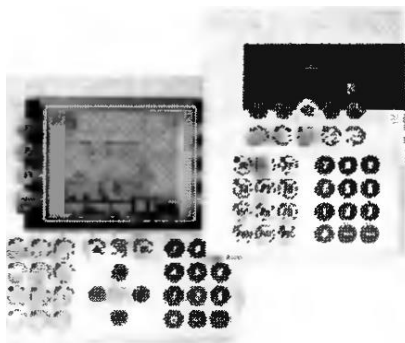


Рис. 2.15

Модули дискретного ввода/вывода рассчитаны на 32 канала с входным/выходным напряжением 24 **VDC** или 120/130 **VAC**. Модули аналогового ввода рассчитаны на 8 или 16 каналов, входные/выходные сигналы — ток или напряжение.

Система удаленного ввода/вывода (Remote I/O) объединяет до 31 slave-станции без повторителя и до 126 slave-станций с повторителем.

Панели оператора со встроенным контроллером PowerPanel (рис. 2.15) объединяют панель оператора и полнофункциональный контроллер в одном корпусе. В панели оператора Panel Ware (PW) используются текстовый дисплей на 4х20 символов или графический дисплей с матрицами TFT, EL, LCD и сенсорным экраном с подсветкой. Панель имеет до 47 функциональных или программируемых кнопок, устройство управления курсором. Панели PW поддерживают различные промышленные интерфейсы связи и полевые шины (RS-232/422/485, Profibus FMS, CAN, NET2000 и др.).

Панели Power Panel разделяются на серию PP15/PP21/PP35/PP41, основанных на процессорах Motorola, и панелей серии PP100/200 на базе Intel-совместимого центрального процессора (DRAM — 128 Мбайт, слот для Сотрас Флэш-карты, интерфейс Ethernet 100 Мбит/с, 2х USB, 1хRS-232. Панели PP100 и PP200 поставляются в исполнении с предустановленной операционной системой Windows CE и с выбранными модулями ввода/вывода представляют собой PC-совместимый контроллер (промышленный компьютер).

Панели Power Panel (PP21 и PP41) оборудованы слотами для установки дискретных и аналоговых модулей ввода/вывода, быстродействующих модулей ввода/вывода (применяются для подсчета событий, управления пусковыми механизмами, шаговыми двигателями и проведения частотных измерений), а также модулей связи интерфейсов RS-232, RS-422, RS-485, TTY, CAN, Profibus и Ethernet. Модули ввода/вывода PP21и PP41: 10DI/8DO. Модули ввода/вывода PP15 и PP35: 8DI/8DO/4AI/4AO.

Программирование панелей управления Power Panel, как и другой продукции B&R, осуществляется с использованием единого инструментального программного обеспечения Automation Studio¹. Панели оператора со встроенным контроллером, как и другое оборудование **B8cR**, обладают широким выбором драйверов для работы с PLC других производителей. Наличие общей аппаратной платформы, единого программного обеспечения для программирования любого компонента, пол-

ноценный набор аппаратных и сетевых средств фирмы **BerneckerRainer**, упрощает процесс разработки и сопровождения систем промышленной автоматизации любого уровня.

2.2.4 Контроллеры компании **Control Microsystems**, Канада

Контроллеры и модули ввода/вывода фирмы **Control Microsystems** являются оборудованием для жестких условий эксплуатации и предназначены для работы в необслуживаемых условиях в температурном диапазоне от -40 до +70 °С.

Фирма **Control Microsystems** выпускает контроллеры марки TeleSAFE, SCADAPack и SmartWIRE.

Контроллер TeleSAFE Microl6 (рис. 2.16) имеет процессор M37702 с частотой 14,7 МГц, объем ОЗУ — 1 Мбайт, флэш-ПЗУ — 2 Мбайт. Программирование осуществляется на «С», языке релейной логики или на других языках IEC 61131-3. Связь с внешними устройствами через последовательные порты RS-232 или RS-485. Увеличение каналов ввода/вывода достигается при помощи модулей ввода/вывода серии 5000. Контроллер имеет встроенные сторожевой таймер и часы-календарь. Питание контроллера — от источника постоянного или переменного тока напряжением 12..,28В.

Контроллеры SCADAPack предназначены для создания распределенных систем телемеханики и управления. Контроллер монтируется в 19-дюймовую стойку и имеет каркасно-модульную структуру. В шасси контроллера кроме процессора и блока питания могут быть установлены до 12 модулей ввода/вывода аналоговых или дискретных сигналов с возможностью «горячей» замены. Архитектура контроллеров позволяет создать систему управления различной конфигурации — от устройства удаленного ввода/вывода нескольких сигналов до системы управления, обрабатывающей более 400 каналов ввода/вывода.

Контроллеры программируются на стандартных языках МЭК 61131-3, а также на «С». Прикладная программа хранится во Флэш-памяти. Диагностику контроллера, программирование и отладку программ можно проводить в удаленном режиме — по телефонной или радиолинии. Контроллеры поддерживают коммуникационный протокол ModBus RTU и ASCII.

Контроллеры и модули расширения имеют групповую или индивидуальную гальваническую изоляцию каналов, минимальное энергопотребление, возможность перехода в спящий режим и встроенный источник бесперебойного питания. Напряжение питания контроллеров 24 **VDC**.

Контроллер SCADAPack32 (рис. 2.17) является наиболее мощным контроллером, предлагаемым фирмой **Control Microsystems**. Он имеет 32-разрядный 120 МГц RISC-процессор, 8 Мбайт DRAM, 4 Мбайт Флэш, 1 Мбайт SRAM. Программирование осуществляется на языке релейной логики, языках стандарта IEC 61131-3 (ISaGRAF), языке C и C++.

Контроллер SCADAPackER (рис. 2.18) в исполнении Rack-mount имеет интерфейс Ethernet 100BaseT (скорость обмена данными 100 Мбит/с).

Контроллер SCADAPack Wireless (рис. 2.19) со встроенным радиомодемом предназначен для организации беспроводной связи на частотах 900 МГц или 2 ГГц. Скорость передачи — 115 кбит/с.

Контроллер SCADAPack² имеет 32-разрядный процессор и поддерживает протоколы Modbus RTU, Modbus ASC И, Modbus/TCP. Помимо модуля расширения 5606 к контроллеру может быть подключен модуль беспроводной связи на частоте 900 МГц или 2,4 ГГц.

Контроллер SCADAPack^{KS} оснащен процессором AMD Elan™ SC520. Среда программирования ISaGRAF соответствует стандарту IEC 61131-3. Для увеличения числа каналов ввода/вывода используются внешние модули, подключаемые к портам RS-485 или Ethernet.

Новый модуль ввода/вывода 5606 (рис. 2.20) имеет 32 дискретных входов, 16 дискретных выходов, 8 программно конфигурируемых аналоговых входов и 2 аналоговых выхода. Данный модуль устанавливается на промышленном контроллере SCADAPack32 и указывается в коде его заказа. Среди других модулей расширения от-



Рис. 2.16



Рис. 2.17



Рис. 2.18



Рис. 2.19

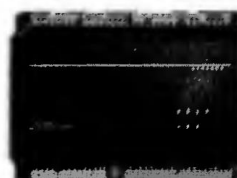


Рис. 2.20



Рис. 2.21

метим следующие: 5402 (16 DI/DO, рис. 2.21), 5404 (16 DI), 5405 (32 DI), 5406 (16 RO), 5409 (8 DO), 5411 (32DO), 5502 (для термометров сопротивления), 5504 (термопары J, K, T, E и ± 80 мВ), 5506 (AI0/4...20 мА, 0...5 **VDC**) и др. К коммуникационным модулям относятся: 5901 (Dual-Up модем), 5902 (радиомодем), 5904 (HART-интерфейс), 5908 (беспроводной интерфейс 900 МГц и 2,4 ГГц), 5910 (Ethernet-интерфейс).

Технические характеристики различных моделей контроллеров SCADAPack приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10. Технические характеристики контроллеров SCADAPack

Тип контроллера	Память ОЗУ/ПЗУ	Число встроен. аналог. каналов ввода/вывода	Число встроен. дискрет. каналов ввода/вывода	Интерфейс	Модули расширения
SCADAPack	Память программ 12 Кслов	8/2	20/12 (RO); 3 счетных входа	2×RS-232, 1×RS-232/ RS-485	Серия 5000
SCADAPack32	ОЗУ — 8 Мбайт, флэш-ПЗУ — 4 Мбайт	8/2	20/12 (RO) 3 счетных входа	3×RS-232, 1×RS-232/ RS-485, 1×Ethernet 10/100BaseT	Серия 5000
SCADAPack32P		—	—	3×RS-232/RS-485, 1×Ethernet	Серия 5000
SCADAPack 100	ОЗУ – 256 кбайт, флэш-ПЗУ — 512 кбайт	3/1	6 DI/DO	1×RS-232, 1×RS-232/ RS-485	—
SCADAPack Light	Память программ 12 кслов	5/—	—/2 RO 3 счетных входа	3×RS-232	Серия 5000
SCADAPack Plus		13/2	16/14 RO 3 четных входа	4×RS-232	Серия 5000
SCADAPack LP	ОЗУ 1 Мбайт, флэш-ПЗУ — 512 кбайт	6/2	8 DI/DO 3 счетных входа	2×RS-232, 1×RS-232/ RS-485	Серия 5000
SCADAPack 350/370	ОЗУ — 8 Мбайт, флэш-ПЗУ — 4 Мбайт	8/2	20/12 (RO)	1×RS-232, 1×RS-232/ RS-485, 1×RS-485, 1×Ethernet 10/100 BaseT, 2×USB 2.0	Модуль 5606
SCADAPack ²	ОЗУ — 4 Мбайт, флэш-ПЗУ — 16 Мбайт	5/2	8 (конфигурируемые пользователем)	2×RS-232, RS-485, Ethernet 10/100 BaseT	
SCADAPack ^{ES}	ОЗУ-2 Мбайт, флэш-ПЗУ — 32 Мбайт, SDRAM — 128 Мбайт	12/4	32/16 (RO)	3×RS-232, 2×RS-232/RS-422/RS-485, 2×Ethernet	—

Коммуникационные контроллеры, поддерживающие последовательный обмен данными по интерфейсам RS-232 и RS-485: 5201 RS-485 (поддерживает 64 AI, 32 AO, 64 DI, 64 DO); 5202 RS-232 (поддерживает 64 AI, 32 AO, 64 DI, 64 DO).

Для программирования контроллеров серий TeleSAFE Micro 16 и SCADAPack, отладки и документирования программ контроля и управления ис-

пользуется пакет TelePACE. Пакет программирования TelePACE содержит редактор программ релейной логики — TelePACE Ladder Logic и набор инструментов для работы на языке C — TelePACE C Tools.

Для связи контроллеров TeleSAFE Micro 16 и SCADAPack со SCADA-системами предназначен OPC-сервер, который поддерживает до четырех последовательных соединений. Каждое из них может быть отдельным устройством или несколькими устройствами в зависимости от способа соединения (без управления передачей данных, с использованием сигналов RTS/CTS или с набором номера по коммутируемым телефонным линиям).

2.2.5 Контроллеры компании *Delta Electronics Inc.*, Тайвань

Контроллеры компании серии DVP (рис. 2.22) представляют собой моноблочные контроллеры с модулями расширения дискретных и аналоговых каналов ввода/вывода и встроенными интерфейсами RS-232 и RS-485. Для контроллеров серии DVP-SS/SA/SX/SC имеются коммуникационные модули расширения Profibus DP и DeviceNet. Пакет программирования под ОС Windows WPLSoft использует три технологических языка программирования — LD, IL и SFC. Для программирования под ОС DOS имеется пакет DPLSoft. Память программ составляет от 4 до 16 кслов для различных типов контроллеров. Число базовых и прикладных инструкций — 127.

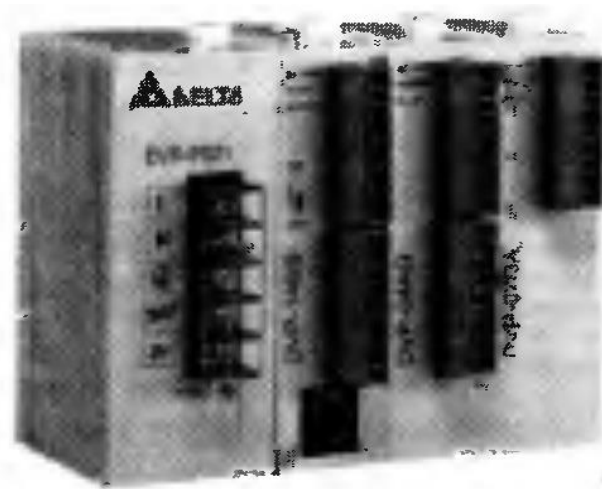


Рис. 2.22

Серия DVP объединяет в своем составе 6 типов базовых процессорных модулей (DVP-SS/SA/SX/ES/EX/EH), различающихся объемом памяти, быстродействием, числом встроенных каналов ввода/вывода, набором встроенных функций и др. Все модули выпускаются в пластмассовых корпусах. Монтаж осуществляется на стандартную DIN-рейку или на плоскую поверхность. Соединения между модулями выполняются плоскими кабелями или встроенными разъемами.

Контроллеры серии DVP-SS имеют в своем составе базовый модуль DVP-14SS и модули расширения DVP-04AD и DVP-02DA. Встроенные каналы дискретного ввода/вывода: 8DI и 6DO. Память программ (EEPROM) составляет 4 кслов. Максимальное число каналов с модулями расширения — 128. Встроенные интерфейсы — RS-232 (связь с ПК, программатором HPP или с операторской панелью), RS-485 (связь с ПЛК по протоколу Modbus в сети master/slave и с преобразователями частоты DELTA VFD-B/M/S и др.).

Контроллер DVP-SA имеет встроенные каналы дискретного ввода/вывода: 8DI и 4DO. Память программ составляет 8 кслов. Модули расширения общие с контроллерами серии DVP-SS.

Контроллер DVP-SX имеет встроенные каналы дискретного и аналогового ввода/вывода: 4DI, 2DO, 2AI и 2AO. Память программ составляет 8 кслов. Модули расширения общие с контроллерами серии DVP-SS.

Контроллер DVP-ES имеет встроенные каналы дискретного ввода/вывода на 14, 24, 32 и 64 точки. Память программ составляет 8 кслов. Модули расширения на 8, 16, 32 и 64 канала ввода/вывода. Тип дискретных входов 24 **VDC** PNP или NPN, выходов — релейный (CK) и транзисторный (OK). Питание контроллера 24 **VDC** или 100...240 **VAC**.

Контроллер DVP-EX имеет встроенные каналы дискретного ввода/вывода на 14 точек (8DI и 6DO) и аналогового ввода/вывода на 6 точек (4AI и 2AO). Модули расширения на 8, 16, 24 и 32 канала ввода/вывода. Тип дискретных входов: 24 **VDC** PNP или NPN, выходов — релейный (CK) и транзисторный (OK). Тип аналогового входа и выхода: 0...20 мА, ± 10 VDC. Питание контроллера 24 VDC или 100...240 **VAC**.

Контроллер DVP-EH имеет процессорный модуль на 16, 20, 32, 48, 64 и 80 каналов дискретного ввода/вывода. Модули расширения на 8, 16, 32 и 48 каналов ввода/вывода. Память программ составляет 16 кслов, память данных — 10000 регистров. Время выполнения базовой инструкции — 0,24 мкс. Число высокоскоростных счетчиков до 200 кГц — 4, число импульсных выходов (до 200 кГц) — 2. Максимальное число каналов ввода/вывода с модулями расширения — 512.

Новая серия модульных контроллеров DVP-SV имеет характеристики аналогичные контроллерам серии DVP-EH, но отличается компактным модульным исполнением (корпус Slim).

2.2.6 Контроллеры компании *FATEK Automation Corp.*, Тайвань

Компания **FATEK Automation** выпускает моноблочные контроллеры серии FBe и FBs (рис. 2.23), модули расширения, коммуникационные модули и программное обеспечение контроллеров WinProLadder. Контроллеры имеют встроенные каналы аналогового и дискретного ввода/вывода, скоростной счетчик, таймер, встроенные интерфейсы RS-232, RS-485, HMO5. Для вычислений используется 16-разрядный процессор Z8 из серии Z180. Коммуникационные драйверы FACON PLC поддерживаются большинством производителей SCADA-систем. Компания FATEC предлагает также OPC-сервер, ActiveX, DDE-сервер.

Встроенные каналы дискретного ввода/вывода: 12DI/8DO, 24 **VDC** (FBs-20MC), 16DI/12DO, 24 **VDC** (FBs-28MC), 24DI/16DO, 24 **VDC** (FBs-40MC).

Увеличение числа каналов достигается с помощью модулей расширения, характеристики некоторых из которых приведены ниже (табл. 2.11).

На рис. 2.24 представлен общий вид модуля расширения FBs-4DA/2DA.



Рис. 2.23

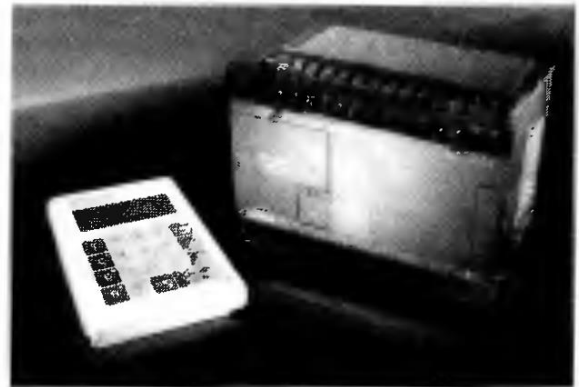


Рис. 2.24

Таблица 2.11. Характеристики модулей расширения контроллеров FATEK

Тип модуля	Аналоговые входы	Аналоговые выходы	Дискретные входы	Дискретные выходы
Дискретные и аналоговые модули ввода/вывода				
FBs-20 MA	—	—	12 DI, 24 VDC	8 RO, 2A AC/DC
FBs-14MAS	—	—	8 DI, 24 VDC	6 тиристорных выходов, 1A AC
FBs-32MAT	—	—	20 DI, 24 VDC	12 транзисторных выходов, 24 VDC
FBs-40MC	—	—	24 DI, 24 VDC	16 RO, 2A AC/DC
FBs-40 MCS	—	—	24 DI, 24 VDC	16 тиристорных выходов, 1A AC
FBs-60MCT	—	—	36 DI, 24 VDC	24 транзисторных выходов, 24 VDC
FBs-6AD	6 AI, $\pm 5/10$ VDC, $\pm 10/20$ mA или $0...5/10$ VDC, $0...10/20$ mA	—	—	—
FBs-B2A1D	2 AI, $0...10$ VDC, $0...20$ mA	1 AO, $0...10$ VDC, $0...20$ mA	—	—
FBs-4A2D	4 AI, $\pm 5/10$ VDC, $\pm 10/20$ mA или $0...5/10$ VDC, $0...10/20$ mA	2 AO, $-5/10...+5/10$ VDC, $-10/20...+10/20$ mA или $0...5/10$ VDC, $0...10/20$ mA	—	—
FBs-2DA	—	2 AO, $-5/10...+5/10$ VDC, $-0/20...+10/20$ mA или $0...5/10$ VDC, $0...10/20$ mA	—	—
FBs-4DA	—	4 AO, $-5/10...+5/10$ VDC, $-0/20...+10/20$ mA или $0...5/10$ VDC, $0...10/20$ mA	—	—
FBs-B2DA	—	2 AO, $0...10$ VDC, $0...20$ mA	—	—
Коммуникационные модули				
FBs-CM22	2 порта RS-232 с индикаторами			
FBs-CM55	2 порта RS-485 с индикаторами			
FBs-CM25E	1xRS-232, 1xRS-485 с Ethernet-интерфейсом, с индикаторами			
FBs-CM25C	Конвертер RS-232/RS-485 с индикаторами			
FBs-CM5R	Репитер RS-485 с индикаторами			
FBs-CBE (Ethernet)	Ethernet-интерфейс плата с индикаторами			
Специальные модули				
FBs-TC2	Модуль для термопар, подключение 2 термопар			
FBs-TC6	Модуль для термопар, подключение 6 термопар			
FBs-RTD6	Модуль для терморезисторов, подключение 2 терморезисторов			
FBs-TC16	Модуль для термопар, подключение 16 термопар			
FBs-RTD16	Модуль для терморезисторов, подключение 16 терморезисторов			
FBs-2ARTD4	2 аналоговых входа и 4 входа для термопар			
FBs-2ATC4	2 аналоговых входа и 4 входа для терморезисторов			

2.2.7 Контроллеры компании *GE Fanuc* (США—Япония)

В состав линейки VersaMax Nano контроллеров компании **GE-Fanuc** входят моноблочные контроллеры VersaMax Nano и VersaMax Micro, модульные контроллеры VersaMax, Series 90-30, Series 90-70 и новый модульный контроллер с открытой архитектурой и повышенной функциональностью PACSystem RX7i.

Контроллер VersaMax Nano (рис. 2.25) имеет 10 каналов дискретного ввода/вы- вода, а в новых моделях VersaMax Micro (рис. 2.26) число каналов ввода/вывода доходит до 84-х с подключением до 4-х модулей расширения. Базовый VersaMax Micro выпускается в 3-х модификациях: 14, 23 и 28 каналов ввода/вывода. Контроллеры применяются для решения задач локальной автоматизации.

Модульный контроллер VersaMax (рис. 2.27) используется в качестве устройства распределенного управления с числом каналов ввода/вывода до 1500. К одному модулю CPU можно подключить до 8 шасси ввода/вывода. К числу модулей ввода/ вывода относятся до 31 типа модулей дискретного ввода/вывода и 19 типов модулей аналогового ввода/вывода. Процессор с объемом памяти 64 кбайт осуществляет обмен данными по 2048 каналам ввода/вывода. К числу сетевых интерфейсов контроллера относятся: Genius Bus, Profibus DP, DeviceNet и Ethernet. Программирование контроллеров осуществляется на языках I.D и IL при помощи программного пакета VersaPro. Кроме того, в ассортименте продукции компании GE Fanuc имеется единое программное обеспечение SIMPLICITY Machine Edition для программирования, визуализации и управления.

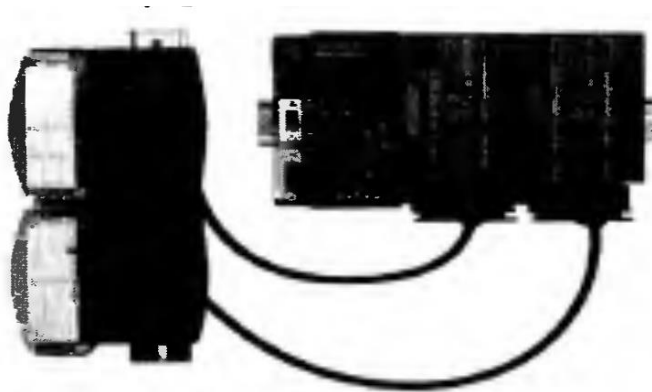


Рис. 2.25



Рис. 2.26

Модульные контроллеры Series 90-30 (рис. 2.28) относятся по производительности к контроллерам среднего класса и включают 11 модулей CPU, более 100 различных типов модулей ввода/вывода, интеллектуальных и коммуникационных модулей. Программирование контроллеров Series 90-30 реализуются с помощью

пакета Ladder Logic, графического языка «SFC» и «С». Контроллер снабжен интерфейсом Ethernet TCP/IP. Удаленная система ввода/вывода базируется на сетях Genius Bus, Profibus DP, Interbus-S или DeviceNet.

Модульные контроллеры Series 90-70 (рис. 2.29) предназначены для больших систем, а также для применений, требующих повышенной надежности — дублирование или тройное резервирование модулей (TMR). Контроллеры совместимы с другими ПЛК Series 90. В контроллерах Series 90-70 использована новейшая технология, а открытая архитектура VMEbus представляет собой платформу для эффективного выполнения работы разного объема. Семейство Series 90-70 имеет в своем составе широкую номенклатуру аналоговых, дискретных, коммуникационных и специальных модулей, а также модуль сопроцессора PC с загрузкой Windows или др. операционных систем. Для программирования контроллера Series 90-70 используются языки «LD» и «С».



Рис. 2.27

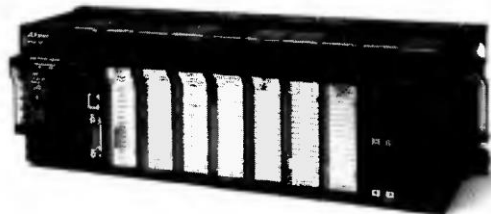


Рис. 2.28

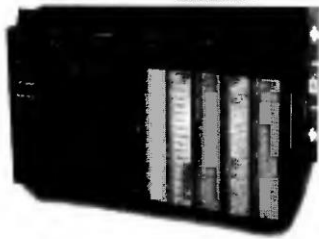


Рис. 2.29



Рис. 2.30

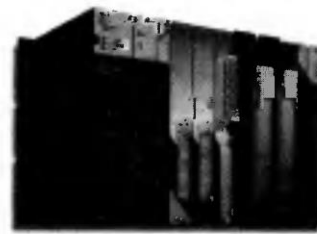


Рис. 2.31

Станция оперативного управления типа OCS/OCS 100/OCS 200/OCS 250 (рис. 2.30) включает контроллер, операторскую панель и систему ввода/вывода. Контроллер может быть как моноблочным, так и модульным, содержащим до 4-х модулей ввода/вывода SmartStack. Объем памяти для программ — 64... 128 кбайт в зависимости от типа, время цикла — 0,7 мс. Встроенные интерфейсы: CsCAN, DeviceNet, RS-232/RS-485. Программирование контроллеров осуществляется с персонального компьютера.

Модульный контроллер с открытой архитектурой и повышенной функциональностью PACSystem RX7i (рис. 2.31) выполнен на базе шины VME64 с поддержкой плат различных производителей, в том числе Ethernet и GENIUS. В качестве процессора используется Pentium III CPU, 300MHz или 700MHz. Объем памяти

— 10 Мбайт. Контроллер имеет встроенный Ethernet 10/100 и построен на базе контроллера Series 90-70.

Основной полевой шиной для связи контроллеров GE Fanuc с полевым уровнем и между собой является Genies. Физической средой шины Genies является экранированная витая пара или оптоволокно. Помимо шины Genies контроллеры GE Fanuc поддерживают шину Profibus DP. Помимо модулей ввода/вывода, устанавливаемых в базовый конструктив контроллеров GE Fanuc, выпускаются системы ввода/вывода Field Control, включающие несколько модулей, среди которых должен быть модуль интерфейса сети Genies, Profibus DP и Ethernet.

Инструментальные средства программирования контроллеров интегрированы в пакете Proficy Machine Edition (ME), который включает также программы управления на базе PC и систему построения HMI Cimplicity ME View. Программирование контроллеров осуществляется с помощью инструментальной среды SIMPLICITY Logic Developer.

2.2.8 Контроллеры компании *ICP DAS*, Тайвань

PC-совместимые контроллеры (SoftPLC) компании *ICP DAS* отличаются от классических ПЛК тем, что многие функции реализуются на программном уровне, а наличие мощного программного обеспечения промышленного компьютера расширяет возможности PC-совместимых контроллеров. К основным преимуществам контроллеров относятся:

- 54) использование открытых протоколов, что позволяет интегрировать в одну систему устройства широкого спектра производителей;
- 55) простота программирования и доступность широкого спектра программного обеспечения, что минимизирует затраты времени и средств на создание системы;
- 56) интеграция с системами верхнего уровня, что позволяет обеспечить доступ к данным технологического процесса со стороны операторских станций верхнего уровня системы управления предприятием.

Контроллеры и модули распределенного ввода/вывода серии 1-7000 и 1-8000 компании *ICP DAS*, распространяемые компанией *IPC2U Group*, предназначены для управления технологическими процессами, встраивания в технологическое оборудование, сбора данных и пр.

Линейка контроллеров и модулей серии 1-7000 включает процессорные модули (контроллеры серии 1-7188), коммуникационные модули, модули аналогового ввода и вывода, модули дискретного ввода/вывода, таймеры/счетчики. Каждый мо-

дуль представляет функционально законченное устройство, размещенное в пластиковом корпусе из негорючей пластмассы ABS. На корпусе расположены необходимые разъемы и клеммные соединители для винтовой фиксации внешних входных и выходных цепей. Установка модулей не требует специальных объединительных плат и может осуществляться как на стандартную несущую 35-мм DIN-рейку, так и на любую плоскую панель или стену. К числу основных достоинств модульной системы относятся; сокращение затрат на кабельную продукцию, повышение живучести системы за счет снижения затрат на эксплуатацию, замену и модернизацию системы.

PC-совместимые контроллеры 1-7188 (рис. 2.32) представляют собой функционально законченные устройства, размещенные в компактных пластиковых корпусах. В контроллер установлен процессор AMD188-40 МГц, объем памяти 128...512 кбайт SRAM, электронный Флэш-накопитель объемом 256...512 кбайт, часы реального времени, порт Ethernet и последовательные порты RS-232 и RS-485. Модификации 1-7188X позволяют устанавливать в корпус специальные мезонинные модули с цепями ввода/вывода сигналов. Такое решение позволяет в ряде случаев обходиться без внешних модулей ввода/вывода. Ряд контроллеров 1-7188 имеют встроенную систему программирования ISaGRAF (1-7188 EG/EGD/XGD), ОС — Mini OS7 или ROM DOS.

Контроллеры 1-7188 и модули ввода/вывода серии 1-7000 поддерживаются SCADA-системой Micro TRACE MODE 6. В этом случае программирование контроллеров осуществляется на 5-ти языках программирования по стандарту МЭК 61131-3. Контроллер, запрограммированный в Micro TRACE MODE 6, может быть подключен к операторскому ПК на базе SCADA TRACE MODE 6 через сеть Ethernet IOBaseT по протоколу I-NET TCP/IR. При этом программирование контроллеров и SCADA ПК осуществляется в единой инструментальной системе, а все настроечные параметры вводятся один раз и многократно используются на любых физических устройствах проекта (в контроллерах и на ПК). Настройка параметров сети 1-7000 также автоматизирована процедурой автопостроения. Предусмотрена облегченная настройка на YCO ICP/DAS серии 1-7000 с помощью процедуры автопостроения.



Рис. 2.32

Среди новых моделей микроконтроллеров серии 1-7000 отметим контроллеры I-7188EF-016 и I-7188XDB-CAN. Модель I-7188EF-016 содержит порты Ethernet IOBaseT, RS-485, RS-232 и изолированный FRnet. Данное устройство предназначено для подключения модулей ввода/вывода, работающих в сети FRnet, к персональному компьютеру через порт Ethernet по протоколу Modbus или DCON. Каждый контроллер I-7188EF-016 способен объединить до 16-ти модулей по 16-ти каналам ввода/вывода в каждом модуле. Таким образом, I-7188EF-016 поддерживает до 256-ти каналов ввода/вывода.

Контроллер I-7188XDB-CAN — программируемый микроконтроллер на базе процессора 80188-40 МГц, ОЗУ — 512 кбайт, флэш-ПЗУ — 512 кбайт, ОС — MmiOS7. Устройство имеет интерфейсы RS-232, RS-485 и порт CAN bus. Программирование осуществляется на языке C/C++.

PC-совместимые контроллеры серии 1-8000 (рис. 2.33) имеют улучшенные технические характеристики и более широкий диапазон рабочих температур. Конструктивно контроллер серии 1-8000 выполнен в виде отдельного блока, содержащего центральный процессор, источник питания, панель управления, коммуникационные порты и от 4 до 8 слотов расширения. В качестве операционной системы используется MiniOS7.

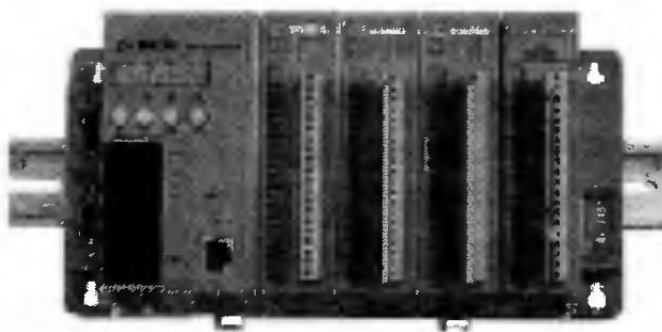


Рис. 2.33

Модули ввода/вывода серии 1-8000 (более 50 моделей) устанавливаются непосредственно в корзину контроллера (от 4-х до 8-ми слотов). Для расширения системы можно использовать специальные корзины расширения, подключаемые по шине RS-485, или отдельные модули ввода/вывода серии 1-7000.

Модули расширения серии 1-8000 делятся на два типа: параллельные и последовательные. Модули параллельного типа — высокоскоростные устройства ввода/вывода, которые могут быть установлены только в контроллеры серии 1-8000/ WinCon-8000. Модули последовательного типа обладают более низкой скоростью обмена и могут устанавливаться как в слоты расширения контроллеров, так и в слоты корзин расширения 87к4, 87к5, 87к8, 87к9, обеспечивая, таким образом, расширение контроллеров или работая в качестве станции удаленного ввода/вывода с интерфейсом RS-485.

Среди модификаций контроллеров серии 1-8000 отметим контроллеры со встроенной системой программирования ISaGRAF, системой моделирования MatLab, интерфейсами Ethernet IOBaseT.

Встроенную систему программирования ISaGRAF имеют контроллеры 1-8417 (40 МГц, ОЗУ — 128 кбайт, флэш-ПЗУ — 256 кбайт, IxRS-232, IxRS-485, IxRS-232/RS-485, 4 слота), 1-8417 (ОЗУ — 512 кбайт, флэш-ПЗУ — 512 кбайт, 4 слота), 1-8437 (добавлен порт Ethernet 10 BaseT), T8817 (8 слотов), 1-8837-80 (80 МГц, Ethernet 10 BaseT, 8 слотов). С системой MatLab применяется контроллер 1-8438-80 (80 МГц, ОЗУ — 512 кбайт, флэш-ПЗУ — 512 кбайт, Ethernet 10 BaseT, 4 слота) и 1-8831-ModbusTCP (Ethernet 10 BaseT, 8 слотов).

PC-совместимый контроллер серии WinCon-8000 (рис. 2.34) является дальнейшим развитием серии 1-8000 и представляет собой полноценный компьютер.

Он разработан на базе процессора Intel Strong ARM 206 МГц, имеет встроенный видеоконтроллер с портом VGA, разъемы USB, PS/2 для манипулятора и клавиатуры, а также возможность подключения накопителей стандарта Compact Флэш.

Все это дает возможность использовать этот контроллер как полноценный промышленный компьютер. В то же время WinCon сохраняет аппаратную преемственность и полностью совместим со всеми модулями ввода/вывода серии 1-8000. Операционная система реального времени Windows CE.NET позволяет программировать WinCon-8000, используя Visual Basic. NET, Visual C, Embedded Visual C++, а также современные SCADA-системы.

Среди 18 моделей контроллеров WinCon-8000 имеются контроллеры с поддержкой системы ISaGRAF. К ним относятся: W-8337-G (ОЗУ — 64 Мбайт, флэш-ПЗУ — 32 Мбайт, интерфейсы IxRS-232, IxRS-485, 2xEthernet, WinCE.Net, 3 слота); W-8737-G (7 слотов), W-8037-G (без слотов расширения). В контроллерах L-8731/8741-G (7 слотов), L-8331/8341-G (3 слота) установлена ОС Linux, добавлены порты USB.

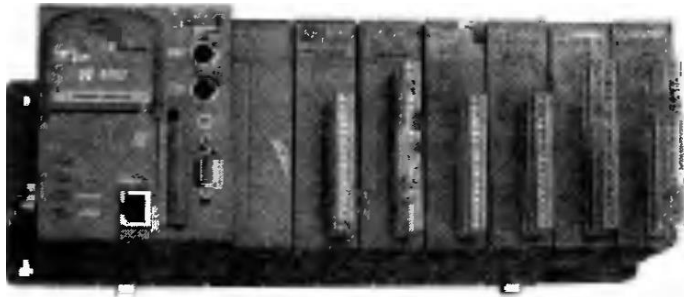


Рис. 2.34

Новые контроллеры **ICP DAS** серии KinCon-8045/8345/8745 построены на процессоре Intel StrongARM и работают под управлением ОС Windows CE. Контроллеры могут программироваться с помощью программного обеспечения KW, Microsoft EVC++ или VS.NET. Программное обеспечение KW позволяет вносить изменения в программу без выключения контроллера и в короткие сроки создавать многозадачные системы управления реального времени. Контроллеры серии KinCon поддерживает систему визуализации ProVisIT, с помощью которой можно создавать иерархическую структуру экранов. Вместе с сенсорной панелью (GA-700YY-UOM/USB) это полностью готовая система автоматизации с человеко-машинным интерфейсом.

2.2.9 Контроллеры компании *Koyo Electronics*, Япония

Контроллеры Direct Logic от компании **Koyo Electronics** подразделяются на моноблочные, модульные и PC-совместимые. К моноблочным ПЛК относятся DL05, DL06 и DL105. К модульным ПЛК — DL205, DL305 и DL405. PC-совместимый контроллер DL470 представляет собой промышленный компьютер с процессором Pentium 200 МГц MMX. Контроллер DirectLogic DL205 с процессорным PC-совместимым модулем WinPLC и ОС Windows CE относится к классу как модульных, так и PC-based контроллеров.

Моноблочный контроллер DL05 (рис. 2.35) имеет слот расширения, поддерживающий дополнительные модули аналогового и дискретного ввода/вывода с питанием 95...240 VAC и 12...24 VDC (8 типов), модуль памяти и часов-календаря реального времени или модуль подключения к сети DeviceNet, встроенный высокоскоростной



Рис. 2.35



Рис. 2.36



Рис. 2.37

счетчик 5 кГц, импульсный выход, два порта RS-232, протокол Modbus RTU, 4 контура ПИД-регулирования с автонастройкой параметров регулятора и др. возможности. Контроллер имеет быстросъемные клеммники и устанавливается на DIN-рейку.

Моноблочный контроллер DL-06 (рис. 2.36) имеет 4 слота для установки дополнительных модулей аналогового и дискретного ввода/вывода (до 24 аналоговых или до 64 дискретных каналов ввода/вывода) с питанием 95...240 **VAC** и 12...24 **VDC**. Число типов дополнительных модулей — 9. Контроллер имеет встроенный высокоскоростной счетчик, импульсный выход, связь по интерфейсам RS-232/RS-422/ RS-485 и протоколам Modbus RTU или ASCII, 8 контуров ПИД-регулирования и др. Программирование контроллеров DL-05 и DL-06 осуществляется на языке релейной логики.

Моноблочный контроллер DL-105 (рис. 2.37) представлен в виде 8 моделей с питанием от сети переменного или постоянного тока. Контроллер имеет один порт RS-232 (скорость обмена 9600 бод), осуществляет обмен по протоколу Modbus RTU или ASCII. Некоторые модели контроллера имеют высокоскоростные входы (5 кГц) или импульсные выходы (5...30 **VDC**, 7 кГц макс.). Язык программирования контроллера — RLL, число команд — 91, число таймеров/счетчиков — 64/64. Пакет программирования DirectSO/T для программирования только DL-105 в ОС Windows — PC-PGM-105. Для программирования помимо контроллера DL-105 других контроллеров семейства DirectLOG/C (DL-205, DL-305, DL-405) используется пакет PC-PGMSW. ПО DirectSOFT используется с ОС Windows 95/98/NT4 и выше.

Модульный контроллер DL205 (рис. 2.38) имеет каркасы на 3, 6 или 9 слотов. Число каналов дискретного ввода/вывода в модуле 4, 8, 12, 16 или 32, аналогового ввода/вывода — 2, 4 или 8. К специальным модулям относятся PC-совместимый модуль WinPLC, модуль Ethernet, DeviceNet, имитатор 8-канального ввода, Бейсик-сопроцессор. Время выполнения булевой операции в зависимости от типа процессора и объема памяти составляет 3,3 мкс. (ПРЦ D2-230), 1,4 мкс. (ПРЦ D2-

240) и 0,61 мкс. (ПРЦ D2-250). Число контуров ПИД-регулирования — 4 (для D2-250), встроенных портов — 1 (для D2-230) или 2 (для D2-240 и D2-250).

Контроллер осуществляет обмен данными по протоколам Modbus RTU, ASCII, скорость обмена 9600 бод (D2-230), 19,2 Кбод (D2-240) и 38,4 кбод (D2-250). Контроллеры DL-205 могут быть объединены в сеть DirectNet с общим числом абонентов до 90 (последовательный протокол по принципу ведущий/ведомый). При этом DL-250 (с ПРЦ D2-250) может выступать в качестве ведущего и ведомого, а DL-240 (с ПРЦ DL-240) — в качестве ведомого. Модели DL-250 и DL-240 имеют порты с передачей данных по протоколу Ethernet TCP/IP (для DL-250 - физический канал - витая пара, тип среды — IOBaseT, для DL-240 — оптоволокно, IOBaseFL).

Контроллеры DL-205 поддерживают как локальный, так и удаленный ввод/вы- вод. При локальном вводе/выводе применяется один каркас с 3. 4. 6 или 9 слотами и



Рис. 2.38



Рис. 2.39



Рис. 2.40

набором необходимых модулей. Для удаленного ввода/вывода удаленный ведущий модуль размещается в локальном каркасе и соединяется витой парой с удаленными ведомыми модулями. Число удаленных каркасов от 7 (по протоколу RM-NET — «удаленный ведущий») до 31 (по протоколу SM-NET — «секционный ведущий»). Скорость передачи по протоколу RM-NET фиксированная и составляет 38,4 бод, по протоколу SM-NET — от 38,4 бод при длине 1,2 км до 614,4 бод при длине 100 м.

Программирование контроллера осуществляется на языке RLL (релейной логики), программное обеспечение в среде Windows — пакет DirectSOFT.

Модульный контроллер DL-305 (рис. 2.39) имеет сменные процессорные модули и до 9 модулей расширения. Контроллер имеет каркасы на 5, 8 и 10 слотов. Число типов модулей расширения — более 40, модули имеют 8 и 16 каналов ввода/вывода. Быстродействие контроллера (время выполнения булевой операции) составляет 1,4 мкс. Контроллер имеет два встроенных порта: Modbus RTU и

K-siquence DirectNet, а также встроенный ПИД-регулятор с автонастройкой параметров регулятора. Программирование контроллера осуществляется на языке RLL, число базовых команд — 165.

Модульный контроллер DL-405 (рис.2.40) имеет каркасы на 4, 6 или 8 слотов. Для питания используются сети 110/220VAC и 125 VAC, а также сеть постоянного тока 24 VDC. Аналогично контроллеру DI.205 система ввода/вывода контроллера DL405 включает модули удаленного ввода/вывода ведущие и ведомые, а также ведомые модули секционного ввода/вывода. Число каналов дискретного ввода/вывода в модуле 8, 16, 32 и 64, аналогового ввода/вывода — 2, 4, 8 и 16. К специальным модулям относятся модуль Ethernet, 8-канальный модуль для индуктивных датчиков, модуль ПИД-регулятора на 16 контуров, 4-контурный регулятор температуры, имитатор 8/16-канального входа, высокоскоростной счетчик 100 кГц. К коммуникационным модулям относятся Modbus RTU, Ethernet, модуль сетевого интерфейса TIWAY, модем, модуль SDS (Smart Distributed System) и др. Помимо Modbus RTU и Ethernet доступен протокол DirectNet ведущий/ведомый. Время выполнения булевой операции в зависимости от типа процессора и объема памяти составляет 3,0 мкс (ПРЦ D4-430); 0,33 мкс (ПРЦ D4-440) и 0,96 мкс (ПРЦ D4-450). Число команд от 113 до 210, число таймеров/счетчиков 128... 256/128... 256.

Система ввода/вывода поддерживает пять типов конфигурации системы: локальный ввод/вывод, расширенный ввод/вывод (за счет увеличения числа каркасов локального ввода/вывода с модулем расширения D4-EX), удаленный ввод/вывод (до 7 удаленных каркасов), секционированный ввод/вывод (аналогично DL-205) и распределенная система ввода/вывода SDS (взаимодействие с локальной системой через модуль интерфейса SDS). Для удаленного ввода/вывода используется удаленный ведущий (модуль D4-RM), размещенный в локальном каркасе. Процессор локального каркаса обновляет информацию в модуле D4-RM, который управляет обменом данными между удаленными ведомыми модулями (D4-RS), установленными во всех удаленных каркасах. Вместо модуля D4-RM непосредственное взаимодействие с ведомыми модулями может осуществлять процессор локального каркаса ввода/вывода.

При секционированном вводе/выводе используется секционированный ведомый модуль D4-SS-xxx, представляющий собой моноблочное устройство, содержащее блок питания, блок ввода/вывода и коммуникационный порт.

Система ввода/вывода SDS предусматривает наличие интерфейсного модуля ввода/вывода SDS в локальном каркасе. Все периферийные модули подключаются

к интерфейсному модулю с помощью 4-проводного коммуникационного кабеля. Максимальное число модулей в одной системе — 8, число периферийных устройств на один модуль SDS — 64; максимальное число периферийных устройств, таким образом, составляет 512 устройств.

Программирование контроллера осуществляется с помощью пакета DirectSOFT (PC-PGMSW) в режимах on-line и off-line.

В табл. 2.12 приведены краткие технические характеристики контроллеров компании *Koyo Electronics*.

Таблица 2.12. Характеристики контроллеров компании Koyo Electronics.

Тип ПЛК	Число входов/выходов	Макс. число каналов ввода/вывода	Объем памяти программ	Объем памяти данных	Интерфейс	Питание
DL05	8/6 встроенные	30	2 кслов	4 кслов	DeviceNet, Profibus, Modbus RTU, DirectNet	12/24 VDC, 220 VAC
DL06	20/16 встроенные	100	7,5 кслов	7,3 кслов	DeviceNet, Profibus, Modbus RTU, DirectNet, Ethernet	
DL105	10/8 встроенные	18	2 кслов	384 слов	DeviceNet	24 VDC, 110/220 VAC
DL205	до 256	256...16384	(2...15,8) кслов	256...14,6 кслов	DeviceNet, Profibus, Modbus RTU, DirectNet, Ethernet	12/24 VDC, 110/220 VAC
DL305	до 368	1152	7,7 кслов	7,1 кслов	DeviceNet, Modbus RTU, SDS, Ethernet	12/24 VDC, 110/220 VAC
DL405	640...2048	1152...16384	(3,5...15,5) кслов	(3...15,3) кслов	DeviceNet, Profibus, Modbus RTU, DirectNet, Ethernet	24/125 VDC, 110/220 VAC
DL470	Промышл. компьютер проц. P200	Слоты расшир. 1×PCI/ISA, 2×PCI, 1×ISA	НЖМД 2,1 Гбайт, ОЗУ 64 Мбайт	—	2×RS-232, 2×USB, Ethernet 10 BaseT	220 VAC

PC-совместимый контроллер на базе модуля WinPLC в составе DL-205.

Модуль WinPLC (рис. 2.41) представляет собой процессор со встроенной операционной системой WindowsCE, управляющий модулями ввода/вывода контроллера DL205. В состав контроллера входят высокоскоростной порт Ethernet IOBaseT и последовательный порт RS-232 для подключения периферийных устройств.



Рис. 2.41

Более 30 модулей, разработанных для контроллера DL205, могут использоваться с WinPLC. В качестве программного обеспечения используется среда выполнения Think&Do, поставляемая вместе с контроллером. Основой программы среде Think&Do являются создаваемые пользователем блок-схемы, поддерживающие большой набор математических операций для переменных таких типов, как целые, так и с плавающей точкой. Объем памяти WinPLC: ОЗУ — 2 Мбайт, флэш-память — 4 Мбайт, ОЗУ с питанием от аккумулятора — 64 кбайт. Таким образом, WinPLC объединяет достоинства промышленного компьютера с богатым программным обеспечением и программируемого контроллера с развитой системой ввода/вывода данных.

2.2.10 Контроллеры фирмы *Matsushita Electric Works* (Япония)

В состав контроллеров серии FP входят моноблочные контроллеры FP0 и FP Sigma, моноблочный контроллер FP1 и модульный контроллер FP2. Для контроллеров

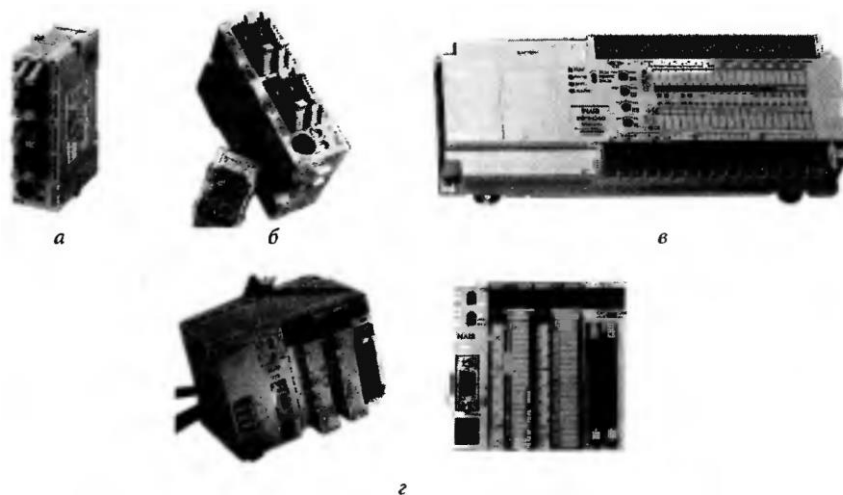


Рис. 2.42

серии FP выпущен FP-OPC сервер по стандарту OPC DA (v1-v3). Подробные сведения о контроллерах FP0 и FP2 приведены в работе [2.9]. Ниже рассматриваются характеристики и области применения моноблочных контроллеров FP Sigma (FPZ) и FP1. На рис. 2.42 представлена линейка контроллеров фирмы **Matsushita** — FP0 (а), FPZ (б), FP1 C40(в) и FP2 (г).

Контроллер FPX по техническим характеристикам несколько превосходит контроллер FP0. К числу базовых модулей контроллера FPZ относятся модуль FPG-C32T на 16DI/16DO, модуль FPG-C32T2 на 16DI/16DO, модуль FPG-C24R2 на 16DI/8RO.

С использованием модулей расширения контроллера FP0 можно увеличить число каналов ввода/вывода до 128 (для модулей FPG-C32T и FPG-C32T2) и до

120 для модуля FPG-C24R2. С использованием модулей расширения FPG-XY64D2T на 32DI/32DO контроллера FPZ число каналов ввода/вывода возможно увеличить до 288 и 280 соответственно.

Контроллер FP1 представляет собой набор высокопроизводительных базовых модулей с числом входов/выходов от 14 до 152. За счет модулей расширения возможно наращивание входов/выходов до 256. К базовому модулю допускается подключение до 2-х модулей расширения.

Данные входов контроллера FP1:

- 57) входное напряжение — 12...24 **VDC**;
- 58) входное напряжение/ток «1» — 10 В/3 мА; «0»: 2,5В/1 мА;
- 59) входное сопротивление — 3 кОм;
- 60) индикация — светодиоды.

Данные релейных выходов:

- 61) тип контакта — НО
- 62) нагрузка контакта — 2А (250 **VAC**), **2А** (30 VDC);
- 63) механический ресурс — 100000 срабатываний при полной нагрузке.

Данные транзисторных выходов:

- 64) тип выхода — ОК;
- 65) коммутируемое напряжение — 5...24 **VDC**;
- 66) защита от перенапряжений — стабилитроны.

Основные технические характеристики контроллеров FP1 приведены в табл.

2.13.

Таблица 2.13. Технические характеристики контроллеров FP1

Тип	FP1-C14	FP1-C16	FP1-C24 (C)	FP1-C40 (C)	FP1-C56 (C)	FP1-C72 (C)
Число встроенных входов/выходов	8/6	8/8	16/8	24/16	32/24	40/32
Максимальное число входов/выходов	54 (14+40)	56 (16+40)	104 (24+40+40)	120 (40+40+40)	136 (56+40+40)	152 (72+40+40)
Быстродействие	1,6 мкс на логическую команду					
Память программ (шагов/кбайт)	900/1,8		2720/5,4		5000/10	
Число базовых/расширенных команд	41/85		80/111		81/111	
Память данных, слов (DT)	256		1660		6144	
Последовательный интерфейс (COM-порт)	Нет		RS-232 (все модели FP1-CxxC)			
Габаритные размеры (Ш×В×Г)	120×81×45/74 (DC/AC)		190×96×45/74 (DC/AC)	260×96×45/74 (DC/AC)	260×120×45/74 (DC/AC)	300×120×45/74 (DC/AC)

Для увеличения числа входов/выходов до 152/256 применяются модули расширения FP1-E8 (4 DI + 4 DO, 8 DI + 8 DO), FP1-E16 (8 DI + 8 DO, 16 DI + 16 DO),

FP1-E24 (16 DI + 8 DO) и FP1-E40 (24 DI + 16 DO). К базовому модулю можно подключить до двух модулей расширения, а через шину удаленной периферии MEWNET-TR могут подключаться модули аналогового ввода/вывода типа FP1 4 A/D и FP1 2 D/A.

Для обмена данными контроллер FP1 имеет интерфейсы RS422, RS-232C (COM-порт у контроллеров, начиная с C24C), GSM-интерфейс. Кроме того, контроллеры могут обмениваться данными по шинам C-NET и Profibus DP (интерфейс RS-485). Сеть фирмы **Matsushita** MEWNET-F позволяет использовать в качестве ведущих контроллеры FP2, а в качестве ведомых — FPO, FP1, операторские панели и др. (до 32 ведомых устройств подключаются по витой паре на расстоянии до 700 м).

Программирование контроллеров FP1 осуществляется с помощью единого для контроллеров серии FP универсального пакета NAIS Control 1131, соответствующего стандарту МЭК 61131-3. С 2006 г. прекращен выпуск контроллеров серии FP1, FP3 и FP10.

Модульные контроллеры FP2, технические характеристики которых приведены в работе [2.9], имеют максимальное число входов/выходов — до 2048 с использованием удаленной периферии по шинам S-LINK и MEWNET-F. Модуль расширения S-LINK имеет два порта, к каждому из которых могут подключаться до 128 каналов ввода/вывода (используется 4-проводной кабель). Шина MEWNET-F обеспечивает подключение по двухпроводному кабелю длиной 800 м.

2.2.11 Контроллеры фирмы *Mitsubishi Electric*, Япония

К моноблочным контроллерам относятся контроллеры типа FX1S (рис. 2.43), FX1N (рис. 2.44), FX3U (рис. 2.45) и контроллеры серии ALPHA. К модульным контроллерам относятся контроллеры MELSEC System Q.



Рис. 2.43

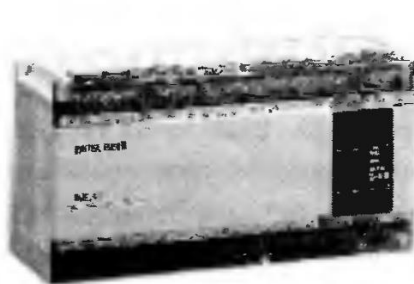


Рис. 2.44

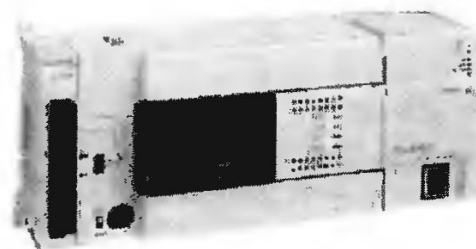


Рис. 2.45

Контроллер FX1S имеет от 10 до 30 входов/выходов в зависимости от модели, память программ — 2К. Контроллер FX1N имеет от 14 до 60 входов/выходов, контроллеры FX3U — от 8 до 64 входов/выходов. Для увеличения числа входов/выходов контроллеров FX1S, FX1N и FX3U к базовым модулям подключаются модули расширения (аналогового и дискретного ввода/вывода) и компактные блоки расширения (дискретного ввода/вывода). При этом общее число входов/выходов достигает 132 для FX1N и 256 для FX3U. Контроллеры снабжены съемным дисплейным модулем, имеют встроенные порт RS-422, два аналоговых потенциометра, встроенные часы реального времени, переключатель RUN/STOP. Быстродействие — до 0,065 мкс на одну логическую команду. Контроллеры имеют высокоскоростные счетные входы и импульсные выходы. Характеристики контроллеров FX1S, FX1N, FX3U приведены в табл. 2.14. Также имеются коммуникационные модули для подключения контроллеров к полевым шинам Profibus DP, Device Net, ASI, CC-Link и Ethernet.

Таблица 2.14. Характеристики контроллеров FX1S, FX1N, FX3U

Тип модуля	FX1S	FX1N	FX3U
Число встроенных входов/выходов базового блока	10/14/20/30	14/24/40/60	8/16/24/32/40/64
Память программ, шагов	2000	8000	64000
Быстродействие, мкс на логическую команду	0,55		0,065
Набор команд	114		125
Регистры данных	256	8000	
Число таймеров/счетчиков	64/32	256/235	
Максимальное число входов/выходов	30	128	256
Поддерживаемые сети	Computer Link, Peer to Peer, Parallel Link, ASi	Computer Link, Peer to Peer, Parallel Link, I/O Link, Open Fieldbus	Profibus DP, ASi, I/O Link, CC-Link, DeviceNet, CANopen, Ethernet
Программное обеспечение	IEC 1131.3 и MELSEC-Software		
Напряжение питания	12-24 VDC, 240 VAC		

Новое поколение моноблочных контроллеров компании — ПЛК FX3U. В зависимости от модели число встроенных каналов дискретного ввода/вывода от 16 до 128. Дополнительные модули могут быть подключены к ЦПУ по внутренней высокоскоростной шине (до 256 каналов). С модулями удаленного ввода/вывода максимальное число каналов — до 384. Отличительной особенностью контроллера является наличие второй шины расширения для подключения до 10 дополнительных модулей-адаптеров FX3U ADP, увеличенная память программ (64 кшагов), высокое быстродействие (0,065 мкс на базовую инструкцию). Коммуникационные модули контроллера поддерживают сети Ethernet 10/100 BaseT, Profibus DP, DeviceNet,

CANopen, ASi, а также последовательные интерфейсы USB, RS-232/RS-422/RS-485. Для отладки программ и диагностики работы контроллера предлагается дисплейный модуль FX3U-7M, который позволяет выводить коды ошибок программы, отображать и изменять состояние регистров памяти и настраивать часы РВ. Технические характеристики контроллера FX-3U приведены в табл. 2.15.

Таблица 2.15. Характеристики контроллеров FX-3U

Тип	FX3U-16MR/ ES	FX3U-32MR/ ES	FX3U-48MR/ ES	FX3U-64MR/ ES	FX3U-80MR/ ES	FX3U-128MR/ ES
Число встроенных входов	8	16	24	32	40	64
Число встроенных выходов	8	16	24	32	40	64
Тип выхода	Релейный/транзисторный					
Питание	24 VDC/100–240 VAC					
Габариты, мм (Ш×В×Г)	130×90×86	150×90×86	182×90×86	220×90×86	285×90×86	350×90×86

К моноблочным контроллерам фирмы Mitsubishi относится серия контроллеров ALPHA. Контроллер (рис. 2.46) имеет ЖК-дисплей и 8 функциональных клавиш для программирования, ввода данных, создания и воспроизведения текстовых сообщений, память программ — 1500 бит, функцию часы/календарь, число входов/выходов от 6 до 20 в зависимости от модели. Программное обеспечение контроллера (AL-PCS/WIN-EU) совместимо с ОС Windows. Настройка программы возможна, как в режиме online с подсоединенным контроллером, так и в режиме offline без контроллера. Кроме программирования на базе контроллера, возможно также программирование с помощью функциональных клавиш и дисплея, без использования дополнительного оборудования. Характеристики контроллеров серии ALPHA приведены в табл. 2.16.

Таблица 2.16. Характеристики контроллеров серии ALPHA

Тип модуля	AL2-10MR-A	AL2-10MR-D	AL2-14MR-D	AL2-20MR-A	AL2-20MR-D	AL2-24MR-A
Число Входов/выходов	10 (100–240) VAC	10 24 VDC	14 (расшир. до 18) 24 VDC	20 (100–240) VAC	20 24 VDC	24 (расшир. до 28) 24 VDC
Число цифровых входов с обработкой аналог. сигналов	—	6	8	—	8	—
Число дискретных входов	4 (100–240 VAC)	6 (100–240 VAC)	14 (24 VDC)	12 (100–240 VAC)	12 (24 VDC)	15 (100–240 VAC)
Число дискретных выходов	2 (8А, реле)	4 (1А/24 VDC транзистор)	6 (8А, реле)	8 (8А, реле)	8 (8А, реле)	9 (4×8А/5×2А)
Питание	100–240 VAC	24 VDC	24 VDC	100–240 VAC	24 VDC	100–240 VAC
Габаритные размеры, мм	71×90×55	71×90×55	124,6×90×52	124,6×90×55	124,6×90×55	124,6×90×55

К модульным контроллерам относятся контроллеры MELSEC System Q, MELSEC AnSH, QnAS и QnA.

Контроллер MELSEC System Q (рис. 2.47) представляет собой мощный модульный контроллер с возможностью контроля до 4096 локальных и до 8192 удаленных точек ввода/вывода. Встроенная память до 252 тыс. шагов, эквивалентная 1 Мбайт оперативной памяти, может быть расширена до 32 Мбайт установкой карты расширения памяти. В зависимости от требуемых задач в контроллере применяются однопроцессорные или многопроцессорные CPU. В табл. 2.17 приведены технические характеристики модулей CPU контроллера.

Таблица 2.17. Характеристики модулей CPU контроллера MELSEC System Q

Тип CPU	Q00J CPU	Q00 CPU	Q01 CPU	Q02 CPU	Q02H CPU	Q06H CPU	Q12H CPU	Q25H CPU
Память программ, тыс. шагов	8 (32 кбайт)		14 (56 кбайт)	28 (112 кбайт)		60 (240 кбайт)	124 (496 кбайт)	252 (1008 кбайт)
Число входов/выходов	256/2048	1024/2048		4096/8192				
Быстродействие, мкс	0,2	0,16	0,1	0,079	0,034			
Таймеры/ счетчики	512/512			2048/1024				
Максимальное число вставляемых модулей	16	24		64				
Габариты (Ш×В×Г), мм	245×98× ×98*	27,4×98×89,3						

* Габариты базового блока с модулем CPU, пятью посадочными местами и блоком питания.

Базовые шасси контроллера рассчитаны на 3 модуля (Q33B-E), 5 модулей (Q35B-E), 8 модулей (Q38B-E) или 12 модулей (Q312B-E). Модули в базовом шасси автоматически адресуются. К базовому шасси может быть присоединено до 7

шасси расширения с 64 модулями. В зависимости от числа модулей определяется мощность блока питания. Мощность блоков питания составляет 45, 105 или 160 ВА в зависимости от модификации.

В базовое шасси может быть установлен модуль PPC, представляющий собой компактный персональный компьютер, способный решать задачи программирования контроллера на языках высокого уровня (C++, Visual Basic), визуализации, ведения баз данных и др. задач, свойственных PC. В безвентиляторном модуле PPC используется ПРЦ фирмы Intel (400 МГц, память 128 Мбайт), поддерживаются ОС Windows 2000/NT. Модуль имеет следующие интерфейсы: 2xRS-232, 2xUSB, 1xEthernet (100 BaseTX/10 BaseT), 1xPS/2. Контроллер MELSEC System Q поддерживает открытые сети Ethernet TCP/IP, Profibus DP/FMS, DeviceNet, ASi и сети MELSEC (CC-Link, MelsecNet/B/10/H и др.).

Программирование MELSEC System Q осуществляется с помощью пакетов программирования контроллеров GXIEC Developer по стандарту IEC 1131-3, GX Developer, конфигуратора сети GX Configurator DP и пакета визуализации MX4 SCADA.

Модульные контроллеры серии MELSEC AnSH (рис. 2.48) применяются для решения широкого спектра задач управления на базе 7 процессорных модулей, дифференцированных по уровням, и 60 модулей различных приложений.

Несмотря на небольшие размеры, контроллер AnSH обладает памятью 30К программных шагов, время выполнения логической инструкции составляет 0,25 мкс.



Рис. 2.47



Рис. 2.48

Контроллер поддерживает сети Profibus и Ethernet, а также сети фирмы **Mitsubishi** — MelsecNet/B и MelsecNet/10.

Характеристики контроллера MELSEC AnSH представлены в табл. 2.18

Таблица 2.18. Характеристики контроллера MELSEC AnSH

Наименование	Характеристика
Число входов/выходов	1024
Число аналоговых сигналов	До 256, макс. разрешение 14 бит
Память	8192 регистров, 30К шагов
Время выполнения инструкции	Обработка бита: 0,25 мкс, обработка слова: 9,0 мкс
Позиционирование	Макс. 96 шаговых двигателей, макс. 32 серводвигателей, макс 64 высокоскоростных счетчика
Источник питания	115/230 VAC, 12/24 VDC
Размеры, мм (Ш×В×Г)	(220...430)×130×94

Контроллер MELSEC QnAS представляет собой модификацию контроллера MELSEC AnSH со значительно увеличенной производительностью процессора. Система может быть расширена до 1024 локальных и 8192 удаленных сигналов ввода/вывода. Процессор выполняет арифметические операции в 10 раз быстрее, а битовые — за 0,075 мкс. QnAS имеет объем памяти 60К шагов, а со слотом PCMCIA объем памяти может быть увеличен до 2 Мбайт.

2.2.12 Контроллеры компании *Moller GmbH*, Германия

Компания *Moller GmbH* выпускает семейство моноблочных (компактных) и модульных контроллеров, а также несколько типов управляющих реле EASY.

Управляющее реле EASY (рис. 2.49) предназначено для логического управления освещением, водоснабжением, вентиляцией, температурным режимом, управления транспортерами, смесителями и пр. В зависимости от модели имеется до 12 дискретных входов и 8 транзисторных или релейных выходов, до двух аналоговых входов (0...10 **VDC**), 8 таймеров, 8 счетчиков и 8 аналоговых компараторов. EASY снабжен текстовым ЖК- дисплеем на 4 строки по 12 символов и 8 кнопками для ввода программы и параметров процесса. С помощью COM-порта осуществляется подключение EASY к компьютеру для программирования с помощью пакета EASY-Soft. Возможна связь EASY с контроллерами по интерфейсу Profibus DP или ASi. Питание контроллера 24 VDC/115 **VAC**/220 **VAC**.

К моноблочным контроллерам относится семейство контроллеров PS4 (PS4- 100, PS4-150, PS4-200 и PS4-300), к модульным — контроллеры типа PS 416.

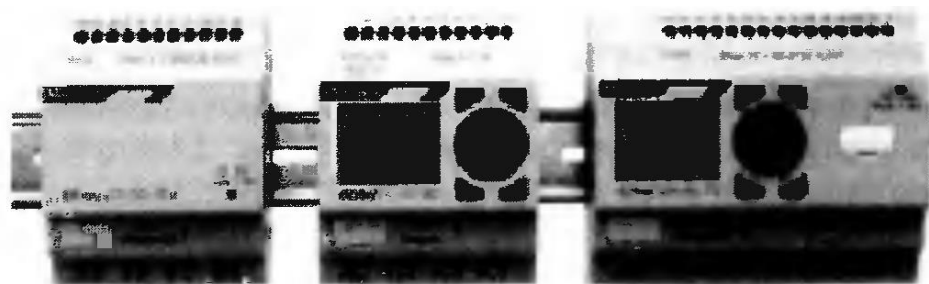


Рис. 2.49

Моноблочные (компактные) контроллеры серии PS4. Контроллеры этой серии включают компактные контроллеры PS4-101/111, PS4-141/151 (рис. 2.50, *а*), PS4-201/271 (рис. 2.50, *б*), PS4-341 (рис. 2.50, *е*). В качестве модулей расширения к этим контроллерам применяются различные модули I/O (EM4-101/201/204 и LE4-116- DX1, LE4-116/206/622/633 и др). Для передачи данных используются полевые сети ProfiBus DP, InterBus и SucoNet. Физический канал — экранированная витая пара. При использовании сети SucoNet допустимая длина сегмента без использования повторителей — 600 м при скорости обмена 187,5 кбод.

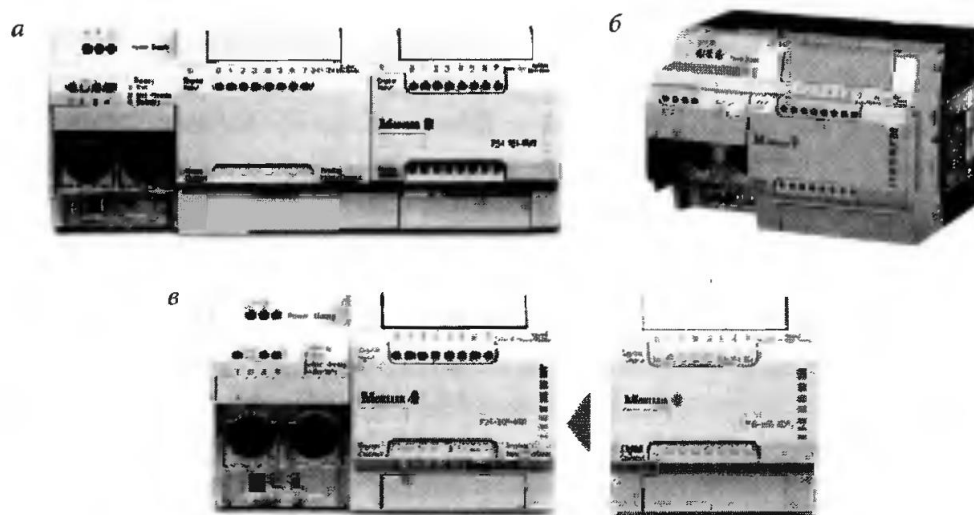


Рис. 2.50

В табл. 2.19 приведены краткие технические характеристики контроллеров PS4.

Таблица 2.19. Технические характеристики контроллеров серии PS4

Тип контроллера	Количество DI/DO	Количество AI/AO	Интерфейс	Питание	Модули расширения
PS4-141	16DI/14DO	2AI/1AO	RS-232/RS-485, Ethernet	24 VDC	—
PS4-151	16DI/8RO			120/240 VAC	—
PS4-201	8DI/6DO			24 VDC	+ до 6 модулей LE
PS4-271	12DI/8RO	4AI/4AO	RS-485	120/240 VAC	+ до 5 модулей LE
PS4-341	16DI/14DO	2AI/1AO	RS-232/RS-485	24 VDC	

Скорость обмена по интерфейсу RS-485 от 187,5 кбит/с до 375 кбит/с, длина сегмента без повторителя — 600 м при скорости обмена 187,5 кбит/с и 300 м при скорости обмена 375 кбит/с. Время выполнения 1К инструкций — 5 мс. Объем внутренней памяти PS4-201 32 Кб, для PS4-341 — 512 кбайт. Расширение памяти достигается с помощью внешних модулей памяти.

Моноблочный контроллер PS-416 (рис. 2.51) предназначен для решения задач управления сложными процессами с задачами от регистрации данных до расчета сложных алгоритмов управления. Контроллер PS-416 состоит из крейта (корзины) BGT-400, блока питания, процессорного модуля CPU-400, сетевых карт NET-400 и карт входов/ выходов INP-400, OUT-400. Процессорный модуль CPU-400 имеет объем основной памяти — 1 Мбайт, дополнительной памяти (флэш-память) — от 512 кбайт до 4 Мбайт. Тип процессора — 16-разрядный процессор с RISC-архитектурой.

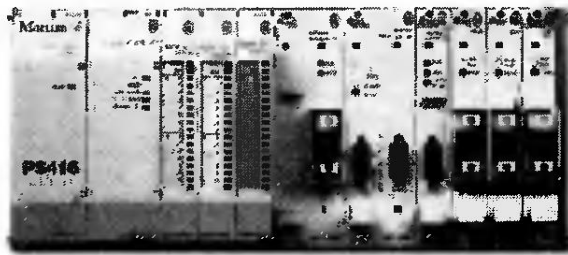


Рис. 2.51

Время обработки 1К инструкций — 0,5 мс. Интерфейс — RS-485. Крейт контроллера PS-416 имеет несколько модификаций с разным количеством посадочных мест: 9, 13 и 19. Питание контроллера — 220 **VAC**.

Характеристики сетевой карты контроллера: скорость передачи по сети — 187,5 кбит/с при длине сегмента 600 м, размер данных при посылке/приеме — 120 байт/120 байт, число подключаемых станций — 30.

Модуль дискретных входных сигналов INP-400 имеет 16 каналов (24 **VDC**), модуль выходных сигналов OUT-400 имеет 16 каналов (24 **VDC**). На лицевые панели модулей выведены 16 индикаторов состояния модуля.

В качестве программного обеспечения контроллера PS-416 используется система SUCOSOFT-S40, которая функционирует в среде WINDOWS и имеет стандарт соответствия IEC 1131. Языки программирования соответствуют стандарту IEC 61131-3 и включают IL, LD и FBD.

Модули расширения I/O EM4 (удаленные) и LE4 (локального расширения).

Модуль расширения EM4-201-DX2 обеспечивает удаленный ввод/вывод данных и передачу информации по промышленной сети контроллеру-мастеру, который производит обработку этих данных. Дискретный модуль EM4-201-DX2 имеет 16 дискретных входов (24 **VDC**). Модуль имеет два разъема SUCONET K/K1, предназначенные для соединения модуля с другими устройствами системы. В модуле расположен разъем для подключения модулей локального расширения LE4-116-DX1, LE4-116-XD1 и LE4-116-DD1. Расширяемый дискретный модуль EM4-204-DX1 аналогичен модулю EM4-201-DX2, но работает в сети Profibus-DP. Аналоговый модуль расширения EM4-101-AA2 имеет 8 аналоговых входов и 4 аналоговых выхода, а также два разъема SUCONET K/K1. С помощью специального переключателя S3 устанавливается количество и тип используемых аналоговых входов.

Модуль локального расширения LE4-116-DX1 имеет 16 дискретных входов (24 **VDC**). Модуль имеет разъем для подключения к модулю EM4-201-DX2 или к другим модулям LE4-116-DX1. Модуль LE4-116-DD1 имеет 8 DI и 8 DO, питание 24 **VDC**. Модуль LE4-116-XD1 имеет 16DO, питание 24 **VDC**. Модуль LE4-108-XR1 имеет 8RO, питание 24 VDC/230 **VAC**. Модуль LE4-308-HX1 имеет 8DI, питание 120/240 VAC. Модуль LE4-104-XP1 имеет пневматический выходной сигнал. К модулям аналогового ввода/вывода относятся модули LE4-206-AA1 (4 AI+2 AO, ± 10 **VDC**) и LE4-206-

AA2 (4 AI+ 2 AO, 0/4...20 мА). Модули управления энкодерами: LE4-622-CX1 (инкрементные энкодеры) и LE4-6343-CX1 (абсолютные энкодеры).

Группа коммуникационных модулей включает модули LE4-504-BS1 (Profibus DP Master), LE4-504- BT1 (Profibus DP Slave), LE4-503-BS1 (Profibus FMS), LE4-509-BS1 (LON), LE4-505-BS1 (ASi), LE4-501-BS1 (SucoNet K).

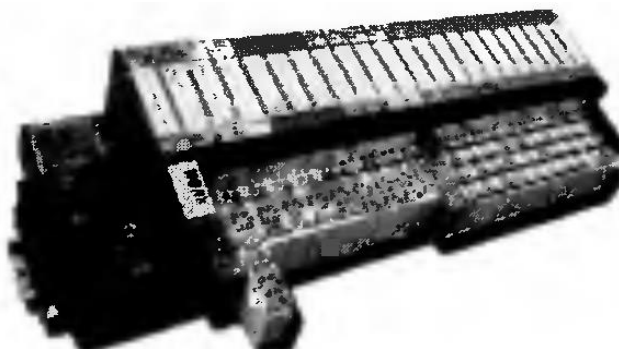


Рис. 2.52

Станции распределенного ввода/вывода WinBLOCK и System XI/ON показаны на рис. 2.52. Станция ввода/вывода WinBLOCK используется с сетями Profibus DP, CANopen, DeviceNet и InterBus. Модули станции имеют 8, 16 и 32 канала

ввода/вывода. Станция ввода/вывода XI/ON с модулями ECO на 8 и 16 каналов при ширине модуля 12,5 мм используется в сети Profibus DP в качестве Slave-узла. В качестве программного обеспечения применяется пакет I/O Assistant.

К новым модульным контроллерам компании Moeller относятся контроллеры XC10 для задач малой и средней сложности и XC200 для более сложных задач. Контроллеры имеют встроенные каналы дискретного ввода/вывода (8 DI 6 DO). К контроллеру могут быть подключены до 15 модулей расширения XIOC (495 каналов ввода/вывода). Контроллер XC200 имеет 32-разрядный RISC-процессор и встроенный порт Ethernet. Объем памяти программ — 256 кбайт, памяти данных — 512 кбайт.

Для программирования контроллеров используется пакет XSoft Pro (CoDeSys). Для связи контроллеров с верхним уровнем придается OPC и Web-серверы.

2.2.13 Контроллеры компании *National Instruments*, США

PXI (PCI extension for Instrumentation) — контроллер представляет собой компьютерную платформу, которая базируется на системной шине PCI (спецификация CompactPCI), ОС Windows и стандартных компьютерных технологиях с использованием стандартных интерфейсов и локальных сетей, в том числе сетей Ethernet.

Открытый стандарт PXI предложен альянсом PXISA (PXI Systems Alliance), куда вошли более 60 компаний. PXI представляет собой модульную систему сбора и обработки измерительной информации, состоящую из шасси с различным числом слотов для модулей ввода/вывода (рис. 2.53). Шасси допускает установку PXI-слотов, гибридных слотов и PXI Express-слотов.

Высокоскоростная масштабируемая последовательная шина PXI Express поддерживает пропускную способность 2 Гбайт/с на каждый слот. Данная шина допускает использование как модулей PXI Express, так и CompactPCI Express. Выпускаются шасси с 4, 6, 8, 14 и 18 слотами.

Управление PXI-системой может осуществляться с удаленного ПК, в который устанавливается плата PXI Express. Эта плата соединяется с помощью медного или оптоволоконного кабеля с PXI-модулем, который устанавливается в первый слот PXI-шасси. Максимальная длина линии связи составляет 7 м для медного и 200 м для оптоволоконного кабеля (модели PXI — PC1e 8361/8362, PXI — PCI 8331/8336 и др.).

Одним из классов PXI-контроллеров является класс встраиваемых в стойку контроллеров, которые поставляются с предустановленными ОС Windows, процессором, RAM, HDD, интерфейсами и драйверами (модели PXI/PXIe-8351, PXI/PXIe-8106 и др.).

Компания **National Instruments** выпускает большое число плат для PXI-систем: цифровые осциллографы, генераторы сигналов, платы для виброакустических измерений, анализаторы сигналов, цифровые мультиметры, реле, мультиплексоры, платы видеозахвата сигнала и программируемые источники питания. Диапазон анализируемых сигналов — от постоянного напряжения до радиочастот (диапазон частот плат ВЧ-диапазона составляет от 9,7 кГц до 6,6 ГГц).

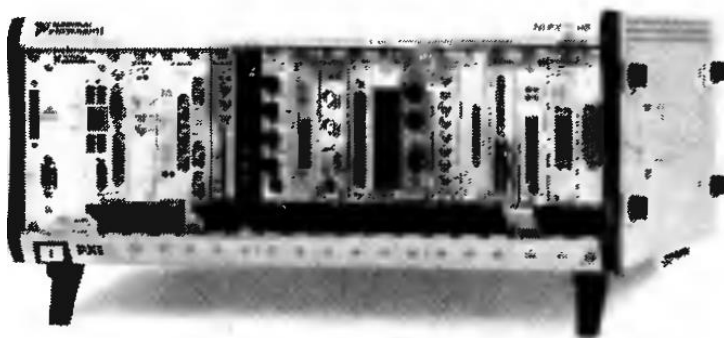


Рис. 2.53

Программирование и графическая разработка систем моделирования, измерения, тестирования и управления осуществляются с помощью среды разработки Lab VIEW (см. параграф 4.3.5).

2.2.14 Контроллеры компании *Omron* Согр., Япония

Моноблочные контроллеры. К числу моноблочных контроллеров относятся SYSMAC CPM1A/2A и SYSMAC CPM2C, рассмотренные в работе [2.9]. Контроллеры имеют до 100... 140 дискретных входов/выходов и позволяют подключать до 3...5 блоков расширения, в том числе для аналоговых сигналов входа/выхода и датчиков температуры.

Модульные контроллеры. К модульным контроллерам относятся контроллеры SYSMAC CQM1H, CS1 и C11 [2.9]. Контроллер SYSMAC CQM1H (рис. 2.54) имеет сетевой модуль Controller Link (скорость передачи в сети до 2 Мбайт/с), а также поддерживает сети DeviceNet, ProfibusDP, CompoBus/S, ASi. Число модулей ввода/вывода составляет 16, число дискретных входов/выходов до 256/256. Время выполнения базовой инструкции 0,375... 1,125 мкс, память программ до 15,2 кслов, память данных до 12 кслов.

Контроллер CS1 (рис. 2.55) обладает высокой производительностью со временем выполнения базовой инструкции в зависимости от одного из 9 модулей ЦПУ от 0,04 до 0,08 мкс. Более 100 типов модулей, в том числе модули Ethernet, Profibus DP, DeviceNet, Controller Link и др. позволяют обрабатывать до 5000 точек ввода/вывода.

Семейство модульных контроллеров SYSMAC CJ1 включает контроллеры серии CJ1H, CJ1G, CJ1M. Контроллеры CJ1 имеют малые габариты (90x65 мм), поддерживают сети DeviceNet, Profibus DP, CompoBus/S, Controller Link и Ethernet. Протокол MACRO для RS-232C/RS-485 позволяет подключить к каждому последовательному порту до 32 устройств.

На рис. 2.56 показан контроллер SYSMAC CJ1. В табл. 2.20 приведены характеристики базовых модулей контроллера CJ1.

Таблица 2.20. Характеристики модулей контроллера CJ1

Модель	Число входов/выходов	Время выполнения базовой инструкции, нс	Объем памяти, шагов	Карта памяти
CJ1H	2560	20	60...120K	Compact флэш memory
CJ1G	960...1280	40	10...60K	
CJ1M-CPU 12/13	360...640	100	10...60K	
CJ1M-CPU 22/23	360...640	100	10...20K	

Общее число входов/выходов зависит от числа блоков расширения. Так, для контроллеров CJ1H число блоков расширения (expansion rack) — до трех, для CJ1G от двух до трех, для CJ1M-CPU13 и -CPU23 — только один блок расширения.

Новые контроллеры CJ1M (рис. 2.57) имеют память данных 32 Кслов, порт RS-232C. Модули CPU22 и CPU23 имеют 10/6 дискретных входов/выходов, число мо-



Рис. 2.54



Рис. 2.55



Рис. 2.56

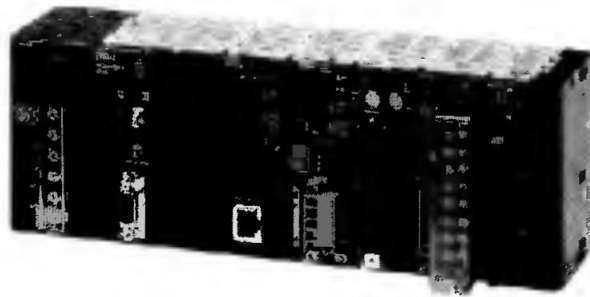


Рис. 2.57

дулей расширения — 10. Базовые модули ввода/вывода серии CJ1Wxx рассчитаны на 8, 16, 32 и 64 канала, специальные модули аналогового ввода/вывода рассчитаны на 2,4 и 8 каналов. К числу специальных модулей также относятся модули позиционирования, высокоскоростных счетчиков и др. Сетевые модули CJ1W-SCU21 имеют 2 порта RS-232, CJ1W-SCU41 один порт RS-232 и один порт RS-232/RS-485, CJ1W-ETN11 — порт Ethernet, CJ1W-CLK21 — Control Link и CJ1W-DRM21 — DeviceNet.

Программирование контроллеров семейства CJ1 осуществляется с помощью пакета программ CX-Automation Suite. Установка контроллеров и модулей расширения осуществляется на DIN-рельс. Питание контроллера 10,2...26,4 **VDC**.

Модульная система удаленного ввода/вывода Отгон SmartSlice (рис. 2.58). Система предназначена для сбора данных и удаленного управления и соединяется с контроллером по сети Profibus DP (скорость обмена до 12 Мбайт/с на расстояние до 1200 м на сегмент) или по сети DeviceNet. Система CX-One служит для настройки, программирования и контроля работы системы. В модулях системы SmartSlice производится первичная обработка сигналов. Например, в модулях аналогового ввода/вывода реализуются функции масштабирования, линеаризации, суммирования, дифференцирования, аварийной сигнализации и др.

Технические характеристики системы SmartSlice приведены в табл. 2.21.

Таблица 2.21. Технические характеристики системы SmartSlice

Модули ввода/вывода	Тип сигнала	Число каналов	Модули ввода/вывода	Тип сигнала	Число каналов
GRT1-ID4	Вход пост. тока, прп, 24 VDC	4	GRT-AD2	Аналоговый вход 0...20 мА, 4...20 мА, ±10В, 0...5В, 0...10 В	2
GRT1-ID4-1	Вход пост. тока, прп, 24 VDC	4	GRT-DA2	Аналоговый выход ±10 В, 0...5В, 0...10 В	2
GRT1-OD4	Транзисторный выход, прп, 24 VDC	4	GRT1-DA2C	Аналоговый выход 0...20 мА, 4...20 мА	2
GRT1-OD4-1	Транзисторный выход, прп, 24 VDC	4	GRT1-CP1-1 (модуль позиционирования)	24 VDC от инкрементного энкодера	2
GRT1-ROS2	Релейный выход 1×НО, 24 VDC/250 VAC	2	—	—	—



Рис. 2.58

2.2.15 Контроллеры компании *Rockwell Automation*

Идеология системы автоматизации на базе контроллеров компании основана на интегрированной архитектуре Integrated Architecture **Rockwell Automation**, позволяю-

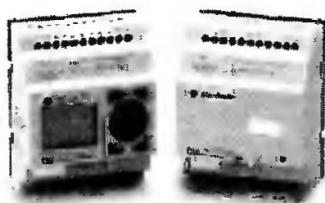


Рис. 2.59

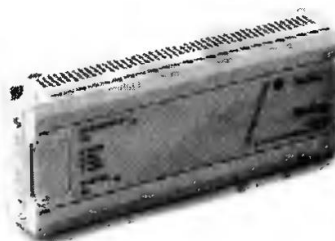


Рис. 2.60

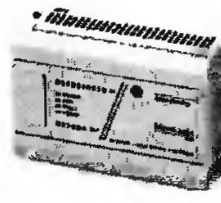


Рис. 2.61

щей синтезировать масштабируемую систему с использованием контроллеров различной производительности, систем визуализации, управления перемещением и пр. Концепция Integrated Architecture стала возможной благодаря сочетанию высокоэффективных технологий, таких как платформа управления Logix™, открытая сетевая архитектура NetLinx™, технологии визуализации ViewAnyWare™ и оболочка разработки программного обеспечения FactoryTalk.

В состав семейства контроллеров входят моноблочные контроллеры PICO, MicroLogix 1000, MicroLogix 1200 и MicroLogix 1500, модульные контроллеры SLC-500 и PLC-5, платформы CompactLogix, FlexLogix, ControlLogix и ProcessLogix. Кон-

троллеры MicroLogix 1200 и MicroLogix 1500 имеют возможность локального расширения за счет подключения с помощью шлейфа модулей ввода/вывода. К контроллеру MicroLogix 1200 дополнительные каналы ввода/вывода устанавливаются путем подключения до 6 цифровых или аналоговых модулей ввода/вывода. К контроллеру MicroLogix 1500 может быть подключено до 8 модулей цифрового или аналогового ввода/вывода Compact I/O.

Большую группу изделий составляют распределенные системы ввода/вывода: семейство FLEX I/O, семейство POINT I/O, 1769 Compact I/O, 1791 Block I/O, шасси ввода/вывода 1756 I/O, 1746 I/O, 1771 I/O и др.

Моноблочный контроллер PICO (рис. 2.59) предназначен для применения там, где требуется работа с минимальным числом дискретных и аналоговых входов/выходов. Контроллер выполняет основные функции типа логики, счета и согласования по времени. Для программирования контроллера используются программное обеспечение PicoSoft, встроенные ЖК-дисплей и мини-клавиатура.

Контроллеры MicroLogix 1000 (рис. 2.60) используются в приложениях, которые требуют небольшое число точек ввода/вывода (до 32). Все аналоговые модели MicroLogix 1000 имеют 16 цифровых каналов и 5 аналоговых (4 входа и 1 выход). Среди аналоговых входов — 2 входа по напряжению и 2 входа по току. Разрешение всех входов 16 бит. Аналоговый выход имеет настраиваемый диапазон по напряжению или по току, разрешение 15 бит. Все входы и выходы подключены к внутренней шине контроллера и размещены в едином конструктиве с процессорным блоком. Это позволяет добиться высокой скорости ввода/вывода. Программировать и отлаживать программы контроллера MicroLogix 1000 можно как на PC, так и с помощью ручного программатора MicroLogix HNP.

Контроллеры MicroLogix 1200 (рис. 2.61) имеют процессорный блок с 24 или 40 каналами ввода/вывода. Дополнительные каналы ввода/вывода устанавливаются пу-

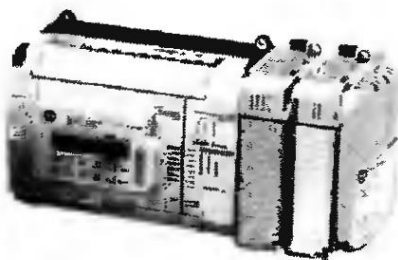


Рис. 2.62

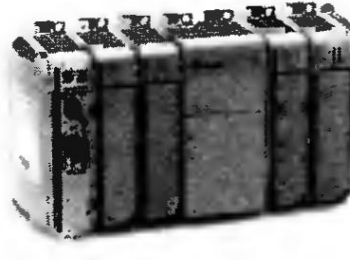


Рис. 2.63



Рис. 2.64

тем подключения модулей сбора данных: до 6 цифровых или аналоговых модулей ввода/вывода.

Контроллеры MicroLogix 1500 (рис. 2.62) состоят из базового блока, на котором расположены пассивная шина и модули на 24 или 28 цифровых входов/выходов, и процессорного блока. В серии 1500 расширены коммуникационные возможности контроллера — добавлена поддержка протокола Modbus RTU и обмена с ASCII-устройствами, увеличен объем памяти и число дополнительных модулей ввода/вывода. Подключение модулей ввода/вывода осуществляется непосредственно к корпусу контроллера или может быть удалено на расстояние до 1 м при помощи кабеля.

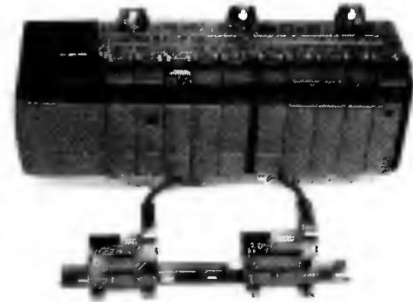


Рис. 2.65

Контроллер CompactLogix (рис. 2.63) — небольшой контроллер высокой производительности для семейства ввода/вывода Compact I/O. Имеет встроенный порт для сетей ControlNet, Ethernet/IP и DeviceNet. Для всех контроллеров CompactLogix, FlexLogix, ControlLogix и ProcessLogix используется единое программное обеспечение RSLogix 5000.

Контроллер FlexLogix (рис. 2.64) сочетает в себе преимущества механизма управления Logix с компактной системой ввода/вывода Flex I/O без уменьшения вычислительной мощности и возможностей программирования. FlexLogix предназначен как для использования в приложениях распределенного управления со всеми возможностями Netlinx коммуникаций, так и для автономных применений.

Контроллер ControlLogix (рис. 2.65) является контроллером универсального применения. Задняя шина ControlLogix функционирует как сверхскоростная сеть ControlNet. Допускается любая комбинация процессоров, модулей ввода/вывода и коммуникационных модулей. Контроллеры имеют возможности резервирования и сертифицированы на использование в приложениях, соответствующих SIL 2, SIL 3.

В табл. 2.22 приведены краткие технические характеристики контроллеров компании **Rockwell Automation**.

Таблица 2.22. Технические характеристики контроллеров компании *Rockwell Automation*

Тип контроллера	Память (макс.)	Число каналов ввода/ вывода	Тип модуля расширения	Сеть резервирования	Программное обеспечение	Языки программирования
PICO	0,5 кин-струкций	До 38 (релейные)	—	—	PICO Soft	LD
MicroLogix 1000	1 кслов	До 32	—	—	RSLogix 500	LD
MicroLogix 1200	4 кслов	До 128	—	—		—
MicroLogix 1500	14 кслов	До 256	Модули для DeviceNet	—		—
SLC 500	64 кслов	4096	1790, 1791, 1792, 1794, 1797, 1798, 1799	RIO/DH+	RSLogix 5	LD
PLC 500	100 кслов	3072		RIO/DH+ или ControlNet		LD, SFC, ST
Compact Logix	256 кбайт	До 30 модулей Compact I/O		—	RSLogix 5000	LD, FBD, SFC, ST
FlexLogix	512 кбайт	128 аналог. или 512 цифр.	1794, 1797	—		
Control Logix	7,5 Мбайт	3800 аналог. или 128000 цифр.	1790, 1791, 1792, 1794, 1797, 1798, 799	ControlNet		
Process Logix	7,5 Мбайт	64 модуля ввода/вывода	1756, 1794, 1797	ControlNet	Control Builder	FBD

Контроллеры имеют порты RS-232, DH485, DeviceNet, ControlNet и Ethernet TCP/ IP. Питание 24 VDC/240 **VAC**.

Распределенные системы ввода/вывода предназначены для увеличения каналов ввода/вывода, экономии кабельной продукции, повышения быстродействия и надежности сбора и обработки данных. Помимо основных функций сбора данных и управления эти системы имеют встроенную диагностику и обработку данных, а также допускают «горячую» замену модулей и др. Связь с базовым контроллером осуществляется с помощью сетевых коммуникаций Ethernet TCP/IP, ControlNet, DeviceNet, RIO.

Сеть Ethernet TCP/IP: скорость передачи 10/100 Мбит/с, поддерживается организациями *Industrial Ethernet Assotiation, IAONA, ODVA* и др.; сеть ControlNet — скорость передачи 5 Мбит/с; сеть DeviceNet — скорость передачи до 500 кбит/с; удаленный ввод/вывод (RIO) — скорости передачи 57,6 кбит/с, 115,2 и 230,4 кбит/с; Data Highway Plus (DH+) — связывает до 64 станций на скоростях 57,6 и 230,4 кбит/с; DH485 — связывает до 32 станций на скорости до 19,2 кбит/с.

В табл. 2.23 приведены основные технические характеристики распределенных систем ввода/вывода.

Таблица 2.23. Характеристики распределенных систем ввода/вывода компании *Rockwell Automation*

Тип системы ввода/вывода	Тип каналов ввода/вывода	Отличительные особенности	Коммуникации	Монтаж	Область применения
FLEX I/O (1793, 1794)	D I/O, A I/O, счетчик, реле, температурный	48 VDC	Remote I/O, ControlNet, DeviceNet и др.	DIN-рейка, панель	Общего назначения
POINT I/O (1734, 1734D)	D I/O, A I/O, счетчик, реле, датчик положения	Встроенная диагностика	DeviceNet		
1769 Compact I/O	D I/O, A I/O, реле, температурный	24 VDC			
1798 FLEX Armor I/O	24 VDC	IP65/ IP67			
1791 Block I/O	D I/O, A I/O	Шасси	Remote I/O	DIN-рейка, панель	Пульт оператора
1797 FLEX Ex I/O	D I/O, A I/O, частотный, температурный	Искро-безопасность	ControlNet	DIN-рейка	В агрессивных средах

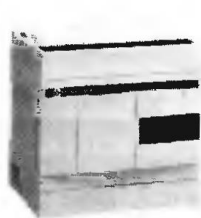
2.2.16 Контроллеры фирмы *Schneider Electric*, Франция

К моноблочным (компактным) контроллерам относятся контроллеры серии TWIDO (мод. TWDLCAA10DRF, TWDLCAA16DRF, TWDLCAA24DRF).

Моноблочный контроллер TWIDO (рис. 2.68, **а**) предназначен для создания простых автономных систем. Контроллер имеет встроенный блок питания датчиков напряжением 24 **VDC**, слот для карты памяти 32 кбайт, процессор и блок дискретного ввода/вывода.

К компактному контроллеру можно подключить до четырех модулей расширения аналогового и дискретного ввода/вывода. Время цикла составляет 1 мс для выполнения 1000 логических инструкций. На лицевую панель контроллера возможна установка 2-строчного по 8 символов дисплея (TWD XCP ODC). Напряжение питания контроллеров 100...240 VAC.

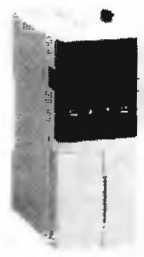
К модульным контроллерам относятся контроллеры TWIDO, TSX Micro, TSX Premium, TSX Quantum.



а



б



в



Рис. 2.67

Рис. 2.66

Модульные контроллеры TWIDO (рис. 2.66, **б**) в зависимости от числа входов/ выходов и производительности процессора имеют 5 модификаций. Напряжение питания модульных контроллеров TWIDO всех модификаций составляет 24 **VDC**. К контроллеру можно подключить от 4 до 7 модулей расширения, карты памяти и часов реального времени. Модульный контроллер помимо дискретных входов/выходов оснащен одним аналоговым входом напряжения (0...10 **VDC**), одним потенциометром (диапазон 0...1023), последовательным портом RS-485 (дополнительно порт RS-232/RS-485). Характеристики модульных контроллеров приведены в табл. 2.24.

Таблица 2.24. Характеристики модульных контроллеров TWIDO

Модель TWIDO	Число входов/ выходов	Число входов	Число выходов	Число модулей расширения	Дополнительный картридж
TWD LMDA20DTK	20	12	8 (OK)	4	2 слота: часы реального времени и память
TWD LMDA20DUK	20	12	8 (OK)	4	
TWD LMDA20DRT	20	12	2 (OK), 6 (RO)	7	
TWD LMDA40DTK	40	24	16 (OK)	7	
TWD LMDA40DUK	40	24	16 (OK)	7	

Программирование контроллеров TWIDO осуществляется при помощи программного обеспечения TwidoSoft на языках LD и IL с ОС Windows 98(SE)/2000. TwidoSoft обеспечивает функции редактирования, мониторинга, копирования и вставки, анимации в режиме РВ, диагностику работы ПЛК и др.

Программирование контроллера осуществляется с помощью инструментальной системы UnityPro на любом из пяти языков по стандарту IEC 1131-3.

Модульный контроллер Modicon M340 (рис. 2.67) имеет шасси на 4, 6, 8 или 12 платомест с функцией горячей замены модулей. Высокоплотные модули (до 64 каналов) имеют толщину 32 мм. Высота контроллера — 100 мм, глубина — 93 мм. M340 снабжен коммуникационными портами USB, Modbus, Ethernet или CanOpen. Библиотека функций контроллера включает следующие функции:

- 67) ПИ- и ПИД-регулирование;
- 68) автонастройка регуляторов;
- 69) 2-, 3-позиционный и каскадный регулятор;
- 70) генератор функций изменения алгоритма управления;
- 71) масштабирование и др.

Программирование ведется в среде Unity Pro на языке FBD. С ПК, подключенного к сети Ethernet, имеется возможность получения данных при помощи FTP

сервера. M340 имеет встроенный Web-сервер для системной диагностики и параметрирования контроллера. Технические характеристики контроллеров M340 приведены в табл. 2.25.

Таблица 2.25. Характеристики контроллеров M340

Характеристики	Тип процессора контроллера Modicon M340			
	BMX P34 1000	BMX P34 2010	BMX P34 2020	BMX P34 20300
Время выполнения двоичной инструкции, мкс	0,18	0,12	0,12	0,12
Объем RAM, кбайт	2048	4096	4096	4096
Объем памяти программ, К инструкций	35	70	70	70
Объем карты памяти SD, МБ	8	16	16	16
Встроенные порты: USB/CANOpen/Modbus Ethernet TCP/IP	1 / – / 1 –	1 / 1 / 1 –	1 / – / 1 1	1 / 1 / – 1

Модульный контроллер Modicon TSX 37 Micro (рис. 2.68) используется для создания АСУ ТП с числом каналов ввода/вывода порядка 200-300. Базовая конфигурация контроллера включает блок центрального процессора с памятью, мини-дисплей, коммуникационные порты и платы. Имеется 5 модификаций контроллера для различных уровней интеграции, а также более 40 различных модулей, как полноформатных (в размер слота), так и полуформатных (половина слота) на 8, 16, 32 и 64 точки. Время выполнения одной логической команды контроллера составляет 0,15 мкс. Максимальное число дискретных сигналов ввода/вывода одного контроллера — 248. Контроллер имеет удобную индикацию, встроенный коммуникационный порт RS-485, слот для карты памяти PCMCIA (до 64 кслов), а также слот для коммуникационной карты PCMCIA. Отдельные входы контроллера можно использовать в качестве входов прерывания выполняемой программы пользователя и в качестве входов быстрого счета на 500 Гц или 10 КГц.

Сетевые возможности контроллера определяются наличием встроенных коммуникационных портов или коммуникационных карт типа PCMCIA (ASCII, Modbus, Fip и др.). С помощью модуля ETZ 510 (модуль Ethernet с флэш-памятью 8 Мб) обеспечивается связь по сети Ethernet.

Модульный контроллер TSX Premium (рис. 2.69) относится к контроллерам среднего класса, расширяющим возможности TSX Micro.

Помимо базовой конфигурации контроллер включает до 64 специализированных модулей, среди которых 4 модуля Ethernet и 8 модулей связи ASi.

Контроллер TSX Premium обладает повышенной надежностью. Повышение надежности достигается дублированием интерфейсов ввода/вывода, безударным

переключением управления исполнительными механизмами, мощными диагностическими функциями (системная диагностика каждого модуля и канала ввода/вывода, диагностика приложений и системы визуализации при переходе с основного процессора на резервный). Подключение резервных модулей ввода/вывода осуществляется с помощью системы быстрого монтажа TeleFast. В контроллере реализована технология «теплого резервирования», позволяющая передать управление на резервный контроллер при отказе ведущего за несколько секунд (в отличие от «горячего резервирования», где передача функций управления происходит немедленно). Пакет программ UnityPro контроллера позволяет программирование на языках стандарта IEC 1131-3.

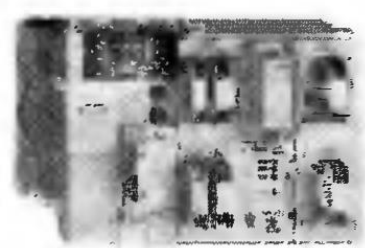


Рис. 2. 68



Рис. 2. 69

В табл. 2.26 приведены основные технические характеристики односетевых (TSX P57 104M/204M/254M) и многосетевых (TSX P57 304M/454M/554M) контроллеров.

Таблица 2.26. Технические характеристики контроллеров TSX Premium

Модель TSX P57	104M	204M	254M	304M	454M	554M
Число дискретных входов/выходов	512 (модули на 8, 16, 32, 64 канала)	1024 (модули на 8, 16, 32, 64 канала)			2040 (модули на 8, 16, 32, 64 канала)	
Число аналоговых входов/выходов	24 (модули на 4, 8, 16 каналов)	80 (модули на 4, 8, 16 каналов)		128 (модули на 4, 8, 16 каналов)	256 (модули на 4, 8, 16 каналов)	512 (модули на 4, 8, 16 каналов)
Сеть/число модулей сети	ASi / 2	ASi / 4; (Interbus или Profibus DP) / 1			ASi / 8; (Interbus, Profibus DP) / 2	
Объем памяти ОЗУ/ расширение, кбайт	96/256	160/768	192/768	192/1792	320/2048	640/4096
Время выполнения инструкции, мкс	0,27	0,19		0,12	0,06	0,04
Число каналов регулирования	—	10 (по 3 контура на канал)		15 (по 3 контура на канал)	20 (по 3 контура на канал)	30 (по 3 контура на канал)
Число сетей, тип и число шин	1 сеть, 1 ASi, 1 CANopen	1 сеть, 4 ASi, 1 CAN-open, 1 шина другого типа	1 сеть, 4 ASi, 1 CAN-open, 1 Fipio, 1 шина другого типа	3 сети, 8 ASi, 1 CAN-open, 2 шины другого типа	4 сети, 8 ASi, 1 CAN-open, 1 Fipio, 2 шины другого типа	5 сетей, 8 ASi, 1 CAN-open, 1 Fipio, 2 шины другого типа

Модульный контроллер Modicon TSX Quantum (рис. 2.70) является одним из самых мощных контроллеров, совместимых с младшими сериями контроллеров — Compact и Momentum. Имеется свыше 40 типов модулей ввода/вывода и модулей специального назначения, устанавливаемых на монтажных панелях серии Quantum. Модули ввода/вывода соответствуют стандартам МЭК на взрывобезопасность (Ex ia, Ex ib зоны 2 группы ПА-С). Модели контроллеров TSX Quantum определяются одним из четырех типов процессоров (табл. 2.27).

Старшая модель контроллера имеет ОЗУ 2 Мбайт и обеспечивает сканирование одной тысячи булевских команд за 0,1 мс. Модули ввода/вывода ПЛК Quantum используются в трех вариантах: локальный (местный) ввод/вывод, удаленный ввод/вывод и распределенный ввод/вывод. Любой модуль устанавливается в любой слот шасси. Выпускаются шасси на 2, 3, 4, 6, 10 и 16 слотов. При выборе максимальной конфигурации (блок питания, процессор и 14 модулей ввода/вывода) имеем ПЛК на 2048 каналов дискретного ввода/вывода. Максимальное число аналоговых каналов ввода/вывода на шасси локального ввода/вывода составляет 84 канала (56 входных и 28 выходных каналов).

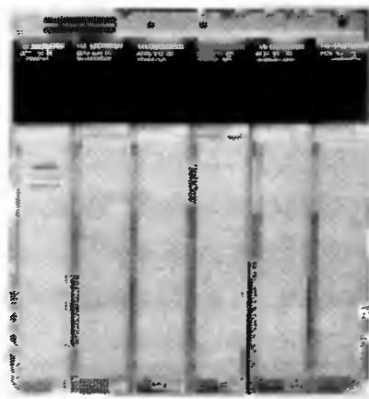


Рис. 2.70

Распределенный ввод/вывод поддерживает 3 сети: поддержка одной встроена в ЦПУ, поддержка двух других обеспечивается установкой специальных модулей сетевого интерфейса. Для обеспечения коммуникаций поставляются следующие модули: модули Modbus и Modbus +, Ethernet TCP/IP, SY/MAX, MMS Ethernet; модули удаленного ввода/вывода; модули горячего резерва; модули управления перемещением; модули Lonworks, Profibus DP; модули шины ASi-Bus.

Программирование контроллера осуществляется в режиме online с использованием инструментальных систем ConCept и UnityPro. Пакеты ConCept и UnityPro устанавливаются под управлением MS Windows и позволяет использовать все пять специализированных языков по стандарту IEC 1131-3. Отличительной чертой пакетов является наличие программы, моделирующей контроллер со всеми его модулями (симулятор аппаратных средств). Это дает возможность выполнять большую часть работы по отладке приложения в автономном режиме без подключения к контроллеру. Оба пакета имеют большой набор библиотек стандартных функциональных блоков. Кроме того, имеется возможность создания пользователем нестандартных функциональных блоков на языке Си. Более подробные данные по контроллерам фирмы **Schneider Electric** приведены в работе [2.9].

Таблица 2.27. Характеристики процессоров контроллера Modicon TSX Quantum

Характеристика	Процессор			
	140CPU 11302	140CPU 11303	140CPU 43412A	140CPU 53414A
Процессор / тактовая частота	186 / 20 МГц	186 / 20 МГц	486 DX / 80 МГц	586 / 133 МГц
Объем памяти Флэш / SRAM	256 кбайт / 256 кбайт	256 кбайт / 512 кбайт	1 Мбайт / 2 Мбайт	1 Мбайт / 4 Мбайт
Число регистров	9 999	9 999	57 К	57 К
Число бит	8 192	8 192	65 535	65 535
Макс. размер программы	109 кбайт	368 кбайт	896 кбайт	2,5 Мбайт
Порт Modbus +	+	+	+	+
Порт Modbus	1	1	2	2
Кол-во дополнитель- ных сетевых модулей	2	2	6	6

2.2.17 Контроллеры компании *Siemens*, Германия

К контроллерам компании **Siemens** относятся моноблочные контроллеры Simatic S7-200, Simatic S7-300C и Simatic S7-620, модульные контроллеры Simatic S7-300/300F, SIPLUS S7-300, Simatic S7-400 (Simatic S7 400H/400F/400FH), PC-based контроллер Simatic WinAC (ПК).

Контроллер Simatic S7-200 (рис. 2.71) предназначены для решения задач управления и регулирования в небольших системах автоматизации. При этом Simatic S7-200 позволяют создавать как автономные системы управления, так и системы управления, работающие в промышленных сетях. Область применения контроллеров Simatic S7-200 простирается от простейших задач автоматизации (управление лифтами, подъемниками и пр.) до управления станками и конвейерными линиями. Программирование контроллеров осуществляется с помощью пакета STEP7 Micro/ Win V3.2 для ОС Windows 95/98/NT/2000. Пакет включает языки программирования по стандарту IEC 61131-3 и языки высокого уровня C, C++.



Рис. 2.71



Рис. 2.72

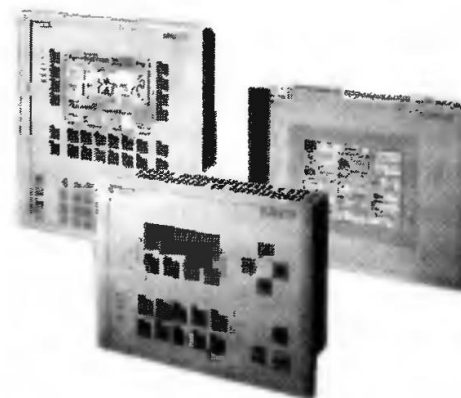


Рис. 2.73

Моноблочный контроллер Simatic S7-300C объединяет в одном корпусе центральный процессор и встроенные аналоговые и дискретные входы/выходы для

подключения датчиков и исполнительных механизмов. Контроллер имеет увеличенный объем памяти и более высокую скорость выполнения команд. В контроллерах S7- 300C использована новая концепция загрузки и сохранения данных с использованием новых микрокарт памяти, встроенный интерфейс Profibus-DP или PP1 (Point-to- Point Interface). Встроенные функции контроллера поддерживают работу скоростных счетчиков, импульсных выходов, ПИД-регуляторов, измерителей частоты.

Модульный контроллер S7-300 (рис. 2.72) представляет собой универсальный программируемый контроллер для построения систем автоматизации низкой и средней производительности. Имеет широкий спектр модулей для максимальной адаптации к требованиям любой задачи. Высокая плотность монтажа модулей ввода/вывода и возможность расширения системы до 32 модулей позволяют строить системы управления с большим числом каналов ввода/вывода. Программное обеспечение контроллеров реализуется с помощью пакета STEP7/ STEP7-Lite (IEC 1131-3) с языками программирования STL, LD и FBD.

Модульный контроллер Simatic S7-300F представляет собой программируемый контроллер для построения систем автоматики безопасности и противоаварийной защиты и базируется на функциональных возможностях программируемого контроллера Simatic S7-300. Контроллер используется в системах распределенного ввода/вывода на основе Profibus DP со станциями ET 200M с F-модулями, ET 200S PROFIsafe, ET 200pro PROFIsafe и ET 200eco PROFIsafe с использованием для обмена данными профиля PROFIsafe.

Контроллер SIPLUS S7-300 представляет собой универсальный контроллер для эксплуатации в тяжелых промышленных условиях, базирующийся на функциональных возможностях контроллеров Simatic S7-300. Имеет расширенный диапазон рабочих температур (-25 ... +60 °C), более высокую стойкость к вибрации (ионным и ударным нагрузкам, работает в средах, содержащих агрессивные примеси и газы).

Контроллер Simatic C7-620 (рис. 2.73) представляет собой устройство, сочетающее в одном корпусе программируемый контроллер и панель визуализации и управления с ЖК-дисплеем. Блоки управления Simatic C7 полностью совместимы с программируемыми контроллерами Simatic S7-300. Помимо панели управления в состав контроллера входят модули аналогового и дискретного ввода/вывода. Возможно расширение числа входов/выходов с помощью модулей контроллера Simatic S7-300. Число дополнительных модулей — 24, по 8 модулей на трех носителях.

Встроенный контроллер имеет высокое быстродействие (время выполнения логической команды не превышает 0,1...0,3 мкс), что существенно расширяет допустимые области применения систем автоматизации на базе контроллеров Simatic C7. Контроллер поддерживает математические операции с плавающей запятой и функции связи с устройствами человеко-машинного интерфейса. Это исключает необходимость программирования функций обмена данными между панелью оператора и контроллером. Панель оператора и контроллер используют единую базу данных проекта STEP 7. Контроллер Simatic C7-620 обменивается данными с контроллерами S7-300, S7-400 и др. устройствами по интерфейсу MPI (Multipoint Interface), а также по сети Profibus DP. Поддерживаются также диагностические функции и парольная защита контроллера.

Встроенная панель оператора осуществляет управление выводом и обработкой сообщений об ошибках и текущих значениях параметров и вывод изображений (в Simatic C7 с графической панелью оператора), а также текстовых сообщений.

Имеется 6 модификаций контроллера C7-620. Программирование осуществляется с помощью программных пакетов S7-SCL, S7-Graph, S7-HiGraph, а также программного обеспечения RunTime. Программирование панелей оператора осуществляется с помощью пакетов ProTool и ProTool/Pro, работающих под ОС Windows NT/2000. Для конфигурирования системы автоматизации и встроенного контроллера применяется STEP 7 или STEP 7 Lite.

Модульный контроллер Simatic S7-400 (рис. 2.74) предназначен для построения систем автоматизации средней и высокой степени сложности. Контроллер отличается высоким быстродействием, возможностью применения структур локального и распределенного ввода/вывода, широкими коммуникационными возможностями, функциональностью, удобством эксплуатации и обслуживания. Эффективному применению контроллеров способствует возможность использования нескольких типов центральных процессоров различной производительности, наличие широкой гаммы модулей ввода/вывода дискретных и аналоговых сигналов, функциональных модулей и коммуникационных процессоров. Simatic S7-400 отвечает самым жестким требованиям промышленных стандартов, обладает высокой степенью электромагнитной совместимости, высокой стойкостью к ударным и вибрационным нагрузкам. Установка и замена модулей контроллера может производиться без отключения питания («горячая замена»). Контроллер может комплектоваться широким спектром модулей, устанавливаемых в монтажных стойках в лю-

бом порядке. Процессорные модули оснащены встроенными интерфейсами Profibus-DP. При необходимости, в базовом блоке контроллера может быть использовано до 4 центральных процессоров. К числу модулей относятся модули ввода/вывода дискретных и аналоговых сигналов, коммуникационные модули для организации последовательной передачи данных по РР-интерфейсу, функциональные модули для решения специальных задач управления (счет, позиционирование, автоматическое регулирование и т. д.), интерфейсные модули для связи базового блока контроллера со стойками расширения. К одному базовому блоку контроллера Simatic S7-400 может подключаться до 21 стойки расширения. Модули устанавливаются в свободные разъемы монтажных стоек в произвольном порядке и фиксируются в

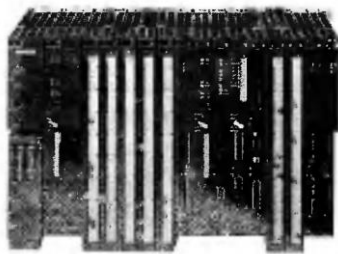


Рис. 2.74

рабочих положениях винтами. Фиксированные места занимают только блоки питания, первый центральный процессор и некоторые интерфейсные модули.

В качестве программного обеспечения контроллеров используется программный пакет STEP7. Основными областями применения Simatic S7-400 являются технологические установки, машиностроение, химическая промышленность и др.

Контроллер **Simatic S7-400H** применяется в областях, предъявляющих повышенные требования к надежности функционирования системы управления. Контроллер имеет резервированную структуру — резервирование основных функций и конфигураций систем ввода/вывода, резервирование сетей Profibus DP контроллера, горячее резервирование модулей и автоматическое безударное переключение на резервный блок в случае отказа ведущего блока. Для гарантированного безударного включения резерва между базовыми блоками контроллера необходима надежная скоростная связь. Эта связь поддерживается по оптоволоконным кабелям, соединяющим два центральных процессора. В этих целях оба базовых блока контроллера выполняют одну и ту же программу, работают с одними и теми же блоками данных, с одними и теми же внутренними данными (битами памяти, таймерами, счетчиками и т. д.). При отсутствии ошибок и отказов оба базовых блока

находятся в активном состоянии. Сигнал от каждого датчика (или двух резервированных датчиков) поступает на входы резервированной пары модулей ввода, считывается в оба базовых блока и проверяется на идентичность, после чего используется программой. Каждое формируемое программой управляющее воздействие выводится на исполнительное устройство через выходы двух модулей вывода. При отказе одного из двух резервированных модулей программа контроллера выполняет его идентификацию и прекращает обращение к этому модулю, продолжая работать с исправным модулем. После ремонта или замены неисправного модуля и его установки в систему программа возобновляет обращение к обоим модулям.

Безударное переключение может быть обеспечено только при синхронной работе двух базовых блоков контроллера. Функции синхронизации выполняются автоматически операционной системой контроллера и не требуют программирования со стороны пользователя. Этим обеспечивается возможность быстрого перевода функций управления на любой базовый блок контроллера в любой момент времени. Контроллер Simatic S7-400H способен поддерживать обмен данными с другими контроллерами S7-400H, стандартными системами автоматизации S7-400 и компьютерами. Для организации обмена данными с компьютерами через резервированные каналы связи дополнительно необходим пакет программ S7-REDCONNECT. В зависимости от круга решаемых задач для организации обмена данными могут использоваться различные сетевые конфигурации: резервированная или не резервированная магистральная структура и кольцевая топология с одиночным или дублированным кольцом. Программирование контроллеров S7-400H не отличается от программирования стандартных моделей S7-400. Для этого могут быть использованы все функции пакета STEP 7 от V5.0 или выше. Конфигурирование резервированных систем ввода/вывода контроллера S7-400H выполняется с помощью опционального пакета S7H, интегрируемого в STEP 7.

Контроллер S7-400F/FH предназначен для построения систем противоаварийной защиты (ПАЗ). Базируется на использовании компонентов S7-400H и станций распределенного ввода/вывода ET 200M с модулями систем безопасного управления (F-модулями), станций ET 200S PROFISafe и ET 200eco PROFISafe. Контроллер обеспечивает одновременную поддержку функций противоаварийной автоматики и функций стандартного управления.

PC-based контроллер Simatic WinAC (промышленный компьютер) поддерживает связь с процессом через систему распределенного ввода/вывода на основе Profibus-DP. С этой целью WinAC Slot PLC оснащен встроенным интерфейсом Profibus-

DP. Системы WinAC Software PLC подключаются к сети Profibus через коммуникационные процессоры. Для решения технологических задач Simatic WinAC использует программное обеспечение RunTime спектра Simatic, включающее программное обеспечение (например, Standard PID Control, Easy Motion Control и т. д.) с библиотеками и стандартными функциональными блоками, интегрируемыми в программы Simatic WinAC. К этим модулям относятся функциональные и технологические модули, устанавливаемые в станции распределенного ввода/вывода Simatic ET 200 и подключаемые к Simatic WinAC через сеть Profibus-DP. Simatic WinAC, пакет программирования STEP 7 и программное обеспечение визуализации могут устанавливаться на одном компьютере или связываться между собой через сети MPI, Profibus DP или Ethernet.

В соответствии с концепцией Totally Integrated Automation для подавляющего большинства приборов оперативного управления и мониторинга семейства Simatic HMI, а также систем Simatic ProTool/Pro и Simatic WinCC обеспечивается полный доступ к данным и функциям Simatic WinAC. Для организации обмена данными с системами визуализации других производителей Simatic WinAC снабжен OPC-сервером. Интегрированный в Simatic WinAC OPC сервер с Data Access Interface 2.0 (интерфейс доступа к данным) обеспечивает открытый доступ к данным WinAC со стороны приложений, выполняющих функции OPC клиентов. Программирование и конфигурирование систем автоматизации WinAC выполняется с помощью STEP 7, а также инструментальных средств проектирования Simatic. Это позволяет использовать для программирования Simatic WinAC все языки программирования, отвечающие требованиям международного стандарта IEC 61131-3. Simatic WinAC работает на стандартном PC под управлением Windows 2000 или Windows XP Professional, программно совместим с Simatic S7 и оптимизирован для задач сбора и обработки данных, визуализации и управления.

2.2.18 Контроллеры SMART2 компании *PEP Modular Computers GmbH*, Германия

Контроллер SMART2 (рис. 2.75) продолжает развитие концепции SMART I/O и базируется на технологии открытой шины VME. Может использоваться в жестких условиях промышленного производства. Контроллер используется для создания небольших систем примерно до 100 каналов вво

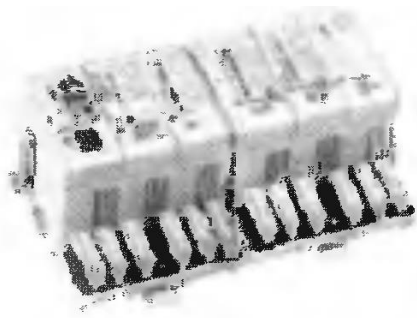


Рис. 2.75

да/вывода. Однако интерфейс локальной сети Profibus позволяет создавать распределенные системы, объединяющие контроллеры различной мощности других производителей, интеллектуальные датчики и исполнительные устройства с интерфейсом Profibus. Все блоки и модули контроллера устанавливаются на стандартном DIN-рельсе.

Предшествующая модель — контроллер SMART I/O, программно совместим с системами VME9000 и IUC9000. В качестве операционной системы используется многозадачная многопользовательская ОС реального времени OS-9. В качестве средств программирования используются ассемблер, компилятор Ultra-C (стандарт ANSI-C, C++), интегрированная среда FasTrak для Windows, а также система ISaGRAF.

Контроллер SMART I/O состоит из базового блока SMART-BASE с тремя разъемами для сменных модулей ввода/вывода SM-xxx и дополнительных блоков SMART-EXT, каждый из которых имеет по 2 разъема для сменных модулей ввода/вывода. К одному модулю SMART-BASE можно подключать до 4 блоков SMART-EXT. Широкая номенклатура модулей

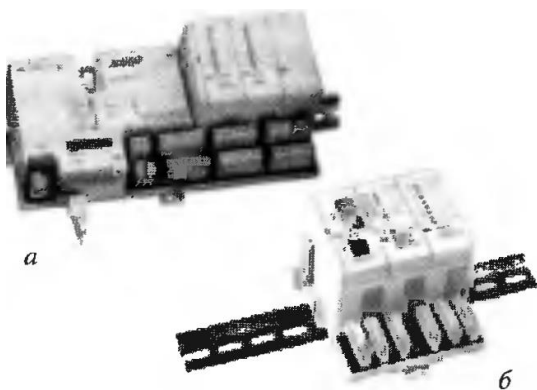


Рис. 2.76

ввода/вывода позволяет оптимизировать конфигурацию распределенных систем управления под конкретную задачу.

Контроллер SMART2 отличается от контроллера SMART I/O тем, что наряду с модульной конструкцией он комплектуется из блоков, которые монтируются на DIN-

рельсе. В каждом из блоков может располагаться до трех функциональных модулей. Максимально возможное число блоков — 5; следовательно, максимальное количество модулей в контроллере — 15. Несколько контроллеров SMART2 могут быть связаны между собой и с другими контроллерами с помощью промышленных сетей Profibus, Modbus или CAN.

Процессорный блок SM2-CPU (рис. 2.76, **а**) базируется на микропроцессоре MC68LC302 20 МГц (DRAM 512 кбайт/1 Мбайт, SRAM 25 кбайт, Флэш 1 Мбайт/2 Мбайт). Интерфейсы контроллера — RS-232, RS-485, Profibus DP (модуль SM2-DP), CAN (модуль SM2-CAN) или Ethernet (модуль SM2-ETH).

Типы и характеристики модулей дискретного ввода/вывода: SM-DW1 (8DI, 24 **VDC**); SM-DOUT1 (8DO, 24 **VDC**); SM-DIO (8DI/2DO); SM-ACI1 (8DI, 80...240 **VAC**); SM-ACOI (6DO, 80...240 **VAC**); SM-REL1 (6RO, 250 VDC, 220 **VAC**).

Типы и характеристики модулей аналогового ввода/вывода: SM-ADC1 (6AI, 0...5 мА, 0...20мА, 0...10 VDC, ± 5 мА, ± 10 **VDC**); SM-ADC12 (6/12 AI, 0...5 мА, 0...20мА, ± 5 мА); SM-ADC32 (16/32 AI); SM-DACI(2/6 AO, 0...10 VDC, ± 10 **VDC**, 0...20 мА); SM-DAD1 (4AI/2AO, ± 10 VDC, 0...10 **VDC**); SM-TERM (4 канала для термодатчиков); SM-PT100 (4 канала для термометров сопротивления).

Типы и характеристики интерфейсных модулей: SM-RS-232 (интерфейс RS-232); SM-RS422I (интерфейс RS-422); SM-RS-485I (интерфейс RS-485). Помимо этих модулей в составе SCADA2 применяются модули счетчиков, модули питания, кроссмодули многоканальные, блоки мультиплексора и др. На рис. 2.76, **б** представлен общий вид модуля АЦП типа SM-ADC1.

В качестве операционной системы используется ОС РВ типа OS-9, которая обеспечивает 32-разрядный режим адресации, осуществляет динамическое распределение памяти, использует средства межзадачного взаимодействия (семафоры, сигналы, события, алармы, программные каналы и др.). Контроллер поддерживает сетевые протоколы:

- Modbus, организующий обмен данными по принципу Master-Slave (1 Master и до 247 Slave). Поддержка протокола реализована через интерфейс RS-232.
- Profibus DP — стандартный протокол, работающий по принципу маркерной асинхронной шины. По протоколу Profibus DP допускается максимальное число узлов сети — 122, из которых 32 могут быть в роли Master. Скорость передачи данных от 9,6 до 12 Мбод. Поддержка протокола реализована через интерфейс RS-485.

- CANbus — стандартный протокол, основанный на принципах децентрализованного контроля за доступом CSMA/CM. В контроллере SMART2 поддерживается протокол CANopen Master/Slave, скорость передачи — до 1 Мбод.

Средства разработки прикладного программного обеспечения:

- Среда OS-9. Среда разработки приложений включает компилятор UltraC/C++, отладчик системного уровня и уровня исходного текста, текстовый редактор, поддержку промышленных сетей.
- FasTrak для Windows — полная кросс-среда (пакет для Windows) разработки и отладки прикладного ПО для OS-9. Включает кросс-компилятор UltraC/C++, кросс-Ассемблер, графический отладчик исходного текста, редактор исходного текста, некоторые утилиты и пр.

ISaGRAF — инструментальный пакет для описания логики работы контроллера на основе языков программирования по стандарту IEC 61131-3. Пользователь также может программировать дополнительные функции на языке C.

2.2.19 Контроллеры компании *TURCK*, Германия

Контроллер **Comat BoxX** (рис. 2.77) имеет максимальное число входов до 3600, выходов — до 2040. Память программ — 64 кбайт, число функциональных блоков — 127. Различные типы контроллеров имеют встроенные дискретные каналы — до 12, аналоговые — до 12, выходные дискретные — до 8, аналоговые — до 4.

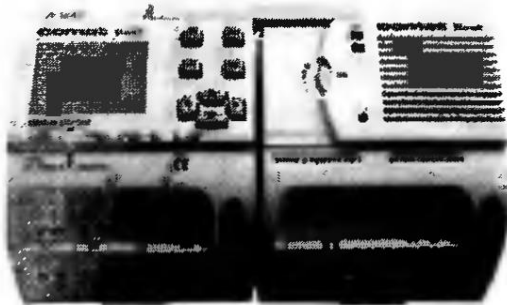


Рис. 2.77

Контроллер с питанием 24 **VDC** может обрабатывать аналоговые сигналы 0...10 **VDC** с разрешением 0,1 V. При этом входы контроллера можно конфигурировать как аналоговые или дискретные. Контроллер снабжен ЖК-дисплеем, речевым модулем на 16 минут, интерфейсами RS-232 и Ethernet. Питание контроллера — 24 **VDC** или 110...230 **VAC**.

Программирование и конфигурирование контроллера осуществляется с помощью ПК или съемного ЖК-дисплея с клавиатурой. Программирование контроллера производится с помощью пакета QUICK II на базе ОС Windows. С помощью симулятора программа может быть проверена перед запуском.

Контроллер AF-10MR-A имеет 6 DI, 4 RO; модель AF-20MR-A имеет 12 DI, 8 RO; AF-10MR-D — 6 конфигурируемых дискретных/аналоговых входа 0... 10 **VDC** и 4 RO; AF-20MR-D — 12 конфигурируемых дискретных/аналоговых входа 0...10 **VDC** и 8 RO; AF-10MT-GD — 4 PNP выхода 24 **VDC**; AF-20MT-GD — 8 PNP выхода 24 **VDC**.

С помощью модуля расширения AF-MUL можно управлять контроллером по телефонному кабелю (после ввода пароля). После набора телефонного номера предварительно записанный текст будет воспроизведен через встроенный или внешний динамик.

К другим модулям контроллера относятся модуль интерфейса RS-232 — AF-M232, модуль интерфейса RS-485 — AF-C485, конвертор RS-232/RS-485 — AF-P485.

Визуализация и опрос состояния параметров процесса управления осуществляется с помощью SCADA 2.2. Допускается работа в сети до 256 контроллеров Comat BoxX.

Контроллеры имеют полнофункциональную панель индикации и управления. Панель управления контроллера M90/M91 содержит одно- или двустрочный ЖК-дисплей на 16 символов с подсветкой, 15 клавиш. Клавиатура обеспечивает настройку системы и изменение значений внутренних переменных. В зависимости от типа модели контроллер имеет встроенные дискретные и аналоговые входы/выходы, коммуникационные порты RS-232 и (или) CANbus, а также порт расширения, позволяющий подключать до 8 модулей (из 18 типов) на 64 входа/выхода (максимально), включая сигналы от термометров сопротивления, термопар и пр. Характеристики модулей расширения представлены в табл. 2.28. Модули расширения подключаются к контроллерам с помощью адаптера EX-A1. К числу новых модулей расширения относятся также модули измерения веса/деформации типа IO-LC1, IO-LC3.

Функция промышленной шины позволяет соединение до 63 контроллеров M90/ M91 в локальную децентрализованную сеть CANbus, работающую в режиме multimaster. Сеть управляется PC через интерфейс RS-232. Также возможно подключение удаленных модулей M90/M91 с помощью пакета GSM Control через сеть мобильной связи GSM. После подключения контроллера к GSM-модему возможна

передача SMS-сообщений. GSM-Control работает шлюзом между средой GSM с одной стороны (отсылая и получая SMS-сообщения) и средой MS Windows (используя интерфейсы DDE, OPC или SQE-запросы при работе с БД).

В качестве программного обеспечения для программирования контроллера и создания HMI используется пакет U90 Ladder, состоящий из редактора многозвенных схем, редактора HMI и редактора переменных. Загрузка создаваемой программы производится с PC, а обмен данными — через DDE-сервер. ПО работает под Windows 95/98/NT4.0 на языке LD. ПО позволяет создать до 80 дисплеев. Кроме того, при **подключении** контроллера (DDE-сервера) к компьютеру через DDE-порт с использованием протокола DDE осуществляется связь со SCADA-системой InTouch, являющейся DDE-клиентом.

Для всех моделей дискретные входы — транзисторные (рпр), 24 В. пост, тока, а дискретные выходы — релейные (для моделей Т1 и ТА2- транзисторные, рпр). Аналоговые входы включают сигналы 0-5 В, 0-10 В, 0-20 мА и 4-20 мА (для моде-



Рис. 2.78



Рис. 2.79



Рис. 2.80



Рис. 2.81



Рис. 2.82



Рис. 2.83

лей R2 0-5В и 0-10В, для модели ТА2 0-10В). Время выполнения логической операции — 12 мкс.

Таблица 2.28. Характеристики модулей расширения контроллера M90

Тип модуля	IO-D18-TO8	IO-R08	IO-D18-R04	IO-RO16	IO-D116	IO-TO16	IO-A14-A02	IO-A06X	IO-PT4	IO-ATC8	EX90-D18-R08
Число дискретн. входов	8	—	8	—	16	—	—	—	—	—	8
Число дискретн. выходов	8 (рпр)	8 (реле)	4 (реле)	16 (реле)	—	16 (рпр)	—	—	—	—	8 (релейн.)
Число аналогов. входов	—	—	—	—	—	—	4	—	4 PT100	8 (0...10 В, 4...20 мА)	—
Число аналогов. выходов	—	—	—	—	—	—	2 (+/- 10 В)	6 (0...10 В)	—	—	—

Контроллеры серии Vision V120 и V230/260/280 снабжены графическим дисплеем, позволяющим выводить 8 строк по 20 символов или графику размером 128x64 пиксел (V230) и 320x240 пиксел (V280), не требуя затрат на PLC-HMI коммуникации. На панели контроллера располагаются 24 клавиши для программирования и управления. Контроллер имеет встроенные: до 16 дискретных входов (рпр, 24 VDC), 4 дискретных выхода транзисторных (рпр/рпр, 24 **VDC**), 10 релейных и 3 аналоговых входа (0-10 **VDC**, 0-20 мА).

Характеристики контроллера: память программ — 16 кслов, время выполнения одной логической команды — 0,8 мкс, число таймеров — 128, число портов RS-232 — 2, CANbus — 1, поддержка протокола Modbus, master/slave, возможность подключения к сети GSM и формирования SMS-сообщений, защита передней панели по IP65, габариты 184x155x60,5 мм. В табл. 2.29 приведены технические характеристики моделей контроллера Visio 230.

Таблица 2.29. Технические характеристики контроллера Visio 230

Тип модуля	V120-12-R1	V120-12-R2C	V120-12-UN2
Число дискретных входов	10 рпр/рпр, 12/24 VDC	10 рпр/рпр, 12/24 VDC	12 рпр/рпр, 12/24 VDC
Высокоскоростные счетчики	3 (10 кГц максимум)	3 (10 кГц максимум)	2 (10 кГц максимум)
Число дискретных выходов	6 релейных выходов	6 релейных выходов	12 транзисторных выходов, 12/24 VDC
Число аналоговых входов	1 (0–10 В, 0–20 мА, 4–20 мА)	2 (0–10 В, 0–20 мА, 4–20 мА)	2 (0–10 В, 0–20 мА, 4–20 мА)
Число входов термодатчиков/термометров PT100	—	—	2
Число высокоскоростных выходов (HSO)	—	—	2 (2 кГц максимум)
Число входов/выходов расширения	До 128		

Число модулей расширения — 8. Всего в сегменте может быть до 63 модулей Vision 230 и Unitronics M90/M91.

Контроллеры V120, V230, V260 и V280 с модулями расширения позволяют получить до 160 входов/выходов, обеспечивают поддержку Modbus, CANbus, Ethernet, SMS/GSM data/GPRS. Единое программное обеспечение (Windows-based program) VisioLogic Ladder Software используется для программирования контроллеров и создания операторского интерфейса

Новый контроллер Jazz Micro-OPLC имеет встроенные цифровые и аналоговые входы, релейные и транзисторные выходы (в зависимости от модели), двухстрочный 16-символьный ЖК-дисплей, возможность отправки/получения SMS-сообщений (программа GSM-Control), поддерживает протоколы Modbus RTU или

OPC-сервер для обмена данными со SCADA-системами, а также имеет возможность считывать/ записывать данные из/в ПЛК используя Excel, Access или др. Windows-приложения. Контроллер Jazz Micro-OPLC имеет 16-ти клавишную настраиваемую клавиатуру и по своим функциональным возможностям превосходит известные интеллектуальные реле. Программное обеспечение контроллера — пакет JZ-PRG. В табл. 2.30 приведены технические характеристики контроллера Jazz Micro-OPLC.

Таблица 2.30. Технические характеристики контроллера Jazz Micro-OPLC.

Тип контроллера	JZ10-11-R10	JZ10-11-T10	JZ10-11-R16	JZ10-11-T17
Число дискретных входов	6 pnp/npn	6 pnp/npn	8 pnp/npn	8 pnp/npn
Число дискретных выходов	4 релейных	4 pnp	6 релейных	7 pnp
Число аналоговых входов	нет	нет	2х(0...10В) и 2х(4...20 мА)	2х(0...10В) и 2х(4...20 мА)
Память программ	24 К			
Коммуникации	RS-232, Modbus RTU master-slave, GSM-порт			
Питание	24 VDC			
Степень защиты	IP65			

2.2.21 Контроллеры фирмы **VIPA**, Германия

Серия контроллеров **VIPA**, полностью совместимых с контроллерами Simatic S7-300, включает семейство контроллеров малого класса (до 160 входов/выходов) типа VIPA System 100V, контроллеры VIPA System 200V для систем с числом входов/ выходов до 1024, семейство контроллеров System 300V и 300S, обладающих высокой надежностью, быстродействием и функциональностью. Расширение систем достигается с помощью широкой номенклатуры модулей ввода/вывода. PC-совместимой встраиваемой системой высокого быстродействия является VIPA System 500S. Программирование контроллеров VIPA осуществляется с помощью пакета STEP7 фирмы **Siemens** или собственного ПО WinPLC7. Модули VIPA используются в качестве ведомых (для младшего класса ПЛК) или ведущих в сети Profibus DP.

Компактный контроллер VIPA System 100V (рис. 2.84) применяется для управления малыми системами с числом дискретных входов/выходов до 160 или аналоговых входов/выходов — до 24.

Объем памяти 32 кбайт, объем расширяемой памяти модулями MMC до 64 Мбайт. Время обработки слова — 1,2 мкс. Контроллер полностью совместим

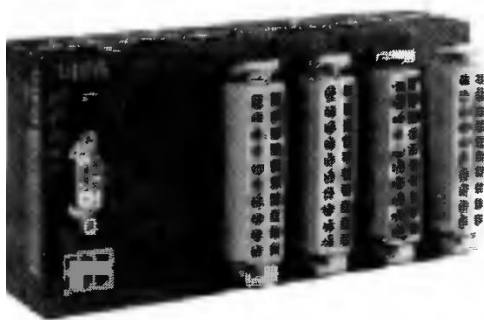


Рис. 2.84

по системе команд с ПЛК Simatic S7-300. Модули аналогового и дискретного ввода/вывода с питанием 24VDC, устанавливаются, как и процессорный модуль, на DIN-рейку. Скорость передачи данных по сети Profibus DP составляет от 9,6 кбод до 12 Мбод. Характеристики модулей CPU и ввода/вывода приведены в табл. 2.31.

Таблица 2.31. Характеристики модулей CPU и ввода/вывода

Модель	Тип CPU	Число входов/выходов	Тип модуля ввода/вывода	Число входов/выходов
VIPA 114-6BJ00	CPU 114	DI 16 (20), DO 8 (4)	—	—
VIPA 114-6BJ10		То же + часы реального времени	—	—
VIPA 114-6BJ50		DI 16, DO 8 (релейные)	—	—
VIPA 114-6BJ60		То же + часы реального времени	—	—
VIPA 115-6BL00	CPU 115	DI 16 (20), DO 16 (24)	—	—
VIPA 115-6BL10		То же + 2 последовательных порта	—	—
VIPA 115-6BL20		DP—Slave интерфейс	—	—
VIPA 121-4BH00	—	—	SM 121	DI × 16
VIPA 121-6BL00	—	—	SM 121	DI × 32
VIPA 122-4BH00	—	—	SM 122	DO × 16
VIPA 122-6BL00	—	—	SM 122	DO × 32
VIPA 123-6BL00	—	—	SM 123	DI × 16, DO × 16
VIPA 136-4BD70	—	—	SM 136	AI × 4, AO × 2, DIO × 8
VIPA 136-4BD60	—	—	SM 136	AI × 4, DIO × 8

Контроллеры VIPA System 200 (рис. 2.85) имеют до 1024 дискретных и до 128 аналоговых входов/выходов. Объем памяти от 16 до 512 кбайт, расширяемой памяти на карте MMC — до 64 Мбайт. Время обработки слова — 0,78 мкс. Помимо традиционных модулей расширения в состав контроллера входит PC-совместимый процессорный модуль CPU 288, представляющий компактный IBM PC-совместимый контроллер. Несомненный интерес представляют процессорные модули CPU 21xNET со встроенным интерфейсом IndustrialEthernet с поддержкой протокола TCP/IP.

Отличительной особенностью линейки System 200V является отсутствие кроссплаты. Системная шина реализована в виде наборного соединителя, устанавли-

ливаемого в углубление DIN-рейки. На одной системной шине допускается установка до 32 модулей. Процессорные модули контроллера оснащены интерфейсом MP2I, который объединяет два интерфейса — RS-232 и MPI (MPI — многоточечный интерфейс на базе стандарта EIA RS-485; для подключения ПК к контроллеру с помощью MPI требуется специальный адаптер). Модули контроллера объединяются по сети Profibus DP и CANopen в качестве ведущих и ведомых, по сети DeviceNet и Interbus



Рис. 2.85



Рис. 2.86

в качестве ведомых. В табл. 2.32 приведены характеристики некоторых модулей расширения System 200.

Таблица 2.32. Характеристики модулей расширения контроллера VIPA System 200V

Модель	Тип CPU	Объем памяти, Кб	Тип модуля ввода/вывода	Число входов/выходов
VIPA 211-1BA01	CPU-211, -212, -213	16, -128, -512	—	—
VIPA 214-1BA01	CPU-214, -215, -216	16, -128, -512	—	—
VIPA 241-1BA01	CPU-241, -242, -243	16, -128, -512	—	—
VIPA 2xx-2BP01	CPU DP	Встроенный Profibus DP	—	—
VIPA 2xx-2BT01	CPU NET	Встроен TCP/IP	—	—
VIPA 2xx-2BS01	CPU SER	2×RS-485	—	—
—	—	—	SM 221	DI × 8/16/32
—	—	—	SM 222	DO × 8/16/32
—	—	—	SM 231	AI × 4
—	—	—	SM 232	AO × 4
—	—	—	SM 234	AI × 2, AO × 2
—	—	—	CP 240	RS-232/RS-485
—	—	—	IM 253	Profibus/CANopen, Interbus

Контроллеры VIPA System 300V (рис. 2.86) имеют до 1024 дискретных и до 256 аналоговых входов/выходов. Объем памяти контроллеров составляет от 32 до 512 кбайт, расширяемая с картой MMC до 64 Мбайт. Время обработки бита составляет 0,18 мкс.

Контроллеры полностью совместимы аппаратно и по системе команд с контроллерами Simatic S7-300. Модули расширения System 300 взаимозаменяемы с однотипными модулями **Siemens**. Характеристики модулей CPU и модулей ввода/вывода приведены в табл. 2.33.

Таблица 2.33. Характеристики модулей CPU и модулей ввода/вывода VIPA System 300V

Модель	Тип CPU	Объем памяти, Кб	Тип модуля ввода/вывода	Число входов/выходов
VIPA 314- 1SL	CPU-314, -315, -316, -317	32, -32, -256, -512	—	—
VIPA 314- 2DP00	CPU-314DP	Master/Slave	—	—
VIPA 314- 3SL00	CPU-314 Net	Master/Slave TCP/IP	—	—
VIPA 314- 4SL00	CPU-314 Web	Master/Slave TCP/IP Webmaster	—	—
—	—	—	SM 321	DI × 16/32
—	—	—	SM 322	DO × 16/32
—	—	—	SM 331	AI × 2/8
—	—	—	SM 332	AO × 2/4
—	—	—	CP 340	R232/RS-485
—	—	—	IM 353	Profibus/CANopen, Interbus, DeviceNet

Контроллер System 300S, выполненный по технологии SPEED7, имеет высокое быстродействие, объем рабочей памяти может быть расширен до 8 Мбайт с помощью конфигурационной карты MemoryConfiguratorCard (MCC). Процессорные модули System 300S снабжены портом Ethernet для организации обмена данными по сети Ethernet. Для установки высокоскоростных модулей и коммуникационных процессоров предназначена шина расширения SpeedBus. К процессорному модулю возможно подключение до 32 модулей расширения. Среди встроенных интерфейсов — MPI, Profibus DP, Ethernet.

Контроллер VIPA System 500S (рис. 2.87) представляет собой Slot-PLC — карту в формате PC1, устанавливаемую в корпус IBM PC-совместимого компьютера и оснащенную интерфейсом Profibus-DP. Обмен данными между CPU и прикладными программами осуществляется с помощью OPC-сервера, входящего в комплект поставки.



Рис. 2.87

Модули расширения подключаются по сети Profibus DP. Каждое устройство System 500S имеет контроллер Ethernet с поддержкой функций связи PG/OP. Среди встроенных интерфейсов — MPI, Profibus DP, Ethernet.

2.2.22 Контроллеры компании WAGO (Германия)

Компания **WAGO**, известная как мировой производитель пружинных зажимов (клемм) и различных соединителей, выпускает модульные системы ввода/вывода, включающие базовые и сетевые контроллеры. В модульной системе WAGO-1/O-System 750 используются базовые контроллеры узла сетей Lightbus, Profibus DP,

Interbus, DeviceNet, CANopen, CAL. Помимо серии 750 компания выпускает компактную серию WAGO-1/O-System 752, серию WAGO-1/O-System 755 со степенью защиты IP 67, серию WAGO 758 (компактный промышленный компьютер).

Модульная система ввода/вывода WAGO-1/O-System 750 (рис. 2.88). Система WAGO-1/O-System 750-xxx имеет в составе базовый сетевой контроллер, устанавливаемый на DIN-рейку с зажимом CAGE CLAMP (заземляющий контакт, автоматическая фиксация, 2-, 3- и 4-проводные клеммы), модули ввода/вывода. Для примера приведем характеристики базовых контроллеров для сетей Lightbus (750-300), Profibus DP (750-343) и Interbus (750-804).

Характеристики базового сетевого контроллера WAGO-1/O-System 750-300: сеть Lightbus, скорость 2,5 Мбит/с, время передачи — 1 мс на 640 каналов ввода/вывода, максимальное число каналов ввода/вывода — 16192, максимальное число сетевых узлов — 254, максимальная длина сегмента сети — 300 м (HCS), физическая среда — волоконно-оптический кабель. Максимальное число модулей ввода/вывода в одной станции — до 64, питание — 24 **VDC**, степень защиты — IP20.

Характеристики базового сетевого контроллера WAGO-1/O-System 750-343 (рис. 2.89): сеть Profibus DP/V1, скорость передачи 12 Мбит/с, максимальное число сетевых узлов (с репитером) — 125, максимальное число каналов ввода/вывода — 6000, физический канал — витая пара по EN 50170, максимальная длина

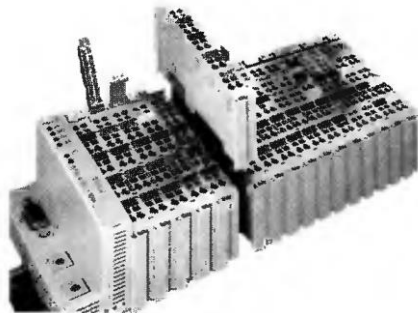


Рис. 2.88



Рис. 2.89

сегмента в зависимости от скорости передачи и физического канала — от 100 м до 1200 м, скорость передачи — от 9,6 кбит/с до 12 Мбит/с, питание — 24 VDC, степень защиты — IP20.

Характеристики базового сетевого контроллера WAGO-1/O-System 750-804 (рис. 2.90): сеть Interbus, скорость передачи 500 кбит/с, максимальное число сетевых узлов — 256, максимальное число каналов ввода/вывода — 4096, максималь-

ное число модулей ввода/вывода — 64, физический канал — витая пара, максимальная длина сегмента сети — 400 м, время передачи — 1,4 мс на 320 каналов ввода/вывода, программирование контроллера по МЭК 61131-3, пакет программирования — WAGO-I/O-PR032, питание — 24 **VDC**, степень защиты — IP20.

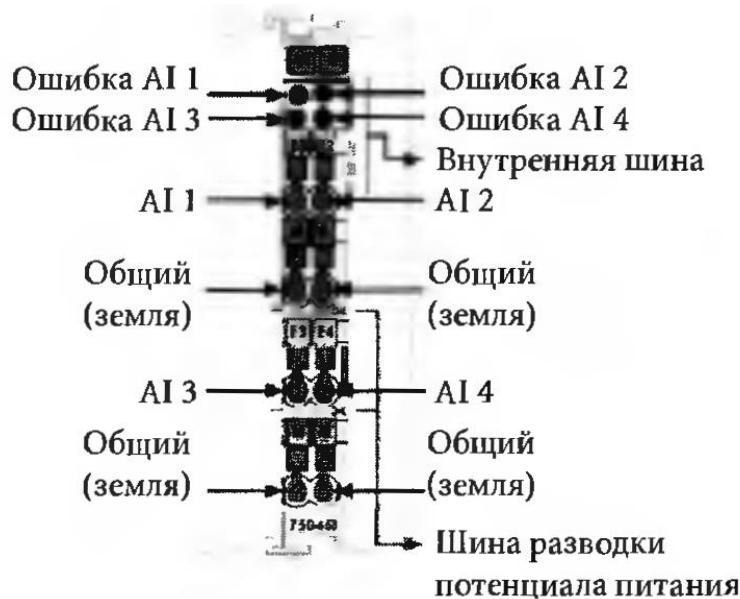


Рис. 2.90

В других модификациях системы используются сети Profibus DP (базовый ведомый контроллер 750-301, скорость передачи 1,5 Мбит/с и 750-303 со скоростью передачи 12 Мбит/с), Interbus (базовый контроллер 750-344, скорость передачи 500 кбит/с и 750-345 со скоростью передачи 2 Мбит/с), DeviceNet (базовый ведомый контроллер 750-346, скорость передачи 125-500 кбит/с) и CANopen (базовый контроллер 750-347, скорость передачи 10 кбит/с... 1 Мбит/с). Габариты модулей системы: высота — 65 мм, ширина — 51 мм, глубина — 100 мм.

Серия WAGO-I/O-System 755 имеет степень защиты IP67 и может использоваться в жестких условиях эксплуатации. Контроллер используется в качестве ведомого устройства в сети Profibus DP с числом дискретных входов/выходов 16DI, 8DI/4DO, 8DO; в сети DeviceNet в качестве ведомого устройства с числом дискретных входов/ выходов 16DI, 8DO; в сети Interbus в качестве ведомого устройства с числом дискретных входов/выходов 8DI, 8DO.

PC-контроллер WAGO I/O IPC (серия 758). Контроллер WAGO I/O-IPC типа 758-870 (рис. 2.91) на базе процессора Geode SCI 100/1200, 266 МГц, ОЗУ — 32 Мбайт, операционная система— RT-Linux, интерфейсы RS-232, 2x10 Base-T/100 Base-TX, USB-порт, сетевые интерфейсы — Profibus DP, CANopen и DeviceNet. Максимальное число модулей в узле — 64. Программирование осуществляется с

помощью пакета WAGO-1/O-PRO-CAA с использованием языков программирования по стандарту МЭК 61131-3. Питание контроллера — 24 **VDC**, степень защиты — IP20. Габариты устройства — 172x65x100 мм.

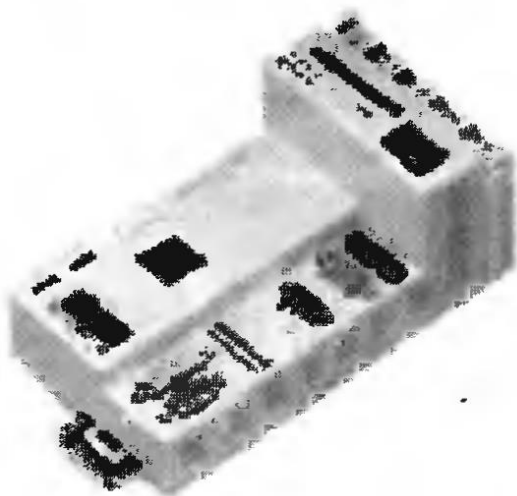


Рис. 2.91

Программное обеспечение контроллеров компании WAGO. Программное обеспечение включает пакеты WAGO-I/O-CHECK2, WAGO OPC Server для Modbus TCP и WAGO I/O-PRO (инструмент для программирования и визуализации). Поддерживается ОС Windows 98/2000/NT 4.0, ОЗУ не менее 32 Мбайт.

2. Контроллеры, производимые предприятиями РФ

К числу производителей отечественных контроллеров относятся: ГК «ТЕ-КОН», ЗЭИМ, ЗАО «Волмаг», ЭзАН, МЗТА, ЗАО «Эмикон», НПФ «КРУГ», компания ДЭП, НПО «Системотехника», ЭлеСи, ОВЕН, ЗАО «Альбатрос» и некоторые др.

К достоинствам отечественных контроллеров относятся, помимо естественной подробной русификации всех компонентов системы, максимальный учет специфики российского производства, легкость адаптации к условиям эксплуатации, обучения и обслуживания, совместимость с отечественным оборудованием. Немаловажными обстоятельствами являются более низкая цена, возможность получения быстрой консультации в период эксплуатации и ремонта и др.

Ниже приводятся краткие сведения об отечественных контроллерах, выпускаемых российскими компаниями. Более подробные сведения можно найти на сайтах компаний, в отечественных журналах (прежде всего в журнале «Промышленные АСУ

и контроллеры» и др.), в материалах семинаров и выставок по автоматизации и управлению.

2.3.1 Контроллеры ЗАО «Волмаг»

Контроллеры ЗАО «Волмаг» серии КОНТРАСТ предназначены для построения систем автоматизации различной архитектуры. Современные скоростные интерфейсы, открытый протокол связи, каналы подключения полевых сетей, фирменные программные продукты обеспечивают работу контроллеров в составе сложных многоуровневых систем автоматизации. Контроллеры имеют блочно-модульную конструкцию, высокую надежность и «живучесть» за счет использования технологии поверхностного монтажа на базе электронных компонентов производства Intel, AMD, Atmel, Altera, Analog Devices, Bourns и других ведущих зарубежных фирм. Контроллеры серии КОНТРАСТ изготавливаются в двух исполнениях: навесное исполнение (КР-300ИШ, КР-300Ш) — для встраивания в шкаф с односторонним доступом и приборное исполнение (КР-300И, КР-300М, РК-131/300М) — для встраивания в щит. Время цикла контроллеров серии КОНТРАСТ — от 10 до 400 мс.

Серия КОНТРАСТ включает контроллеры КР-500, КР-300Ш, КР-300ИШ, КР-300ИП, КР-300М, РК-131/300М.

Контроллер КР-500 (рис. 2.92) предназначен для построения распределенных систем автоматического управления. Модули УСО подключаются к центральному процессорному блоку по интерфейсу RS-485 и могут быть удалены от блока центрального процессора на расстоянии до 1,2 км. Каждый модуль УСО выполнен в отдельном корпусе и построен на базе микропроцессора который выполняет следующие функции:

- информационный обмен с центральным процессором;
- ввод/вывод аналоговых и дискретных сигналов; •диагностика входных/выходных сигналов (контроль линии связи с датчиками сигналов, защита от КЗ, контроль включения);
- линеаризация сигналов термодатчиков;
- точный подсчет импульсов на дискретных входах (до 500 Гц);
- непрерывная диагностика модулей.

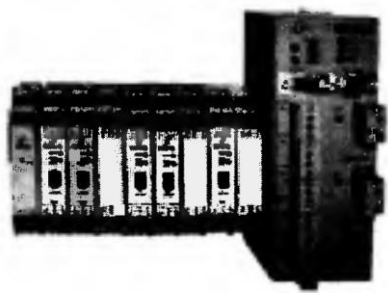


Рис. 2.92

В состав контроллера входят блок контроллера БК-500 и модули УСО, которые подключаются к контроллеру с помощью шлюзового микроконтроллера.

ШМК имеет 3 порта RS-485. К одному ШМК можно подключить 16 модулей УСО-Д.

В состав блока БК-500 входят: модуль процессора ПРЦ-500 с зашитой резидентной программой, модуль МИК-Д с разъемами для подключения пульта настройки ПК-302 и клеммами для подключения полевых сетей, модуль МП-Д, включающий в себя схему стабилизации напряжения.

Модули УСО-Д контроллера (21 модификация) со встроенным микропроцессором (рис. 2.93) выполнены в компактных пластмассовых корпусах и содержат одну или две (в сдвоенном корпусе) печатные платы с габаритными размерами 100x80 мм, на которых размещены электронные компоненты. На передней панели модуля имеются клеммы для подключения цепей входных и выходных сигналов (12 или 24 клеммы) и разъем для подключения пульта контроллера ПК-302. Каждый модуль УСО-Д имеет два канала связи с интерфейсом RS-485. Один из каналов при установке модуля подключается к шине интерфейса связи с контроллером. Ко второму каналу подключается пульт контроллера ПК-302 или компьютер для настройки и диагностики модуля. Модули УСО могут подключаться к устройствам других производителей по протоколу Modbus RTU. Число контуров регулирования, поддерживаемых контроллером, — 32.

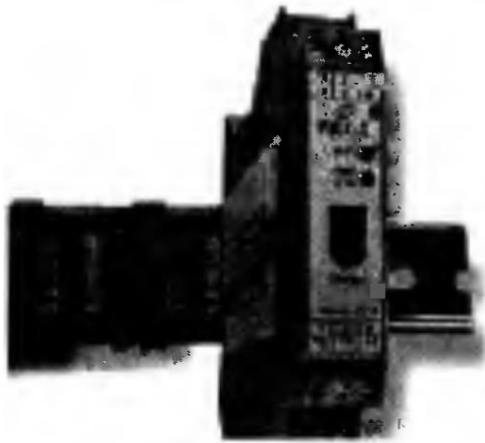


Рис. 2.93

Контроллеры объединяются в локальную сеть МАГИСТР (до 31 устройства), что позволяет им обмениваться оперативными данными в процессе работы. Положительным свойством сети МАГИСТР является то, что можно обратиться с верхнего уровня ко всем контроллерам сети, подключившись к любому из них. Каждый контроллер оснащен шлюзовым каналом для связи с верхним уровнем. Связь осуществляется по последовательному интерфейсу RS-232 или RS-485 (оговаривается при заказе). Скорость связи — 1,2...115,2 кбит/с. Скорость передачи по шлюзовому каналу аналоговых/дискретных сигналов составляет 5000/80000 сигналов в секунду. Также для связи с верхним уровнем предусмотрен интерфейс Ethernet. Общее число аналоговых/ дискретных каналов сети МАГИСТР составляет 5890/9424. Скорость связи по сети — до 500 кбит/с. Топология сети МАГИСТР — моноканал, интерфейс связи — RS-485 (4 канала нерезервированной или 2 канала резервированной полевой сети).

Программное обеспечение контроллеров включает резидентную программу, поставляемую в составе контроллера, систему программирования и настройки контроллеров КОНТРАСТ для IBM PC в ОС Windows или ИСТОК (DOS), а также OPC-сервер связи со SCADA-системами. Технологические языки программирования контроллеров — ФАБЛ (язык класса FBD, до 999 функциональных блоков) и ПРОТЕКСТ (язык класса ST, до 64000 переменных).

Контроллеры предусматривают их резервирование в целом, резервирование процессорных модулей или модулей УСО.

Контроллер КР-3ООМ состоит из блока контроллера БК-М (БК) с процессором и тремя модулями УСО, блока БУСО-М. Число модулей в блоке УСО-М — 4, число блоков БУСО — 4. Таким образом, общее число модулей УСО — 19, а число аналоговых входов/выходов контроллера — до 190, дискретных — до 304. Для под-

ключения к блоку контроллера БК-М двух, трех или четырех блоков БУСО-М предназначен блок расширения БР. В качестве дополнительного оборудования для работы с контроллером применяются блоки усилителя мощности БУМ-20М/30 (усиление мощности дискретных выходных сигналов с помощью реле), блоки усилителей сигналов для термопар БУТ-10И/30 (преобразователи термоЭДС в токовый сигнал 0/4...20 мА, 0...5 мА 2- и 4-канальные) и блоки усилителя сигналов для термосопротивлений БУС-10И/30 (преобразователи сигналов терморезисторов в токовые сигналы).

В состав блока БК-М входят системная плата с четырьмя разъемами для установки процессорной платы и трех модулей УСО, модуль процессора ПРЦ-301 (процессор Intel 386EX) с резидентной программой, модули УСО, лицевая панель со встроенным пультом управления (или без него), модуль стабилизатора напряжения и межблочный соединитель (МБС) с блоком питания БГ1-1ПМ (220 **VACUA VDC**). Тип модулей УСО: МАС (8 AI, 2 AO), МДА (8AI, 4 DO), МСД-00 (16 DO), МСД-01 (4 DI, 12 DO), МСД-02 (8 DI, 8 DO), МСД-03 (12 DI, 4 DO), МСД-04 (16 DI), МАВ (8 AO).

Объем программы ФАБЛ аналогичен КР-500 и составляет 999 алгоблоков. Количество контуров регулирования — 32. Одновременно с программой ФАБЛ контроллер способен выполнять программу, написанную на структурном языке ПРОТЕКСТ. Применение этого языка облегчает программирование контроллера для решения задач дискретного управления.

Контроллер КР-300Ш аналогичен контроллеру КР-300М, но выполнен в навесном исполнении. Это дает следующие преимущества: конструктив позволяет применять модули повышенной канальности (максимальное число дискретных входов/выходов контроллера КР-300Ш составляет 608 каналов). Контроллер в навесном исполнении удобно размещать в шкафах с односторонним доступом. Отличия от контроллера КР-300М: контроллер состоит не из блоков, а из секций (одна секция БК-Ш и до четырех секций БУСО-Ш); процессорная плата и модули УСО аналогичны модулям приборного исполнения; питание контроллера осуществляется от блока ББП-24 или БГ-24.

В состав блока контроллера БК-Ш входят системная плата с пятью разъемами для установки процессорной платы и трех модулей УСО, модуль процессора ПРЦ-301Ш с резидентной программой, модуль МПИ, модули УСО. К одному блоку БК-Ш можно подключить до четырех блоков БУСО-Ш, каждый из которых содержит до 4-х модулей УСО. Тип модулей УСО: МАС-3Ш (8 AI, 2 AO), МДА-3Ш (8 AI, 4 DO),

МСД-Ш.00 (16 DO), МСД-Ш.01 (4 DI, 12 DO), МСД-Ш.02 (8 DI, 8 DO), МСД-Ш.03 (12 DI, 4 DO), МСД-Ш.04 (16 DI), МАВ-Ш-Х (8 АО), МСД-2Ш.01 (32 DI), МСД-2Ш.03 (16 DI, 16 DO).

Таким образом, максимальное число аналоговых/дискретных входов/выходов блока контроллера — 30/96, блока БУСО — 40/128 (число блоков БУСО — до 4). Таким образом, максимальное число аналоговых/дискретных входов/выходов контроллера в целом составляет 190/608.

Контроллер КР-300ИП (рис. 2.94) является дальнейшим развитием контроллеров КР-300М и включает интеллектуальные модули УСО. Каждый модуль УСО имеет встроенный микропроцессор, отвечающий за функции, аналогичные контроллеру КР-500. Максимальное число аналоговых/дискретных входов/выходов блока контроллера — 3048, блока БУСО — 40/64 (число блоков БУСО — до 4), одного блока БУСО-1 до 128 (только дискретные). Таким образом, максимальное число аналоговых/дискретных входов/выходов контроллера в целом (без блока БУСО-1) составляет 190/816.

С помощью модуля интерфейсных каналов МИК можно организовать до трех полевых сетей.



Рис. 2.94

Если к каждому каналу этого модуля подключить, например, по два блока БУСО с модулями дискретного ввода, то общая канальность контроллера возрастет на 768 каналов дискретного ввода.

Каждый канал полевой сети — универсальный и может быть запрограммирован по желанию пользователя на работу с различными устройствами, имеющими интерфейс RS-485. Реализованы драйверы связи по протоколам: Modbus RTU ведущий/ ведомый. Кроме каналов полевой сети модуль МИК имеет высокоскоростной дополнительный шлюзовой канал для связи с верхним уровнем и канал горячего резервирования контроллеров.

Контроллер КР-300ИШ (рис. 2.95) аналогичен контроллеру КР-300ИП, но выполнен в навесном исполнении. Благодаря новым модулям аналогового ввода повышенной канальности (2 группы до 12 каналов) с возможностью выбора типа входного сигнала пользователь имеет возможность индивидуально настроить каждый канал первой группы на любой из сигналов: 0...5,0...20,4...20 мА. Аналогично, каналы второй группы индивидуально настраиваются на любой из предложенных диапазонов сигнала от термопары.

Обновлен ряд модулей дискретного ввода повышенной канальности. Модуль МСД-1-16/8 (16 входов, 8 выходов) по желанию пользователя способен работать в режиме многоканального ввода дискретных сигналов. Все восемь выходов используются как управляющие сигналы на блок коммутации и расширения (блок БКР), который поочередно коммутирует группы по 16 сигналов на входы модуля. Таким образом, один модуль воспринимает до 128 дискретных сигналов.

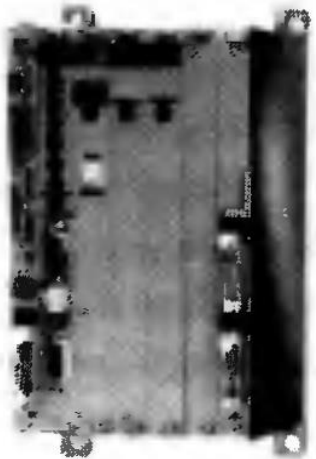


Рис. 2.95

В состав блока контроллера БК-ИШ входят системная плата с пятью разъемами для установки процессорной платы и трех модулей УСО, модуль процессора ПРЦ-300ИШ с резидентной программой, модуль МПИ, модули УСО, межблочный соединитель МБС-Ш. К одному блоку БК-Ш можно подключить до четырех блоков БУСО-Ш, каждый из которых содержит до четырех модулей УСО. Блок БУСО-ИШ подключается к контроллеру через канал полевой сети. На один канал допускается подключать до 24 блоков БУСО-ИШ.

Тип модулей УСО: МАС-1Ш (8 АГ, 2 АО), МДА-1Ш (8АІ, 4 DО), МСД-1Ш.00 (16 DО), МСД-1Ш.02 (8 DІ, 8 DО), МСД-1Ш.04 (16 DІ), МСД-1Ш.06 (16 DІ, 8 DО), МАВ-1Ш (8 АО), МАС-2Ш (8 АІ, 2 АО), МДА-2Ш (8 АІ, 4 DО), МСД-2Ш.00 (32 Dr), МСД-2Ш.02 (16 DІ, 16 DО), МАС-5Ш (24 АІ), МТС-Ш (23 входа для термопар). МРС-Ш (8

каналов для подключения термометров сопротивления), МИК-Ш (3 канала полевой сети RS-485).

Таким образом, максимальное число аналоговых/дискретных входов/выходов блока контроллера — 72/96, блока БУСО — 96/128 (число блоков БУСО до 4), одного блока БУСО-1 — 96/128. Следовательно, максимальное число аналоговых/дискрет-



Рис. 2.96

ных входов/выходов контроллера в целом (без блока БУСО-1) составляет 456/608.

Контроллер РК-131/ 300М (рис. 2.96) состоит из блока БК-1М с процессором Intel 386EX, блока БУСО-М и имеет возможность наращивания числа модулей УСО до шести модулей. К другим отличительным особенностям контроллера относятся: объем ФАБЛ-программы — 399 алгоблоков; 16 контуров регулирования; два варианта лицевой панели (регулирующая и логическая); 9 независимых программ логического управления.

Максимальное число аналоговых/дискретных входов/выходов блока контроллера — 20/32, блока БУСО — 40/64 (число блоков БУСО — 1). Таким образом, максимальное число аналоговых/дискретных входов/выходов контроллера в целом составляет 60/96.

Особенностью контроллера является аппаратная совместимость с контроллером Ремиконт Р-130. Таким образом, заменив в Р-130 процессорную плату и блок питания на аналогичные от РК-131/300М, можно получить контроллер с более мощными программными и интерфейсными возможностями.

2.3.2 Контроллеры ГК «ТЕКОН»

В группу компаний «ТЕКОН» входят ЗАО «ТЕКОН», ЗАО «ПК Промконтроллер», ЗАО «ТеконГруп». Группа компаний «Текон» производит контроллеры МФК 3000, МФК, ТКМ 52, ТКМ 410.

Контроллер МФК (рис. 2.97) представляет собой PC-совместимый контроллер, состоящий из базовой части, процессорного модуля и модулей ввода/вывода. Базовая часть представляет собой крейт Евромеханика 19" размером 6U. В крейт

устанавливается процессорный модуль и до 16 модулей ввода/вывода формата ЕЗ в произвольном сочетании и 4 места для модулей формата РС/104. Для наращивания информационной мощности применяются модули ввода/вывода ТЕКОНИК.

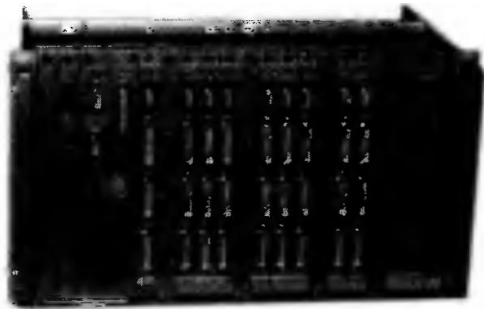


Рис. 2.97

Контроллер МФК является проектно-компонуемым изделием и выпускается в разных вариантах базовой части. Основное базовое исполнение контроллера МФК-02 включает процессорный модуль БЦП2 с СПО TeNIX и поддержкой программирования на ISaGRAF PRO. Помимо процессорного модуля типа БЦП-2 на базе процессора Pentium 300 МГц, 586/133 МГц, применяется процессорный модуль microPC. Объем ОЗУ — от 8 до 16 Мбайт, ПЗУ — от 2 до 64 Мбайт. Интерфейс — RS-232 (COM1) и RS-232 (COM2) для V04/V03, Ethernet 10/100 BaseT. Контроллер интегрируется в локальных сетях Bitbus, CAN, Ethernet, ArcNet и др. Системное ПО имеет многозадачную ОСРВ под DOS 6.X.

Общее число каналов ввода аналоговых сигналов — 256, аналоговых выходов — 128, дискретных входов — 768, дискретных выходов — 640.

Среди модулей ввода/вывода — модули ввода дискретных сигналов D48 (6 групп по 8 каналов), модули вывода дискретных сигналов D40 и P40 (40 каналов), модуль ввода/вывода дискретных сигналов D32 (32 канала, 16 DI/16 DO), модуль ввода/вывода аналоговых сигналов A16/2

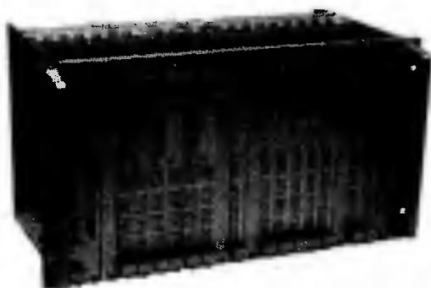


Рис. 2.98

(16 AI и 2 AO), модуль вывода аналоговых сигналов A08 (8 AO), модули ввода сигналов термодатчиков и термометров сопротивления L16 и L16i.

Контроллер МФК3000 (рис. 2.98) используется для контроля и управления технологическими процессами объектов с повышенными требованиями к надежности. МФК3000 включает до трех крейтов с общим числом модулей ввода/вывода (15 типов модулей) до 61 (каждый крейт рассчитан на подключение 21 модуля). Максимальное число аналоговых вводов/выводов — 976, дискретных вводов/выводов — 2928.

Среди модулей — модули ввода напряжения постоянного и переменного тока DI48 (24 VDC), DI32 (220 **VAC**), DI16 (220 **VAC**); модули вывода напряжения постоянного и переменного тока DO32 (24 VDC), DO16r (24 **VDC/220 VAC**) DO16s (220 **VAC**); модули аналогового ввода AI16 (0/4...20 мА, 0...5 мА, 0...10 В) и LI16 (16 каналов RTD3, RTD4 или 15 каналов ТС с каналом компенсации холодного спая).

Другие преимущества по сравнению с контроллером МФК: высокопроизводительный PC-совместимый процессорный модуль, мощная среда программирования ISaGRAF PRO, дублированный интерфейс Ethernet 100 Base-T, резервирование (дублирование или троирование) помимо модулей ввода/вывода также модулей ЦП, 100% горячее резервирование контроллеров. PC-совместимый ЦП Geode 300 МГц имеет следующие интерфейсы: 2xEthernet 100 Base-T, 2xCOM-порта, 2xШВ-порта, LPT-порт. Для АСУ ТП с взрывоопасным производством используется групповой 8-канальный барьер искрозащиты TCC_Ex8A. Все модули ввода/вывода имеют возможность горячей замены.

Программное обеспечение МФК3000 использует языки технологического программирования по стандарту IEC 61131-3. Базовой системой программирования для всех контроллеров является система ISaGRAF PRO. Эта система состоит из среды разработки ISaGRAF PRO Workbench и среды исполнения. Библиотека ISaGRAF PRO содержит более ста функций и функциональных блоков. Загрузка прикладных программ осуществляется по сети Ethernet (протокол TCP/IP). Базовым ПО контроллеров является СПО TeNIX, включающее ядро многозадачной ОС Linux. Для доступа со стороны SCADA-систем к данным контроллеров используется Te-sopOPC Server. В качестве SCADA-систем используются любые открытые SCADA-системы, в том числе КРУГ-2000, TraceMode, MasterSCADA и др.

Контроллер ТКМ700 (рис. 2.99) имеет распределенную архитектуру и модульный принцип построения. Максимальное число модулей ввода/вывода — 51 из 16 различных типов модулей. Расширение контроллера достигается компоновкой четырех крейтов. Максимальное число каналов аналогового ввода/вывода - 408/408, дискретного ввода/вывода — 3264/3264. Основные преимущества

TKM700: непрерывная самодиагностика процессорного модуля и модулей ввода/вывода, пониженное энергопотребление, автоматическое конфигурирование модулей ввода/вывода, резервирование электропитания и др.

Крейт TKM700 имеет 8 или 15 платомест на объединительной панели. В зависимости от зада-



Рис. 2.99

чи может быть выбран определенный тип процессорного модуля. Старшая модель CP-7010 имеет 32 разрядный RISC-процессор Intel XScale 400 МГц. В качестве панели оператора используется графическая панель оператора V04M. Программирование TKM700 также производится с помощью системы ISaGRAF PRO. Остальные параметры аналогичны контроллеру МФК3000.

Контроллер ТКМ52 (рис. 2.100) представляет собой PC- совместимый моноблочный контроллер в виде четырехмодульного блока. Отличие от контроллера ТКМ51 заключается в использовании в ТКМ52 PC-совместимого процессорного модуля. Контроллер применяется для сбора, обработки параметров, реализации функций регулирования и противоаварийной защиты. Контроллер ТКМ52 состоит из базового модуля с блоком клавиатуры и индикации V03, блока питания и процессорного модуля с процессором 586 100/133 МГц, а также модулей ввода/вывода (от 1 до 4, устанавливаемых в любом сочетании (12 типов модулей с групповой и индивидуальной гальванической изоляцией). Объем ОЗУ — 16 Мбайт, флэш-ПЗУ — 16 Мбайт, энергонезависимая память — 512 кбайт.

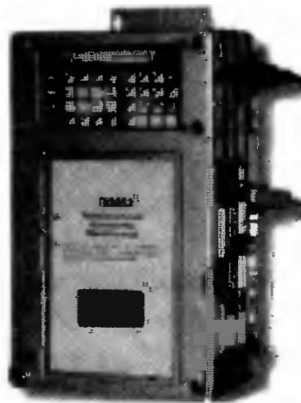


Рис. 2.100

В зависимости от количества секций для модулей ввода/вывода различаются следующие модификации базового исполнения контроллера: ТКМ52.2 на 2 модуля ввода/вывода (3 секции) и ТКМ52.3 на 3 модуля ввода/вывода (4 секции). В качестве дополнительных опций предусмотрены возможность местного подключения клавиатуры и монитора (VGA) и энергонезависимой памяти для организации архивов и сохранения состояний входов/выходов и промежуточных переменных при перезагрузке (512 кбайт).

Максимальное число каналов аналогового ввода/вывода — 64/32, дискретного ввода/вывода — 192/160. Интерфейсы: Ethernet 10Base-T, RS-232 (COM1), RS-232/RS-485 (COM2), VGA, LPT1. Горячая замена модулей не предусмотрена.



Рис. 2.101

Контроллер ТКМ410 (рис. 2.101) представляет собой моноблочный контроллер средней информационной емкости. Основное назначение контроллера — автоматизация тепловых пунктов, котлов, горелок, а также систем защиты и блокировок. Контроллер входит в состав ПТК «Теплоник» и рассчитан на работу при температуре $-40...+70\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Контроллер ТКМ410 содержит 32-разрядный RISC-процессор фирмы ATMEL 33 МГц. Флэш-память — 2 Мбайт, ОЗУ — 2 Мбайт, энергонезависимое статическое ОЗУ — 512 кбайт с питанием от литиевой батарейки.

Число каналов аналогового ввода/вывода — 16AI, 2АО, дискретного ввода/вывода — 36 DI (24 **VDC**), 24 DO (24 VDC). Основные интерфейсы: Ethernet IOBaseT, 3xRS-232, 1xRS-232/RS-485, 1xRS-485.

Через порт RS-232 возможна передача сообщений по GSM/GPRS каналу с помощью модема TELECON 100. Для применения в системах АСУ ТП модем имеет дополнительную функцию удаленного включения/выключения питания. Выпускаются три модификации модема, отличающиеся устанавливаемыми GSM/GPRS терминалами фирмы Wavescm и встроенными функциями (TELECON 100-01, TELECON 100-02 и TELECON 100-03). Скорость передачи данных для **Рис. 2.101**

устройств класса 2(1 канал на прием, 1 канал на передачу) составляет 9,6 или 14,4 кбит/с, для устройств класса 10— 56,7 кбит/с. Отличительной характери-

стикой GSM/GPRS модема TELECON 100 является наличие встроенного стека протоколов TCP/IP, что значительно упрощает передачу данных в режиме GPRS, передачу файлов и работу с электронной почтой.

Программирование контроллера TKM-410 осуществляется с использованием системы ISaGRAF PRO. Питание контроллера — 220 **VAC**. Габаритные размеры: 425x160x71 мм.

Распределенная система ввода/вывода ТЕКОНИК (рис. 2.102) предназначена для построения распределенных систем управления. С процессорными модулями P06 и P06 DIO, ТЕКОНИК применяется в системах телемеханики, системах учета энергоресурсов и диспетчеризации.

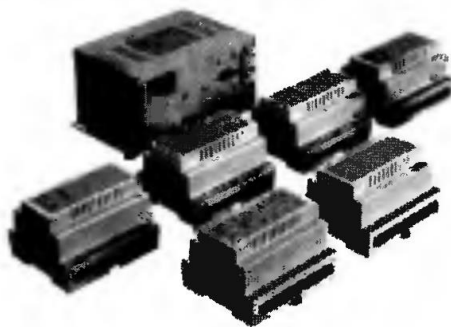


Рис. 2.102



Рис. 2.103

Процессорный модуль P06 (рис. 2.103) имеет встроенные каналы ввода/вывода и может применяться в качестве автономного высокопроизводительного контроллера с широкими коммуникационными возможностями. Процессорный модуль P06 на базе технологии t-mezon имеет несколько исполнений, отличающихся друг от друга производительностью процессора, объемом памяти, рабочим диапазоном температур и наличием дополнительных коммуникационных интерфейсов. В модуле используется процессор Intel XScale 266/533 МГц. Объем памяти: флэш-память — 16/32 Мбайт, ОЗУ — 32/64 Мбайт, энергонезависимая память — 1 Мбайт. Исполнения P06 DIO имеют встроенные 32 канала дискретного ввода и 16 каналов дискретного вывода. Все исполнения P06 имеют два интерфейса Ethernet IEEE 802.3 10/100 Мбит/с. Исполнения P06 COMM и MAX содержат шесть интерфейсов RS-232/RS-485.

PC-совместимый процессорный модуль P04 T7101 имеет несколько исполнений, которые отличаются наличием дополнительных COM-портов, интерфейса для местного подключения клавиатуры и монитора. В модуле используется процессор 486DX4-100. Объем памяти: флэш-память — 16 Мбайт, ОЗУ — 16 Мбайт, энергонезависимая память — 512 кбайт. Общее число дискретных входов — до 480, дискретных выходов — до 480, аналоговых входов — до 240, аналоговых выходов

— до 120 для одного сегмента RS-485. Интерфейсы модуля P04: Ethernet IOBaseT; 2xRS-232 или 4xRS-232, LPT1, VGA (опция).

Система ТЕКОНИК является проектно-компонуемым изделием и поставляется в соответствии с заказной конфигурацией. Система может содержать один процессорный модуль P06, P06 DIO или P04, коммуникационный модуль или преобразователь интерфейсов (конвертор) RS-232/485 TCC485A, панель оператора V04/V04M и до 250 модулей ввода/вывода в произвольной конфигурации. Модули ввода/вывода ТЕКОНИК имеют коммуникационный интерфейс RS-485 с максимальной скоростью 115 кбит/с (ASCII-протокол T4000). В составе системы ТЕКОНИК могут применяться интеллектуальный датчик температуры ТСТ11, датчик давления МЕТРАН-100 и другие интеллектуальные устройства.

Модули ввода/вывода системы ТЕКОНИК: Т3702 (16DI, 24 VDC), Т3703 (8DI, 220 **VAC**), Т3603 (16DO, 48 VAC/24 **VDC**), Т3602 (8DO, 220 **VAC**), Т3101 (8AI, 0/4...20 мА), Т3501-(4АО, 0/4. ..20 мА), Т3204 (8 каналов напряжения 0...+50/+100/+500/+1000 мВ, сигналов термопар), Т3205 (8 каналов для термометров сопротивления).

В качестве дополнительного оборудования применяются: панель оператора V04/ V04M, GSM/GPRS модем TELECON 100, клеммные соединители серии TCC, умощнители дискретных сигналов серии TCB и конвертор RS-232/RS-485 типа TCC485A.

2.3.3 Контроллеры компании «ЗЭиМ»

ОАО «Завод Электроники и Механики» выпускает семейство системно и программно совместимых контроллеров нового поколения: КРОСС-500, ТРАССА-500 и Ремиконт Р-130 ISa. Контроллеры ориентированы на автоматизацию технологических объектов в различных отраслях — теплоэнергетика, нефтегазовая промышленность, цементная, стекольная, пищевая промышленность, агропромышленный комплекс и др. Максимальное число каналов аналогового (дискретного) ввода/вывода для контроллера Кросс-500 — 256 (512), для контроллера Трасса-500 — 3840 (3840), для Ремиконт Р-130 ISa — 20 (32).

В контроллерах применены PC-совместимые центральные процессоры, операционная многозадачная система реального времени RTOS-32, соответствующая стандарту POSIX, технологические и процедурные языки программирования (шесть технологических языков системы ISaGRAF), расширенная библиотека алгоритмов

контроллера P-130. В качестве интерфейсов используются RS-232, RS-485, сетевые интерфейсы Ethernet и Modbus. Для связи со SCADA-системами Citect, InTouch, Trac- eMode, MasterSCADA и др. поставляется OPC-сервер.

Контроллер КРОСС-500 (рис. 2.104) включает центральный процессор, интеллектуальные модули ввода/вывода, программируемые модули автономного управления (микроконтроллеры) и четыре последовательные высокоскоростные внутренние шины, объединяющие модули. Все элементы контроллера работают параллельно и автономно. Блок центрального процессора БЦП управляет работой контроллера, имеет резидентное программное обеспечение (РПО) и предназначен для ввода и выполнения прикладной программы пользователя. Основой базового программного обеспечения контроллера служит многозадачная операционная система реального времени OS-9, обеспечивающая, помимо многозадачности, развитую сетевую поддержку по стандарту POSIX. Для удобства программирования на языках стандарта



Рис. 2.104

МЭК 61131-3 в состав программного обеспечения контроллера введено ядро системы ISaGRAF. Базовый монтажный блок контроллера SMART2-BASE объединяет модуль центрального процессора SM2-CPU-1,5 производства фирмы **Kontron**, submodule SM2-ETH (контроллер Ethernet с поддержкой стандарта Ethernet IEEE 802.3 и 802.3x), модуль питания. В качестве процессора используется Motorola 68LC302 с тактовой частотой 20 МГц, объем памяти DRAM — 1,5 Мбайт, SRAM — 256 кбайт, флэш-память для хранения программ и констант пользователя, а также служебных программ — 1 Мбайт. Для подключения модулей УСО (до 32 модулей на сегмент) предназначен расширитель интерфейса SP1 (модуль ИСК1). В состав ВЦП встроены каналы с интерфейсами RS-232, Ethernet, до четырех мезонинных ячеек с интерфейсом SP1 или RS-485.

Модули ввода/вывода имеют встроенный микропроцессор, выполняющий независимо от центрального процессора различные функции по обработке сигналов и диагностике оборудования (фильтрация, линеаризация, калибровка и др.). Помимо собственных модулей возможно подключение модулей ввода/вывода фирмы PEP Modular Computers из состава SMART2.

Многоканальные модули ввода/вывода постоянного состава включают следующие типы модулей: АН-8 — 8 каналов аналогового ввода (0/4...20 мА, 0...5 мА, 0...10 В); АЮ1-8/4 — 8 каналов аналогового ввода (0/4...20 мА, 0...5 мА, 0...10 В) и 4 канала аналогового вывода (0/4...20 мА, 0...5 мА); АЮ1-0/4 — 4 канала аналогового вывода (0/4...20 мА, 0...5 мА); ТС1-7 — 7 каналов ввода сигналов от термопар (ТВР, ТПР, ТПП, ТХА, ТХК, ТМК, ТЖК); TR1-8 — 8 каналов ввода сигналов от термометров сопротивления (ТСМ50, ТСМ100, ТСП50, ТСП100); DI1-16 — 16 каналов дискретного ввода; DO1-16 — 16 каналов дискретного вывода; DI01-8/8 — 8 каналов дискретного ввода и 8 каналов дискретного вывода. Также в состав модулей УСО входят модули контроля и управления исполнительными механизмами (МКУ-ЗА, МКУ-ЭК, МКУ-ЭП), программируемый микроконтроллер аналоговый МК-А (язык FBD, библиотека алгоритмов Р-130, каналы ввода/вывода 8А1,4 АО, 8 DI, 8 DO/IO) и программируемый микроконтроллер импульсный МК-И (отсутствуют каналы 4 АО, остальные характеристики аналогичны МК-А).

Для наладки, настройки и конфигурирования модулей, а также контроля и изменения параметров (коэффициентов) блока центрального процессора ВЦП и микроконтроллеров в автономном режиме предназначен пульт настройки РН1.

Все модули и терминальные блоки контроллера, кроме блока переключения БПР- 10, выполнены для монтажа на DIN-рейку. Размеры модулей: высота 130 мм, длина (глубина) 100 мм, ширина (30, 45, 60) мм в зависимости от типа модуля. Каждый модуль имеет три разъема — для подключения внешних сигналов, магистрали SPI и пульта настройки. Питание контроллера в зависимости от заказа — 220 VAC или 24 VDC.

Контроллер ТРАССА-500 (рис. 2.105) имеет децентрализованную архитектуру и по принципу построения и функционирования является полным аналогом контроллера КРОСС-500 и обладает всеми отличительными особенностями последнего. Различия между контроллерами ТРАССА-500 и КРОСС-500 следующие:

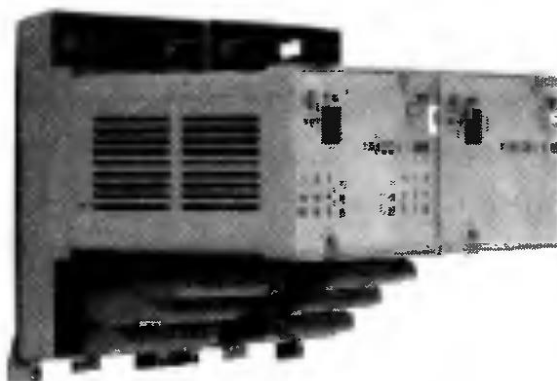


Рис. 2.105

- 72) наличие в полевых модулях последовательных портов, работающих в режиме «ведомый», с одинаковыми или разными приоритетами команд управления выходами модуля (вместо шины SPI) для дублирования линий связи полевой сети или работы с двумя ведущими;
 - 73) плата INT-232 с интерфейсом RS-232 для сопряжения с модемами;
 - 74) плата INT-485 с гальванически изолированным интерфейсом RS-485 для сопряжения блоков ТРАССА-500 с полевой сетью RS-485;
 - 75) плата INT-485-1 с интерфейсом RS-485 (без гальванической развязки) для сопряжения блоков ТРАССА-500 или других устройств по интерфейсу RS-485;
 - 76) плата SP1 для подключения устройств КРОСС-500 по интерфейсу SP1;
- сокращенная номенклатура полевых модулей, использование только проектнокомпонруемых модулей с переменным составом разнородных каналов.

Контроллер полевой ТРАССА-500 комплектуется из блоков, модулей и других изделий. В контроллере ТРАССА-500 применяется ВЦП на базе —PC-совместимого модуля Wafer 482, который содержит процессор i486DX4-100 с встроенным сопроцессором. В состав ТРАССА-500 входят также блок переключения БПР-10 и пульт настройки РН1, входящие в состав контроллера КРОСС-500 и имеющие аналогичные функции. Блок переключения БПР-10 предназначен для контактного переключения до 8 аналоговых или дискретных сигналов и может применяться в схемах резервирования. Блок содержит 8 реле с переключающими контактами, выходные контакты каждого реле гальванически изолированы от остальных цепей.

В состав контроллеров, кроме традиционных средств (блока центрального процессора ВЦП (ВЦП) и блоков ввода/вывода), введены блок программируемого микроконтроллера Т-МК1 (блок Т-МК1) и процессоры ввода/вывода (ПВВ), функционирующие автономно, параллельно и асинхронно по отношению к ВЦП. Максимальное число аналоговых и дискретных входов/выходов контроллера — 7648. Каналы ввода/вывода размещаются в ячейках блоков Т-ADIOI и Т-DIOI, а также блоков микроконтроллера Т-МК1. Конструкция блоков ввода/вывода Т-ADIOI, Т-DIOI унифицирована и содержит платформу, на которой расположена клеммная колодка и соответствующие модули. Модули Т-ADIOI, Т-DIOI имеют две платы — плату процессора с мезонинами интерфейсных плат и плату ввода/вывода, на которой установлены до 8 ячеек, выбранных заказчиком. Каждая ячейка имеет гальваническое разделение от других ячеек и от внутренней цифровой шины. Все ячейки, кроме ячейки ТС1, могут быть установлены на любое место (от 1 до 8); ячейка ТС1 может

быть установлена на места от 2 до 8. Блоки имеют проектно-компонуемый состав — до 8 аналоговых и дискретных ячеек по заказу.

Блоки Т-МК1 имеют встроенные собственные каналы ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов, и кроме функций ввода/вывода, первичной обработки сигналов и передачи их БЦП, свойственных всем блокам, выполняют различные управляющие функции. Параметры блоков Т-ADIOI, Т-МК1 приведены в табл. 2.34.

Таблица 2.34. Ячейки проектно-компонуемых блоков Т-ADIO1, Т-МК1

Тип ячейки	Параметры ячейки
AI1	1 канал ввода сигналов $0 \dots 10 \text{ В}, \pm (0 \dots 10) \text{ В}, \pm (0/4 \dots 20) \text{ мА}, 0 \dots 5/20 \text{ мА}$
AI2	1 канал ввода сигналов $0 \dots 10 \text{ В}, \pm (0/4 \dots 20) \text{ мА}, 0 \dots 5 \text{ мА}$
AI3	4 канала ввода сигналов $\pm (0/4 \dots 20) \text{ мА}, \pm (0 \dots 5) \text{ мА}$
AO1	1 канала вывода сигналов $0/4 \dots 20 \text{ мА}, 0 \dots 5 \text{ мА}$
AO2	2 канала вывода сигналов $0/4 \dots 20 \text{ мА}, 0 \dots 5 \text{ мА}$
TC1	1 канал ввода сигналов напряжения $\pm (0 \dots 25/70/140/280/560/1120/2240) \text{ мВ}$
TR1	1 канал ввода сигналов сопротивления $0 \dots 50/100/200/400 \text{ Ом}$, трехпроводная схема
TR2	1 канал ввода сигналов сопротивления $0 \dots 50/100/200/400 \text{ Ом}$, четырехпроводная схема
TR3	2 канала ввода сигналов сопротивления $0 \dots 50/100/200/400 \text{ Ом}$ и сигналов от термометров сопротивления $0 \dots 100/200/400 \text{ Ом}$, четырехпроводная схема подключения
DI2	4 канала ввода дискретных сигналов
DO2	4 канала вывода дискретных сигналов

Т-МК1 может использоваться для построения небольших систем автоматизации без применения центрального процессора и имеет систему ввода/вывода блока Т-ADIOI. Один из последовательных портов Т-МК1 может использоваться для подключения блоков Т-ADIOI, Т-DIOI и Т-МК1 с целью увеличения числа входов/выходов. В этом случае Т-МК1 является «ведущим» в сети. Для программирования Т-МК1 разработан язык FST («функционально ориентированный структурированный текст») на базе любого текстового редактора.

Резидентное программное обеспечение микроконтроллера включает операционную систему реального времени RTOS-32 и исполнительную систему ISaGRAF Target. Программирование Т-МК1 осуществляется на любом из шести языков системы ISaGRAF с некоторыми ограничениями на максимальное число переменных.

Дискретные ячейки входных сигналов блока Т-DIOI: DI1 (2 канала, 24 **VDC**), DI3 (1 канал, 220 **VAC**), DI4 (1 канал, 24 **VDC**). Напряжение гальванической изоляции— 1500 В.

Все блоки контроллера имеют интерфейс RS-232 и могут настраиваться как в составе контроллера дистанционно через контроллерную сеть и БЦП, так и автономно, при подключении блока к ПК или пульту настройки PN1 (в лаборатории, на объекте), что значительно упрощает и удешевляет процедуры настройки блоков.

Пульт настройки PN1 служит для просмотра и изменения настроек блоков, ячеек, каналов; просмотра состояния входов и выходов; изменения состояния выходов; оперативного контроля и установки значений переменных (коэффициентов) технологических программ ВЦП и блоков Т-МК1; тестирования блоков и вывода на индикатор сообщений об обнаруженных ошибках, выдаваемых блоками в случае их отказа и т. п.

Интерфейс контроллера с технологом-оператором осуществляется с помощью пульта, встраиваемого в шкаф управления. Пульт технолога-оператора предназначен для визуализации и управления переменными. Пульт содержит ЖКИ-индикатор, клавиатуру и канал для подключения к ВЦП. В качестве пульта может использоваться любая операторская панель с интерфейсом RS-232/485 и протоколом обмена Modbus (например, серия EZ фирмы EZ-TOUCH и др.). В состав контроллера пульт технолога-оператора не входит.

Функции пульта технолога-оператора программируются пользователем с помощью пакета КОНФИГУРАТОР ПУЛЬТА в процессе разработки программы. Средства технологического программирования ВЦП и микроконтроллера используют систему разработки IsaGRAF Workbench в соответствии со стандартом МЭК 61131-3, расширенную новыми алгоритмами, в том числе из библиотеки контроллера Р-130.

Контроллер имеет следующие встроенные интерфейсы: 4хRS-485, 2хRS-232. 1хEthernet. Каналы с интерфейсом RS-232 применяются для связи контроллера с модулями ввода/вывода, инженерной станцией, для подключения пульта технолога-оператора и резервирования ВЦП.

Для повышения надежности систем автоматизации на базе контроллеров предусмотрены различные способы резервирования аппаратуры этих контроллеров. К ним относятся: резервирование ВЦП, резервирование контроллеров, резервирование модулей ввода/вывода, резервирование полевых сетей.

Различные способы резервирования реализуются либо встроенными программно-аппаратными средствами контроллера, либо проектными средствами с управлением процедурами резервирования со стороны технологической программы пользователя (ТПП).

Резервирование контроллеров и БЦП поддерживается системными средствами. Потребителю необходимо соединить дискретные выходы контроллеров, подключить аналоговые выходы к блоку переключения резерва и соединить БЦП специальным жгутом. Все остальные виды резервирования осуществляются проектным путем.

Контроллер P-130 ISa (рис. 2.106) представляет новое поколение российских контроллеров P-130. Контроллер имеет расширенные функциональные возможности, более высокую производительность обработки и передачи данных, а также более развитую систему программирования.



Рис. 2.106

В состав контроллера входит PC-совместимый процессор на базе микропроцессора i386SX40, содержащий флэш-память для хранения резидентного программного обеспечения и технологических программ пользователя, оперативную энергонезависимую память для хранения базы данных технологической программы, динамическую память для исполнения программ, флэш-диск (по дополнительному заказу), сторожевой таймер и таймер-календарь. Также имеются два системных канала для подключения к сетям Ethernet и Modbus, канал с интерфейсом RS-232 для организации резервирования контроллеров, резидентное программное обеспечение — операционная система реального времени RTOS-32 и исполнительная система ISaGRAF Target. В состав контроллера P-130 ISa входят 7 типов модулей УСО (МАС, МДА, МСД), блоки усилителей сигналов термопар БУТ-10, усилителей сигналов термометров сопротивления БУС-10, блоки усилителей мощности БУМ-10, блоки питания БП-1, БП-4.

Основной микропроцессорный блок контроллера P-130 ISa выполнен в приборном конструктиве контроллера P-130, в который устанавливаются модуль процессора, 1...2 модуля ввода/вывода, лицевая панель и преобразователь 24 **VDC/5 VDC**. Габаритные размеры конструктива — 80x160x365 мм. Установка контроллера рассчитана на утопленный монтаж на вертикальной панели щита или пульта управления. Все остальные блоки рассчитаны на навесной монтаж.

Программное обеспечение контроллера P-130 ISa — система технологического программирования ISaGRAF. Система разработки технологических программ пользователя контроллеров ISaGRAF Workbench включает шесть типов технологических языков: SFC, FC, FBD (расширен библиотекой алгоритмов P-130), LD, ST и IL. Система обеспечивает возможность расширения поставляемых библиотек функций и алгоритмов силами пользователя на языке Си. Для связи с верхним

уровнем (сопряжение со SCADA-системами) используется OPC-сервер. Все программные продукты функционируют на ПК в среде Windows.

2.3.4 Контроллеры ОАО «МЗТА»

ОАО «Московский Завод Тепловой Автоматики» производит контроллеры MC8, MC5 и релейные модули MR4 и MR8, входящие в ПТК «КОНТАР». В состав КОНТАР входят также инструментальные программы КОНГРАФ, КОНТАР-АРМ, КОНТАР- SCADA.

Контроллеры измерительные MC8 (рис. 2.107) предназначены для сбора информации и реализации разнообразных алгоритмов автоматизированного управления



Рис. 2.107

технологическими процессами. Контроллеры MC8 являются основным (базовым) элементом комплекса КОНТАР. Система КОНТАР — это распределенная система управления, основанная на Интернет- технологии. Для передачи и приема информации используется глобальная сеть Интернет. Для обращения к глобальному серверу пользователю необходим только Web-браузер. Таким образом, доступ к глобальному серверу осуществляется с любого клиентского компьютера, подключенного к Интернет.

Поскольку контроллеры имеют непосредственный выход в Интернет, отпадает необходимость в наличии компьютеров (рабочих станций) на каждом объекте. Особенно это актуально при управлении удаленными объектами без участия оператора на объекте.

Идеология построения MC8 позволяет использовать контроллер в качестве автономного контроллера или объединять контроллеры в локальные сети с помощью каналов связи, в том числе сети Интернет. Связь между контроллерами и дру-

гими модулями осуществляется по интерфейсу RS-485. Связь с модулем расширения ME4 или другим контроллером MC8 осуществляется через интерфейс RS-232C (на базовом модуле).

В состав программного обеспечения контроллеров входят: ОС, обеспечивающая связь с другими контроллерами внутри сети, между контроллерами и оборудованием (датчики, исполнительные органы и т. д.), между мастер-контроллером и верхним уровнем. Кроме того, ОС выполняет функцию самодиагностики. В состав программного обеспечения также входят: программа для наладки, мониторинга и управления контроллерами типа КОНСОЛЬ, инструментальная система программирования алгоритмов КОНГРАФ (имеет встроенный симулятор), система локальной диспетчеризации КОНТАР-АРМ (создание мнемосхем, графиков), КОНТАР-SCADA, OPC- сервер для связи с другими SCADA.

Контроллеры выпускаются в исполнениях, отличающихся друг от друга характеристиками базового модуля и составом дополнительных узлов, объединенных в едином корпусе, а также типом клеммников.

Контроллер MC-8 имеет встроенные каналы дискретного ввода (4 DI, СК), дискретные выходы (8 DO, ОК для MC-8.1 или «сухой» симисторный ключ для MC-8.2), аналоговые входы (8 AI, 0.. .2500 мВ, 0/4.. .20 мА, термометры сопротивления, термопары), аналогового вывода (2 АО, 0/4...20 мА, 0...5 мА, 0...10 В).

При необходимости подключения к контроллеру персонального компьютера применяется исполнение контроллера с одним из встроенных субмодулей:

77) интерфейсный субмодуль RS-232C — используется для подключения к компьютеру с целью контроля работы, настройки параметров и загрузки функциональных алгоритмов;

78) интерфейсный субмодуль WebLinker EM — универсальный коммуникационный модуль, содержащий интерфейсы Ethernet и RS-232C. Используется для передачи информации в локальных и глобальных сетях по протоколам TCP/IP и UDP/IP; модуль имеет функции защиты данных: шифрование и ограничение доступа (Firewall), а также выполняет все функции интерфейсного субмодуля RS-232C.

79) интерфейсный субмодуль WebLinker USB — аналог WebLinker EM, но вместо интерфейса RS-232C используется интерфейс USB.

- интерфейсный субмодуль WebLinker Modern — коммуникационный модуль, содержащий интерфейс RS-232C; используется для подключения GPRS/CDMA модема, обеспечивающего выход в Интернет, а также выполняет все функции интерфейсного субмодуля RS-232C.

Для индикации и управления используется пульт управления MD8.1. Пульт позволяет выводить на дисплей значения параметров, производить их настройку, наблюдать по светодиодам за состоянием дискретных выходов контроллера. Выполняет все функции интерфейсного субмодуля RS-232C (содержит встроенный интерфейс RS-232C).

Питание контроллера: 220 **VAC** или 24 **VDC**, потребляемая мощность 6 ВА. Габаритные размеры — 157x86x58.5мм (с винтовыми клеммниками) и 157x114x58,5мм (с разъемно-винтовыми клеммниками). Монтаж — на DIN-рейку по стандарту DIN EN 50 022 (шириной 35мм). Степень защиты контроллера — IP20.

Контроллер MC5, входящий в комплекс КОНТАР, отличается от MC8 количеством встроенных каналов аналогового ввода: в MC5 их 5, аналоговых выходов — 1, дискретных выходов — 5. Число дискретных входов, как у MC8 — 4. Число симисторных выходов для MC5.1xx — 2. Характеристики каналов ввода/вывода аналогичны MC8. Кроме того, объем постоянной памяти (для загрузки алгоритмов) 9,5 кбайт (у MC8 — 60 кбайт). Основной интерфейс (на базовом модуле) — RS-485, дополнительный — RS-232 (Ethernet отсутствует). В исполнении MC5.101 имеется субмодуль RS-232C (интерфейс RS-232), а в исполнении MC5.111 прилагается пульт MD8.1 со встроенным интерфейсом RS-232 и часами-календарем.

Питание контроллера 220 **VAC** (для MC5.1), 24 **VDC** (для MC5.2), потребляемая мощность 6 ВА. Габаритные размеры 157x86x58,5. Монтаж контроллера на DIN рейку, степень защиты — IP20.

Контроллеры MC5 предназначены для автоматизации небольших объектов, например, тепловых объектов, приточных установок и т. п.

Модуль релейный MR8 (рис. 2.108) входит в состав комплекса КОНТАР и содержит реле и силовые ключи (симисторы).

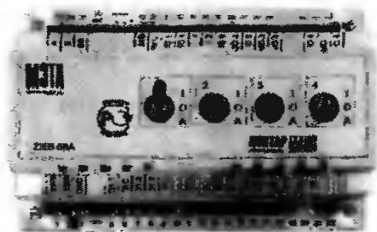


Рис. 2.108



Рис. 2.109



Рис. 2.110

Модули предназначены для применения в автоматизированных системах управления технологическими процессами, а также в системах сбора и передачи информации по интерфейсной сети RS-485. Модуль реализует различные алгоритмы управления с дискретными выходными сигналами, в том числе управление

электрическими исполнительными механизмами, пусковыми устройствами насосов, вентиляторов и другого оборудования, переключение режимов управления и ручное управление электрическими исполнительным механизмами и пусковыми устройствами с помощью механических переключателей (тумблеров).

Модуль MR8 выпускается в различных исполнениях, отличающихся наличием или отсутствием блока ручного управления, типом и количеством выходных силовых элементов, а также типом клеммников. Для примера, исполнение модуля MR8.1221 имеет 4 выходных ключа на электромагнитных реле, с панелью ручного управления выходными ключами.

Встроенное число каналов ввода/вывода базовой модели: дискретные входы — 8, дискретные входы управления (непосредственное управление выходными ключами) — 4, дискретные выходы — 4 (на электромагнитных реле для MR8 1121/1221), — 4 (2 — симисторные ключи и 2 — электромагнитные реле для MR8 1131/1141/1231/1241), 4 (симисторные ключи для MR8 1151/1161/1251/1261).

Напряжение питания модуля — 220 **VAC**, потребляемая мощность — 6 ВА, монтаж — на DIN-рейку. Степень защиты модуля — IP20. Габаритные размеры 139x89x63 мм.

Модуль релейный MR4 (рис. 2.109) входит в состав комплекса КОНТАР. Основное назначение модуля: фазоимпульсное управление активной нагрузкой, например, нагревателями или осветительными приборами, а также управление внешними симисторами или тиристорами. Модуль может быть использован в двух основных режимах:

80) Управление выходной мощностью в соответствии с предварительно запрограммированным алгоритмом; воздействие на алгоритм осуществляется через дискретные входы прибора.

81) Управление выходной мощностью в соответствии с сигналами, передаваемыми по интерфейсному каналу RS-485.

Основные функции модуля MR4: управление электрической мощностью активной нагрузки в режиме фазоимпульсной модуляции; выполнение алгоритмов функционирования, необходимых для управления конкретным технологическим процессом; использование информации о состоянии входных дискретных сигналов модуля для работы функционального алгоритма и передачи по каналу RS-485 на верхний уровень управления; обмен информацией с контроллерами в сети по интерфейсу RS-485; прием дискретных сигналов от контроллеров MC8 или других

устройств для непосредственного (прямого) управления выходными силовыми ключами.

Пульт управления выносной MD8.3 (рис..2.110) входит в состав комплекса КОНТАР и предназначен для работы в комплекте с контроллерами MC8 и MC5, имеющими дополнительный интерфейс RS-232C. Пульт управления предназначен для: вывода на дисплей информации о входных/выходных сигналах и параметрах функционального алгоритма контроллера; вывода на светодиодные индикаторы информации о состоянии и режимах работы дискретных выходов контроллера; настройки параметров функционального алгоритма контроллера; переключения режимов управления автомат/ручное и ручного управления выходами контроллера; поддержки индикации текущего времени и календарной даты с помощью энергонезависимых часов/календаря (в том числе при работе с контроллерами MC5). Тип дисплея — ЖК-дисплей с подсветкой. Количество символов — 2 строки по 16 символов. Число двухцветных светодиодных индикаторов — 8, количество клавиш — 4.

2.3.5 Контроллеры ФГУП «ЭЗАН».

Программируемые логические контроллеры серии «Сонет» (рис. 2.111) производства ФГУП «Экспериментальный завод научного приборостроения с СКВ» относятся к модульным контроллерам. Контроллеры СОНЕТ являются проектно комплектуемыми изделиями и в зависимости от компоновки способны выполнять функции управляющих контроллеров, контроллеров удаленного ввода/вывода или удаленных программируемых контроллеров и могут использоваться как автономно, так и в составе распределенных систем управления. Контроллер состоит из крейта на 5 или 8 модулей ввода/вывода, процессорного модуля, блока питания и модулей ввода/вывода. К дополнительному оборудованию относятся блок переключения резерва БПР-1, фильтр

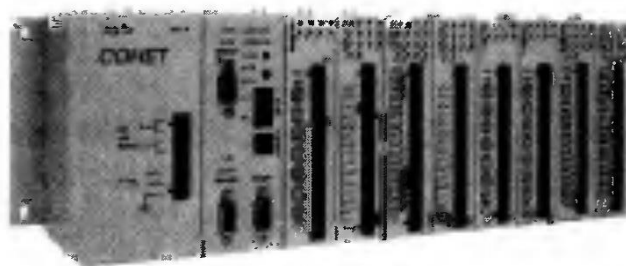


Рис. 2.111

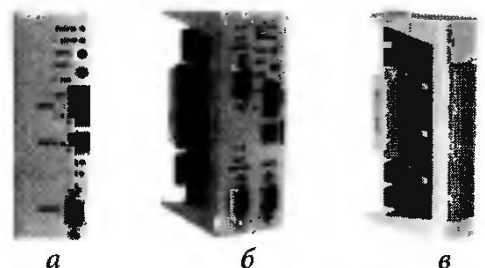


Рис. 2.112

электропитания ФП-220-1 и интерфейсные модули МИ-АВВ-8, МИ-АВВ-4, МИ-АВ-4. В зависимости от числа модулей (5 или 8) число каналов дискретного ввода/вывода

от 80 до 128, аналогового ввода — от 40 до 64, аналогового вывода — от 20 до 32 соответственно. Процессорный модуль контроллера построен на базе микроконтроллера ATmega 128-16 с тактовой частотой 16 МГц. Объем ОЗУ — 36 Кб, ПЗУ — 128 Кб, флэш-память — 1 Мб. Число встроенных интерфейсов: 1хRS-232, 2хRS-485 (Modbus RTU). Характеристики процессорных модулей приведены в табл. 2.35

Таблица 2.35. Характеристики процессорных модулей ПЛК «Сонет»

Тип модуля	Тип МП	Объем памяти	Интерфейсы	Назначение
СН-МП-1	ATmega 64	–	1хRS-485	Удаленный ввод/вывод на базе протокола Modbus
СН-МП-1-3-Р	ATmega 128	–	2хRS-485	Удаленный ввод/вывод на базе протокола Modbus, поддержка горячего резервирования
СН-МП-РС104-2	NS Geode GX1, 300 МГц	ОЗУ—64 Мбайт, ПЗУ—128 Мбайт	2хRS-485, 2хEthernet	ПК x86 с контроллерами VGA, Ethernet и Modbus. поддержка горячего резервирования
СН-МП-ПЛК-3	ATmega 128	ОЗУ—36 кбайт, флэш —2 Мбайт	RS-232, 2хRS-485	Процессорный модуль ПЛК «Сонет», программирование в стандарте IEC 61131-3

На рис. 2.112 представлены процессорные модули СН-МП-1 (**а**) и СН-МП-1-3-Р (**б**). Широкая номенклатура модулей ввода/вывода (СН-АВ-хх, СН-АВВ-хх, СН-ДВ-хх и СН-ДВВ-хх) предусматривает аналоговый ввод по 4, 6 или 8 каналам сигналов 0/4...20 мА, 0...5 мА, 0...10В, 0...100 мВ, сигналов термодатчиков и терморезисторов. Модули аналогового вывода — 4-канальные, дискретного ввода/вывода — 8- и 16-канальные на 220 **VAC** и 24 **VDC**. На рис. 2.114, **в** показан общий вид модуля СН-АВВ-4 для входного тока 0...5 мА.

Для работы в составе сети Modbus был разработан контроллер СОНЕТ-МАСТЕР. Открытая архитектура РС/104 контроллера и стандартная периферия позволяют использовать управляющее ядро любой системы, реализованной на платформе Intel x86.

Для программирования контроллеров «Сонет» применяется программное обеспечение PLC Designer, соответствующее стандарту МЭК 61131-3. Для разработки прикладных программ на языках SFC, FBD, LD и IL используется эмулятор контроллера, позволяющий выполнять отладку программы без аппаратных средств.

Для построения многоканальных, высокопроизводительных программируемых контроллеров ЭЗАН производит модули ввода/вывода в стандартах VME и CompactPCI формата 3U и 6U, а также платы-мезонины, устанавливаемые на модули-носители VME 98100 и CompactPCI 4100.

2.3.6 Контроллеры ЗАО «ЭМИКОН»

ЗАО «Эмикон» производит модульные контроллеры ЭК-2000 и DCS-2001, а также широкую номенклатуру модулей серии ЭК-2000 и DCS-2000 для распределенных систем управления.

Контроллер ЭК-2000 (рис. 2.113) представляет каркасно-модульную систему и предназначен для использования в системах управления, где предъявляются повышенные требования к надежности, защите систем управления от воздействия пыли, брызг, агрессивных сред, к работоспособности в широком диапазоне температур и воздействию вибраций. Конструктивно контроллеры серии ЭК-2000 состоят из блока вычислительного и блока кроссового. В состав вычислительного блока входят каркас с объединительным модулем, центральный модуль, модули связи с объектом (МСО) и модуль питания. Внутри модуля может быть установлен барьер искрозащиты.

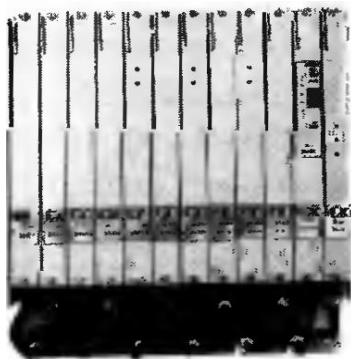


Рис. 2.113

В состав кроссового блока входят панели монтажные и блок питания. Варианты исполнения контроллера: бескорпусной, однокорпусной и двухкорпусной. В бескорпусном исполнении пользователю поставляется перечисленный состав блоков, которые размещаются в шкафах пользователя, либо непосредственно в корпусах технологического оборудования. Двухкорпусное исполнение необходимо использовать в тех случаях, когда контроллеры непосредственно устанавливаются в производственных помещениях, где возможно воздействие пыли или влаги, как при эксплуатации, так и при проведении ремонтных или профилактических работ. В помещениях с обычными условиями эксплуатации целесообразно использовать более дешевый однокорпусной вариант исполнения.

В качестве средства отображения в контроллерах применяются панели оператора серии UniOP. Панель оператора может быть установлена непосредственно в кожух блока вычислительного (при автономной установке контроллера), на двери электрошкафа или в пульте управления пользователя (в случае встраивания контроллера в пользовательское оборудование). Панель оператора может поставляться в

виде переносного терминала. Максимальное расстояние от панели до контроллера — 1200 м.

Необходимое количество каналов ввода/вывода может быть реализовано при подключении контроллеров в локальную сеть. Максимальное количество узлов в сети — 256. При использовании последовательного интерфейса, расположенного на центральном модуле, или сетевых модулей C-02A и C-05A скорость передачи информации — до 2,5 Мбит/с. Физический уровень локальной сети — RS-485. Канальный уровень — Modbus или SDLC.

К числу модулей контроллера относятся процессорные модули CPU-03A, CPU-03B и CPU-20A, сетевые модули C-02A, C-20A, интерфейсные модули C1M-485I (связь по интерфейсу RS-485) и C1M-232NI (связь по интерфейсу RS-232). Модули аналогового ввода/вывода (AI-03A, AI-04A, AI-20, AO-01 A, AO-03 и др.) используют 12-разрядные АЦП и ЦАП и служат для преобразования однополярных и двуполярных сигналов, а также сигналов термодпар и терморезисторов, в цифровой код и преобразования 12-разрядного кода в токовые сигналы 0..5 и 0/4..20 мА. В модулях дискретного ввода/вывода (DI-01 A, DI-03A, DI-04A, DI-07-Ex, DO-01 A, DO-03A, DO-04A, DIO-04A и др.) питание осуществляется от внешнего или внутреннего источника.

В качестве ОС используется ОС PB ОС-188. Язык программирования — CONT со средой программирования в ОС Windows CONT-Designer, включающей текстовый редактор, транслятор и отладчик.

Контроллер DCS-2001 (рис. 2.114) является малоканальным модульным контроллером. В состав контроллера входят модуль центрального процессора CPU-12A, модули ввода аналоговых сигналов AI-14 (токовые сигналы) и АН 5 (сигналы терморезисторов), модуль вывода аналоговых сигналов A012 (2 канала, 0...20 мА), модуль ввода дискретных сигналов DI-12 (12 каналов, СК), модуль ввода/вывода дискретных сигналов DIO-12 (8 DI, 4 DO, СК). Все модули контроллера выполнены в виде многослойных печатных плат размером 77х85 мм, установленных в пластмассовых корпусах для крепления на стандартный DIN-рельс. Контроллер допускает установку помимо процессорного модуля до 4-х модулей связи с объектом (УСО). В отличие от семейства DCS-2000 модули УСО серии DCS-2001 не имеют собственного процессора и последовательного интерфейса и работают исключительно под управлением модуля CPU-12A. Обмен данными между CPU-12A и любым из 4 модулей УСО осуществляется посредством параллельного интерфейса, включающего в себя сигналы мультиплексированной 4-разрядной шины адреса и

шины данных, сигналов управления, а также линий питания 5/24 **VDC**. Модули соединяются посредством плоских кабелей и конструктивно объединяются в единый наборный пластмассовый корпус, предназначенный для установки на стандартный DIN-рельс.



Рис. 2.114



Рис. 2.115

Питание контроллера осуществляется от источника питания 24 **VDC**. Контроллер эксплуатируется в диапазоне температур -25...+60°C.

Семейство модулей ввода/вывода DCS-2000 (рис. 2.115) предназначено для использования в распределенных системах управления. Все модули ввода аналоговых и дискретных сигналов имеют входные цепи искрозащищенного исполнения ExibIIС и встроенные блоки питания первичных приборов, что позволяет подключать датчики, находящиеся во взрывоопасных зонах, непосредственно к модулям.

В состав модулей входят: модули центрального процессора CPU15 и CPU-17B (2xRS-232, 4xRS-485); модули ввода/вывода аналоговых сигналов AI-10 (4 канала для подключения термопар ТХК и ТХК, 1 канал для подключения терморезисторов), AI-11 (4 канала для подключения терморезисторов), AI-12 (4 канала сигналов тока или напряжения), AO-11 (2 канала 0...20 мА или 0...10 В); модули ввода/вывода дискретных сигналов Dili (8DI, CK), DO-11 (8DO, MOSFEToutput), DIO-II (4 DI, CK и 4 DO).

Для контроллеров ЭК-2000, DCS-2001 и системы распределенного ввода/вывода DCS-2000 помимо вышеперечисленных модулей предназначены следующие модули общего применения и блоки: модуль контроля фаз ACC-01A, блоки грозозащиты BZ-11 и BZ-12, модуль повторителя интерфейса RS-485 (3xRS-485), модули конверторов IR-04A (преобразование 220 **VAC** в DO, ОК), IR-04D (преобразование 24 **VDC** в DO, ОК), OR-04A (4 канала, преобразование 24 **VDC** в DO, CK), OR-06 (6 каналов, преобразование 24 **VDC** в DO, CK), модули питания с выходным напряжением 24 **VDC** типа PU-12/13/14/15 и выходным напряжением 5,7.. 6,3 В

(PU-17A) и 11,4... 12,6 В (PU-17 В); блок бесперебойного питания UPS-10 и блоки сетевого питания SU-6, SU-8 и SU-10 (220 **VACUA VDC**).

Конструкция модулей серии DCS-2000 предусматривает их установку на стандартную DIN-рейку. На эту же рейку устанавливаются клеммники для подключения внешних кабелей. Поскольку клеммники размещаются в непосредственной близости от модулей микропроцессорной системы, это существенно упрощает наладку и обслуживание системы.

Блоки одной подсистемы связаны по локальной сети и обмениваются данными по запросу ведущего устройства, поэтому они могут располагаться как в одном электрошкафу, так и в разных электрошкафах, в том числе в разных помещениях. Все модули имеют два независимых канала для обмена по сети RS-485.

Рабочий температурный диапазон модулей: -20...+70°C. Питание модулей осуществляется от блоков стабилизированного напряжения 24 VDC.

В табл. 2.36 приведены технические характеристики некоторых отечественных контроллеров.

Таблица 2.36. Технические характеристики отечественных контроллеров

Тип ПЛК, производитель	ПРЦ/Объем памяти	Кол-во AI	Кол-во AO	Кол-во DI	Кол-во DO	Интерфейс	ПО
ОВЕН ПЛК 100 Компания «ОВЕН»	RISC-200 МГц/ 360 байт или неограничен	—	—	8	6 СК/ 12 ОК	2xRS-232, RS-485, Ethernet 10/100 BaseT	Среда про- граммирова- ния CoDeSys 2.3
ОВЕН ПЛК 150 Компания «ОВЕН»		4	2 (4...20 мА/ 0...10 В)	6	4 СК	RS-232, RS-485, Ethernet 10/100 BaseT	
Decont-182, Компания «ДЭП»	Zilog 80182-30 МГц/ОЗУ 1Мбайт, флэш-ПЗУ 1 Мбайт	6 универсальных каналов ввода/вывода (AI, DI, DO); устанавливаются в гнезда «С» и «D»				RS-232, 2xRS-485, 2xИРПС	DeSystem, DeModule, WinDecont, WDeveloper
μC-1010, «НЕВА- БИЗНЕС»	80C188EB/ память данных 64 кбайт	8	4 (4...20 мА)	10 (СК)	10 (ОК)	RS-485, Ethernet	C/C++
Микроконт-Р2/ 33, НПО «Си- стемотехника»	DS80C320-20 МГц/ i586; 16 кбайт/64 Мбайт	Модули ввода/вывода: AI (4...20), AO (2), DI (16, 32), DO (16, 32)				RS-485, RS-232/ RS-485, Ethernet	Монитор RTM320, ТУРБО-ПКС
МикКОН, ЗАО «ИНКОМ- МЕТ»	I386SX-40 МГц/ i486-300 МГц; ОЗУ: 4...128 Мбайт, флэш-ПЗУ: 32 Мбайт	Модули и мезонины ввода/вывода: AI (4...32), AO (2,8, с мезонином — 16), DI (8,16, 32, с мезонином — 64, 64, с мезонином — 128), DO (16, с мезони- ном — 32, 32, с мезонином — 64)				RS-232, RS-485, ИРПС	МикСИС
ЭЛСИ-ТМ, ЗАО «ЭлеСи»	Pentium-100/300, ОЗУ-32 Мбайт, флэш ПЗУ-16/64 Мбайт	4, 24 канала в модуле	—	4 (встрое- ны); 32 (в модуле)	16, 32 (в модуле)	Ethernet 10BaseT	OpenPCS по МЭК 61131-3
ЭЛСИ-2000, ЗАО «ЭлеСи»	C167CR/ ОЗУ-512 кбайт, флэш- ПЗУ-512 кбайт	До 8 модулей ввода/вывода: AI (8), AO (4), DI (8), DO (8)				RS-232, RS-485, CAN	

2.4. Встраиваемые системы

Встраиваемые системы в целом и встраиваемые контроллеры в частности выделены в отдельный класс ввиду ряда отличий и специфических свойств этих систем.

Под встраиваемыми системами понимают класс компонентов программно-аппаратных средств, встраиваемых (устанавливаемых) в какое-либо оборудование (станок, пресс, компьютер и пр.), и выполняющих строго определенные функции. В этом смысле встраиваемая система выступает как часть целого и не может рассматриваться в виде самостоятельного элемента.

Достоинствами встраиваемых систем являются компактность, функциональность, относительно низкая стоимость, хорошие эксплуатационные характеристики и ряд других. К встраиваемым (embedded) системам относятся одноплатные компьютеры

Embedded Computing Platform), контроллеры (Embedded PLC), модули ввода/ вывода, процессорные, коммуникационные и мезонинные модули, платы памяти, встраиваемые Интернет-устройства, встраиваемое программное обеспечение (операционные системы PB, -QNX, VxWorks, OS-9, Linux RT, RTX, Windows XP Embedded, Windows CE и др.), встраиваемые системы программирования (ISaGRAF, CoDeSys и др.), системы визуализации (SCADA-системы TraceMode, MasterSCADA) и др.

Каждая из вышеперечисленных встраиваемых систем имеет свои особенности. Так, встраиваемые одноплатные компьютеры базируются на системных шинах VME, PCI, CompactPCI, PC/104, PMC. Встраиваемые операционные системы устанавливаются на CompactFlash. Хотя встраиваемые аппаратные системы представляют собой, как правило, бескорпусные компоненты, для защиты которых используется корпус самого оборудования, для тяжелых условий эксплуатации появились «встраиваемые системы в корпусе». Примером может служить, например, встраиваемый промышленный компьютер BOXER компании AAEON (Тайвань), работающий в широком диапазоне температур и влажности. Ниже рассматриваются встраиваемые программируемые логические контроллеры.

2.4.1 Контроллеры в стандарте PC/104 ШС0486/ HiCOSH4/ HiCOGEODE фирмы Hitex Automation, Германия

Контроллеры HiCO по своим техническим параметрам полностью соответствуют стандарту PC/104 и обладают хорошими эксплуатационными характеристиками, высокой производительностью и малыми габаритами. Поддерживается аварийное батарейное питание для SRAM.

Встраиваемый контроллер HiC0486 (рис. 2.118) имеет следующие характеристики:

- 82) процессор: AMD Elan SC410- 66/100 МГц;
- 83) ОС — Windows CE или DOS;
. ОЗУ DRAM —4...32 Мбайт;
- 84) флэш-ПЗУ — 16... 144 Мбайт;
- 85) коммуникационные порты: LPT1, COM1, COM2, COM3, IRDA;
- 86) габариты 96x90x16 мм (формат PC/104);
- 87) потребляемая мощность: 3 Вт;
- 88) диапазон температур:-10...+70°C.

Встраиваемый PC с процессором Hitachi SuperH 8H4-167МГц (рис. 2.117) имеет следующие характеристики: ОС — RTOS, системная шина — ISA, ОЗУ — 16

Мбайт, Флэш ПЗУ — 8 Мбайт, интерфейсы Ethernet, USB, порт PS/2 для клавиатуры и мыши. Расширение возможностей процессорного модуля достигается с помощью дополнительных плат HiCO-SH4-base с интерфейсом PC/104, разъемами для Compact-Флэш и LCD. Дополнительно контроллеры HiC0486 и HiCOSH4 могут комплектоваться

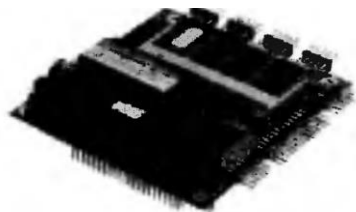


Рис. 2.118



Рис. 2.119

адаптером для подключения ЖК-дисплея, Флэш-дисками от 2 Мбайт до 144 Мбайт и компактной флэш-картой емкостью от 4 до 48 Мбайт.

Встраиваемый контроллер HiCOGEODE с 64-разрядным процессором фирмы National Geode CPU 6x86-200 МГц имеет следующие характеристики: SDRAM от 32 до 128 Мбайт, Compact-Флэш до 96 Мбайт, коммуникационные порты Ethernet 10/100 BaseT, 2xUSB, 1xLPT, 2xCOM.

Для расширения возможностей контроллеров HiCO фирма производит следующие периферийные модули:

- 89) HiCO-PCMCIA для подключения карт памяти, сетевых, модемных карт PCMCIA;
- 90) HiCOCAN-104 с CAN-шиной и интерфейсом PC/104 (процессор MC68332-20 МГц, SRAM 128 кбайт, Флэш-память 512 кбайт);
- 91) HiCOCAN-ISA с CAN-шиной и интерфейсом ISA;
- 92) HiCOCAN-PCI с CAN-шиной и интерфейсом PCI;
- 93) HiCO-DIO- модуль цифрового ввода/вывода (16 DI, 8 DO, диапазон напряжений 10-30 **VDC**, выход «ОК», нагрузочная способность до 1,5 А на канал).

Среди встраиваемых PC-совместимых систем на отечественном рынке заметное место занимает продукция фирм **Octagon Systems** (США), **Advantech** (Тайвань) и **Fastwel Inc.** (Россия) в формате MicroPC и PC/104. Форматы MicroPC и PC/104 являются одними из наиболее устойчивых форматов для жестких условий эксплуатации (температура -40...+85 °С, вибрации до 5 g и удары до 20 g и более).

К этим изделиям относятся встраиваемые одноплатные промышленные компьютеры с расширенным температурным диапазоном (-40...+70°С), контроллеры, процессорные модули и модули ввода/вывода, монтажные каркасы и источники пи-

тания. Высокая надежность модулей формата MicroPC объясняется рядом факторов, а именно: небольшие габариты плат (114,3x124,5 мм) с шиной ISA имеют 4-точечное крепление, исключающее перемещение и воздействие вибрации или ударов. Благодаря 100%-му применению в изделиях элементной базы по технологии КМОП энергопотребление снижено до уровня, при котором не требуется какое-либо охлаждение плат, могущих работать в герметичных корпусах. Напряжение питания всех плат — одного номинала, а именно 5 VDC. Удобство эксплуатации обеспечивается тем, что в системное ПЗУ процессорного модуля помещена автоматически загружаемая операционная система ROM-DOS, совместимая с MS-DOS 6.22, и базовая система ввода/вывода BIOS. Однако, возможно использование любого другого программного обеспечения и средств разработки, совместимых с технологией PC (например, Windows 95/98/NT, QNX, Linux и др.). Далее рассматриваются встраиваемые компьютеры фирмы **Advantech** (Тайвань), встраиваемые микроконтроллеры фирмы **Octagon Systems** (США), встраиваемые процессорные платы и промышленные компьютеры фирмы **Fastwel Inc.** (Россия), широко используемые в промышленности.

Встраиваемые микроконтроллеры фирмы **Advantech**, Тайвань

Компания **Advantech** выпускает встраиваемые промышленные компьютеры серии ARK (ПРЦ Intel Celeron M — 1,4 ГГц, ОЗУ DDR до 1 Гбайт, порты RS-232/422/485, Ethernet 10/100BaseT, ОС — Windows 2000/XP/XP Embedded), UNO (ПРЦ Celeron 400/600 МГц; ОЗУ — 64/128 Мбайт, порты RS-232/422/485, Ethernet 10/100BaseT, ОС — предустановленная Windows XP Embedded или Windows CE). Некоторые модели компьютеров серий ARK и UNO имеют слоты расширения PCI (ARK-7480, UNO-3062 и UNO-3072) и встроенные каналы дискретного ввода/вывода (UNO-3072 и UNO-2050). Также компания **Advantech** производит встраиваемые процессорные модули в форматах PC/104+ (PCM-3353/3370) и PC/104 (PCM-3341/3375/3380). Отдельную группу продукции **Advantech** занимают одноплатные встраиваемые компьютеры формата 3,5" (серия Biscuit PC 3,5") с размером стандартного НЖМД IBM PC и формата 5,25" и EBX (серия Biscuit PC 5,25") с размером стандартного НГМД IBM PC. Дальнейшее сокращение размеров модулей встраиваемых систем привело к появлению серии вычислительных платформ SOM (System On Module — система на модуле). Каждый модуль SOM является высокоинтегрированным одноплатным компьютером, устанавливаемым на базовой плате. Основные модификации модулей SOM: SOM-144 с процессором AMD Geode Castle и SOM-ETX с процессором Pentium. Модули SOM-144 (68x100 мм) поддерживают

Windows CE и поставляются с предустановленными ПРЦ и ОЗУ Модули SOM-ETX (размер 144x100 мм) поддерживают Windows CE и поставляются с предустановленным ПРЦ (ОЗУ устанавливается дополнительно).

Встраиваемые микроконтроллеры фирмы *Octagon Systems*, США

Фирма **Octagon System** производит микроконтроллеры серии 6000, процессорные платы формата PC/104 (50xx и 6225, 2133, 2050 и 2060), платы стандарта EPIC (PC- 510/600/680/770).

К достоинствам микроконтроллеров серии 6000 относятся IBM PC-совместимая архитектура, реализованная на базе процессора i80386SX-25MHz, а также AT-совместимой BIOS с промышленными расширениями. Контроллер способен функционировать как автономно, так и совместно с модулями ввода/вывода, объединенными 8-ми разрядной магистралью ISA. Микроконтроллеры серии 6000 могут устанавливаться в конструктивы **Octagon**, а также в пассивные объединительные платы с шиной ISA. В стандартном исполнении микроконтроллеры имеют встроенную ОС DOS 6.22, однако пользователю предоставляется возможность установки во флэш-ПЗУ любой операционной системы (Windows CE, Windows XP Embedded, Linux и др.).

Контроллеры серии 6000 поддерживают интерфейсы RS-232, RS-485, LPT-1, PC/104. Скорость обмена по последовательным интерфейсам (COM1-COM4) составляет от 300 до 115,2 кбит/с.

Высокопроизводительные встраиваемые процессорные платы формата PC/104 типа 5066, 5070 и 5090 оснащены процессорами AMD 5x86 (133 МГц), ZF Micro 5x86 (128 МГц) и VIA Eden 400/733 МГц соответственно, имеют встроенные каналы ввода/ вывода, единое питание +5 В. Процессорные платы формата PC/104 моделей 2133, 2050 и 2060 отличаются объемом ОЗУ (до 32, 64 и 256 Мбайт), наличием разъема DiscOnChip или СотрайФлэш для увеличения объема ПЗУ

Модели PC-510/600/680/770 имеют объем ОЗУ от 48 до 512 Мбайт, до 4 портов RS-232, RS-422/485, число каналов дискретного ввода/вывода от 24 до 64, размеры плат 146x203 мм.

Сравнительные характеристики микроконтроллеров серии 60x0 приведены в табл. 2.37.

Таблица 2.37. Сравнительные характеристики микроконтроллеров серии 60x0

Тип модуля	6010	6020	6030	6040	6050
Процессор	386SX				
Наличие последовательных портов COM1 и COM2	Да				
Наличие последовательных портов COM3 и COM4	—	—	Да	—	—
Возможность установки преобразователя RS-232/485 типа NIM	—	Да	Да	Да	Да
Параллельный порт LTP1	Да				
Порт EIDE НЖМД	Да	—	—	—	—
Шина расширения PC/104	Да	—	—	—	—
Объем ОЗУ, Мбайт	4	2			
Объем флэш-ПЗУ, Мбайт	1				
Объем статического ОЗУ, кбайт	128				
Объем динамического ОЗУ, Мбайт	2				
Число каналов дискретного ввода/вывода	17	48+17	17	24+17	24+17
Число каналов дискретного вывода	—	—	—	—	8
Число каналов аналогового ввода/вывода	—	—	—	8/2 (0...5 В, 0...10 В)	—
Напряжение питания, В	5VDC				
Потребляемый ток, мА	475	490	440	590	435
Диапазон рабочих температур	-40...+85°C				

Компания **FastweH Inc.** выпускает встраиваемые одноплатные компьютеры с поддержкой стандартов MicroPC и PC/104 типа CPC106 и с поддержкой 2 портов Gigabit Ethernet, портами расширения PC/104 и PC/104+ типа CPC1600/1700. В формате MicroPC компания **Fastwel** выпускает модуль микроконтроллера CPU188-5. Модуль предназначен для использования в системах сбора данных и управления. По своим функциональным возможностям аналогичен микроконтроллеру 6040 **Octagon Systems**.

Благодаря своей компактности, малому энергопотреблению и большой функциональности модуль CPU188-5 может использоваться для широкого диапазона встраиваемых приложений. Характеристики модуля CPU188-5: процессор Aml88ES-40 МГц, ОС, совместимая с MS-DOS 6.22; системная шина — ISA, статическое ОЗУ (SRAM) до 1024 кбайт, флэш-ПЗУ до 2048 кбайт. Модуль имеет 48 каналов дискретного ввода/вывода, 8 каналов аналогового ввода, 2 канала аналогового вывода, интерфейсы RS-232/422/485.

Модуль CPU188 5 выпускается в трех модификациях в зависимости от объема памяти, числа каналов ввода/вывода и др. (табл. 2.38).

К встраиваемым системам относятся также платы ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов. Эти платы, выпускаемые многими российскими предприятиями (ЗАО «Руднев-Шиляев», «Б-CARD» и др), рассчитаны на различные системные шины и интерфейсы (ISA, PCI, PC-104, Ethernet, USB). Вместе с платами предоставляется пакет программного обеспечения для настройки плат.

Таблица 2.38. Характеристики модулей CPU188-5

Тип модели	CPU188-5LC	CPU188-5BS	CPU188-5MX
SRAM	512 кбайт	1024 кбайт	
Флэш	1024 кбайт		
COM1	RS-232 (неизолированный)		
COM2	RS-232 (неизолированный); RS-422/485 (изолированный), скорость обмена 200/2500 кбит/с		
AI/AO	—	—	8/ 2 (изолированный) 0...5 В, 0...10 В, +/- 5 В
Габаритные размеры, мм	124,5×114,3		

Выбор платы на примере выбора платы АЦП осуществляется в следующей последовательности: выбор частоты дискретизации (кГц, МГц); выбор разрядности АЦП, числа каналов, диапазона входного сигнала (в вольтах); наличие на плате ЦАП и его разрядность, число каналов ввода/вывода; коэффициент усиления и необходимый интерфейс платы.

2.5. Компоненты ПЛК

К компонентам ПЛК относятся процессорные модули, модули ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов, сетевые коммуникационные модули и модули специального назначения [2.10-2.12].

Модульные ПЛК конфигурируются на базе шасси или корзины. Отличие шасси от корзины состоит в конструктиве и методе крепления модулей. Шасси представляют собой плоскую панель, крепящуюся в шкафу управления или на щите с защелками для модулей и разъемами, через которые осуществляется обмен информацией между модулями. Число модулей, устанавливаемых на шасси: 4, 6, 8 или 12. С внутренней стороны шасси содержит шину обмена данными между модулями ПЛК. Корзина отличается от шасси наличием боковых стенок и перегородок между модулями. Некоторые ПЛК не имеют корзины или шасси и конфигурируются соединением модулей между собой при помощи разъемов и защелок на боковых поверхностях.

Модуль центрального процессора (CPU) является основной интеллектуальной составляющей ПЛК, обеспечивающей обработку и хранение информации.

Обычно CPU совмещены с модулем источника питания, служащим для преобразования сетевого напряжения переменного тока в ряд напряжений, служащих для питания модуля центрального процессора и модулей ввода/вывода. Выбор источника питания определяется совокупной потребляемой мощностью подключенных к ПЛК модулей ввода/вывода. Кроме того, модуль источника питания содержит литиевую батарею, обеспечивающую питание оперативной памяти ПЛК, в которой хранится рабочая программа и текущие данные, сохраняемые при отключении сетевого питания.

Модули ввода/вывода аналоговых и дискретных сигналов представляют собой устройства связи с объектом (УСО) и служат для приема, аналого-цифрового и дискретно-цифрового преобразования входных сигналов, а также для формирования выходных сигналов с помощью цифро-аналоговых и цифро-дискретных преобразователей. Помимо этого, модули или платы УСО могут представлять собой отдельные устройства сбора и обработки сигналов, а также формирования управляющих воздействий по заданному алгоритму на базе установленного на плате сопроцессора, разгружая тем самым основной процессор. Такие УСО, находящие широкое применение при создании распределенных систем с удаленным вводом/выводом информации, являются интеллектуальными терминалами и могут быть как выносными, так и встраиваемыми. В выносном варианте связь с ПЛК осуществляется по каналам RS-232 или RS-422/RS-485.

Широкое применение находят встраиваемые платы УСО, устанавливаемые в ПК. При этом обеспечивается прямой доступ к памяти и выполнение требуемых функций линеаризации и масштабирования сигналов, компенсации температуры холодных спаев термопар, ввод сигналов высокого и низкого уровней, формирование алгоритмов управления и др. К основным требованиям, предъявляемым к УСО, относятся точность преобразования, физический уровень сигнала, постоянная времени, разрешающая способность, напряжение питания и др.

2.5.1 Процессорные модули ПЛК

Процессорный модуль контроллера определяет основное функциональное назначение и технические характеристики контроллера.

К основным техническим характеристикам процессорного модуля относят:

- 94) способ выполнения программы;
- 95) тип и тактовая частота микропроцессора;
- 96) объем памяти программ и памяти данных;
- 97) скорость выполнения логической операции (команды, инструкции);

- 98) встроенные функции (счетчики, ШИМ, ПИД-регулятор, позиционирование и др.);
- 99) число встроенных каналов аналогового и дискретного ввода/вывода;
- 100) энергонезависимые часы/календарь;
- 101) тип и число последовательных портов (RS-232, RS-422, RS-485, USB);
- 102) интерфейсы промышленных сетей (Ethernet, Profibus, CANbus и др.);
- 103) напряжение питания и габариты.

Для процессорных модулей PC-based контроллеров к числу основных характеристик дополнительно относятся:

- 104) тип шины расширения;
- 105) тип встроенной PC-совместимой ОС;
- 106) наличие и тип встроенной SCADA-системы;
- 107) возможность подключения гибких и жестких дисков, дисплея, клавиатуры и пр.;
- 108) возможность подключения жидкокристаллической или электролюминесцентной панели.

Процессорный модуль ПЛК выполняет следующие функции: обеспечение работы операционной системы реального времени (ОС РВ), организация коммуникаций между модулями внутри ПЛК, хранение и выполнение программы управления технологическим процессом, хранение информации, обусловленной программой управления, осуществление связи с ПК или программатором.

Операционная система реального времени (ОС РВ) предназначена для выполнения программ, записанных в контроллере, и обеспечения непрерывности процесса обработки данных, поступающих от модулей ввода/вывода, сетевых модулей и устройств.

Основные отличия процессорных модулей ПЛК различных производителей характеризуются производительностью процессора, объемом памяти программ и данных и максимальным числом обрабатываемых дискретных и аналоговых каналов.

В качестве базовых процессоров в процессорных модулях контроллеров широко применяются процессоры фирм Intel (i80C186EC, i80188, i80386EX(SX), i80486DX4, i80586, Pentium MMX и др.), Motorola (MC68302, MC68360 и др.), Zilog (80182), Hitachi, Atmel и др.

Для сбора и обработки данных используются вспомогательные процессоры (сопроцессоры) типа i80C188, i80C51(31), PIC16C73A и другие, а также RISC- со- процессоры. Более подробные данные о микропроцессорах этих и других типов приведены в работах [2.5,2.10-2.12].

В большинстве случаев выбор ПЛК зависит от информационной емкости технологического процесса, т. е. от количества дискретных и аналоговых сигналов, необходимых для контроля и управления. Чем больше информационная емкость процесса, тем мощнее требуется процессорный модуль.

При выборе процессорного модуля для контроллера руководствуются следующими соображениями:

109) оценивается информационная емкость процесса, определяется число дискретных и аналоговых сигналов, которые будут обрабатываться в ПЛК.

110) определяется объем требуемой памяти, который может потребоваться для решения поставленной задачи управления; объем памяти складывается из памяти для решения задач ПЛК (связь модулей, конфигурация и т. д.), памяти для обработки аналоговых и дискретных точек ввода/вывода, памяти для организации сетевого обмена.

111) Рассматривается необходимость решения задач управления, таких как ПИД-регулирование, адаптивного управления, алгоритмов нечеткой логики, нейросетевых алгоритмов управления и др.

Процессорные модули снабжены индикаторами, которые предназначены для отображения состояния процессорного модуля, состояния контроллера, режима работы модуля, ошибок ввода/вывода и программных ошибок.

В работе [2.9] приведены основные характеристики процессорных модулей.

2.5.2 Модули ввода/вывода дискретных сигналов

Дискретными входными сигналами в распределенных системах управления являются сигналы коммутации кнопок, конечных выключателей, контактов реле и пр., а в качестве дискретных выходных сигналов служат сигналы управления магнитными пускателями, реле, сигнальными лампами, исполнительными механизмами.

Устройства дискретного ввода/вывода представляют собой устройства преобразования двоичных сигналов логических уровней 1 и 0. Этим уровням соответствует напряжение на замкнутом или разомкнутом ключах. Величина напряжения может быть различной, но чаще используется напряжение 12,24, 36,48,125 или 250 В. Величина тока канала дискретного вывода обычно составляет 100 или 200 мА.

Основными характеристиками каналов дискретного ввода/вывода являются:

- 112) число каналов дискретного ввода/вывода, расположенных на плате или в модуле;
- 113) характеристика канала дискретного вывода: релейный («сухой контакт» — СК) или транзисторный вывод («открытый коллектор» — ОК);
- 114) уровень сигнала (TTL-совместимые или нет);
- 115) напряжение гальванической изоляции (500, 1500, 2500 В и др.);
- 116) напряжение канала дискретного ввода/вывода;
- 117) выходной ток канала дискретного вывода;
- 118) индикация состояния канала.

Широкий диапазон модулей дискретного ввода/вывода определяется напряжением питания (переменного или постоянного тока), полярностью сигнала (положительной или отрицательной), подключением через винтовые клеммные колодки или специальные соединители.

Модули ввода/вывода подразделяются на следующие типоразмеры:

- 119) модули стандартного формата смешанных входов/выходов (I/O): 28 I/O (161 + 120), 64 I/O (321 + 320);
- 120) входные и выходные модули стандартного формата: например, 32 входа или 32 выхода (в ряде ПЛК встречаются модули высокой плотности на 64 входа или выхода);
- 121) полуформатные (смешанные) модули ввода/вывода, которые имеют разное количество каналов, что позволяет лучше адаптировать аппаратную часть к задачам прикладной программы (например, 8 1/4 О или 32 1/16 О).

Дискретные входы могут быть сконфигурированы как:

- 122) нормальные дискретные входы (заданная по умолчанию конфигурация);
- 123) запирающиеся входы;
- 124) вызванные событием входы;
- 125) входы прямого, обратного или реверсивного счетчика;
- 126) вход Run/Stop;
- 127) управляющий вход для передачи данных из RAM во флэш-память.

На уровне входов используется текущий контроль напряжения датчика. Все входные модули обычно включают средства для текущего контроля напряжения датчика. Эти средства следят за тем, чтобы напряжение питания датчиков, подключенных к модулю, находилось на уровне, достаточном для нормальной работы входных каналов модуля. Если напряжение питания датчика ниже определенного

предела, об этом сигнализируется включением индикаторной лампы на модуле, бита ошибки канала или бита ошибки в слове состояния модуля.

На уровне выходов реализуются следующие функции:

- 128)** текущий контроль напряжения питания исполнительных устройств;
- 129)** защита от коротких замыканий и перегрузок. При возникновении подобной ситуации питание с соответствующего канала снимается, что индицируется рассмотренным выше способом;
- 130)** защита ошибки полярности сигнала;
- 131)** защита против скачков напряжения;
- 132)** защита контактов выходных реле;
- » реактивация выходов;
- 133)** переход на аварийный режим.

Схемы дискретного ввода и дискретного вывода типа «открытый коллектор» («ОК») и дискретного вывода типа «сухой контакт» («СК») компании **ICP DAS** представлены на рис. 2.118, **а, б** и 2.119 соответственно.

Платы ввода/вывода, встраиваемые в слоты материнской платы IBM PC, используют шины PCI, Compact PCI, PC/104, MicroPC, ISA и VME. Число каналов дискретного ввода/вывода на плате, как правило, составляет 8, 16, 32, 48 или 96. Помимо этого платы (модули) дискретного ввода/вывода имеют гальваническую изоляцию каналов с напряжением изоляции 500, 1000, 2500 или 3000 В постоянного тока, сторожевой таймер и счетчик/таймер. Диапазон рабочих температур модулей ввода/вывода составляет от 0... +70 °С до значений - 40... +85 °С. Среди других ха-

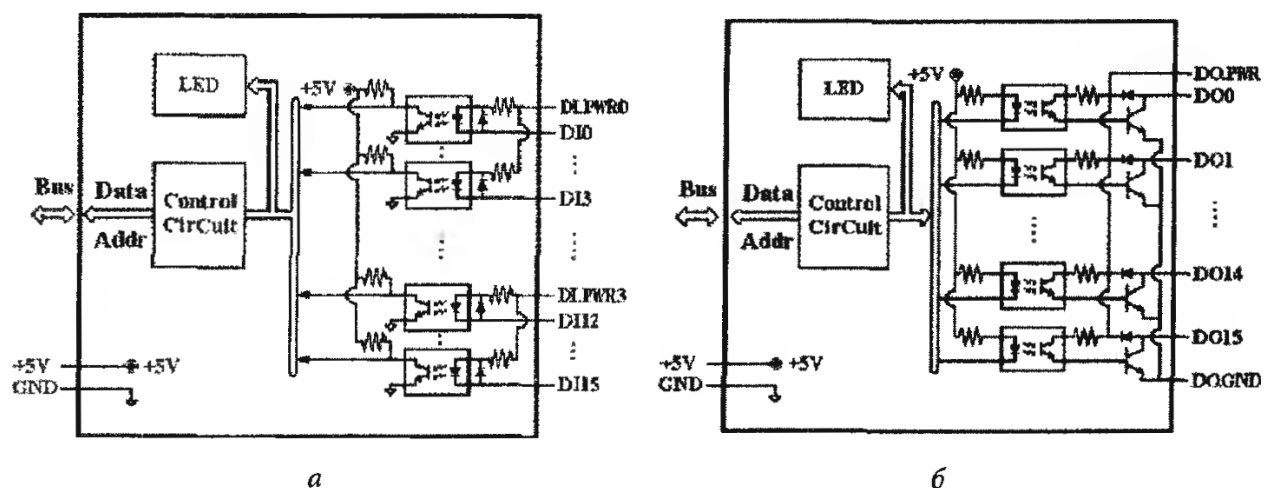
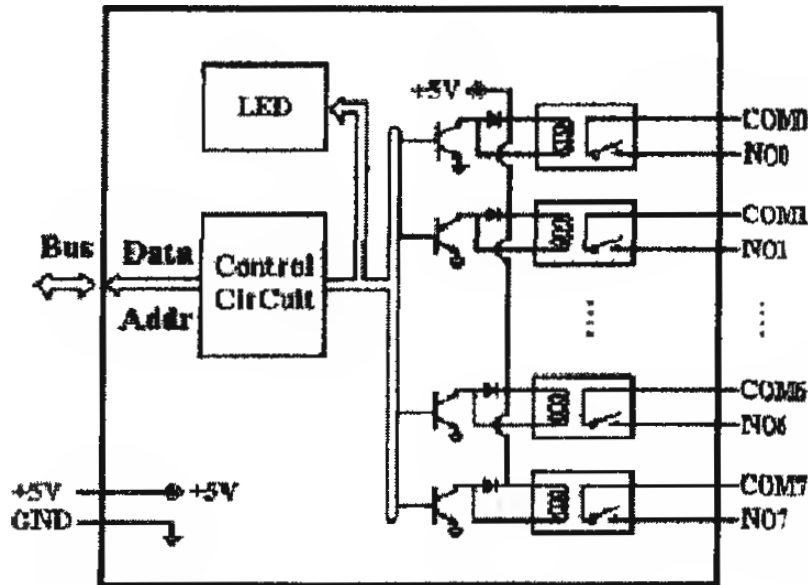


Рис. 2.118

характеристик модулей дискретного ввода/вывода отметим среднее время наработки на отказ (не менее 100 тыс. часов), ресурс реле модулей релейного вывода (от 500

тыс. до 100 млн. срабатываний), частота входных сигналов (от 10 до 40 кГц. и более) с измерением частоты по любому каналу, самотестирование, подавление дребезжания контактов и др.



В модулях УСО удаленного сбора данных и управления (например, серии я ADAM, 1-7000 и др.) при программировании устанавливается величина входного или выходного сигнала, скорость передачи данных (от 1200 бит/с до 115,2 кбит/с) и другие параметры. Объединение модулей в асинхронную полудуплексную двухпроводную сеть по стандарту RS-485 при n длине сегмента до 1200 м и числе модулей в сегменте до 256 позволяет создавать распределенную систему сбора данных и управления большой информационной емкости.

2.5.3 Модули ввода/вывода аналоговых сигналов

Модули ввода/вывода аналоговых сигналов выполняют следующие функции:

- 134) аналого-цифровое преобразование сигнала и выдача результата на внутреннюю шину контроллера;
- 135) цифро-аналоговое преобразование сигнала, полученного от процессорного модуля по внутренней шине;
- 136) фильтрация, масштабирование и линеаризация входного сигнала;
- 137) сигнализация выхода значений измеряемого параметра за допустимые пределы;
- 138) самодиагностика и др.

Модули ввода/вывода аналоговых сигналов используются как встроенные непосредственно в контроллер, так и в качестве удаленных станций ввода/вывода. В случае построения распределенной системы процессорный модуль находится на основной стойке, а соединение с системой ввода/вывода и управление происходит

с помощью сетевых технологий. Для этого в стойку станции ввода/вывода встраивается специальный сетевой модуль. Процессорный модуль главной стойки должен поддерживать управление удаленными станциями по сетевому стандарту.

Основные характеристики модуля ввода/вывода аналоговых сигналов:

- 139) разрядность;
- 140) количество каналов ввода/вывода;
- 141) диапазон входных и выходных сигналов модуля;
- 142) быстродействие;
- 143) точность преобразования;
- 144) обнаружение обрыва датчика;
- 145) возможность подключения датчиков, имеющих нестандартный выход;
- 146) гальваническая развязка сигналов;
- 147) подавление помех на входе/выходе;
- 148) напряжение питания;
- 149) потребляемая мощность;
- 150) габариты.

Количество каналов ввода/вывода варьируется от 2 до 14 в зависимости от класса контроллера. Для моноблочных (компактных) ПЛК количество каналов обычно составляет 2 или 4, для PC-based и модульных 8, 16 или 32.

Наиболее распространенными стандартными сигналами являются сигналы напряжения: 0...5 В, 0... 10 В, 1...5 В, +5 В, ± 10 В и сигналы тока: 0...5 мА, 0/4...20 мА.

Основным компонентом модуля аналогового ввода является аналого-цифровой преобразователь (АЦП). В зависимости от временной последовательности операции преобразования аналоговой величины в цифровой код АЦП подразделяют на следующие типы: последовательный АЦП со ступенчатым пилообразным напряжением (состоит из компаратора, счетчика и ЦАП); АЦП с двоично-взвешенным приближением (поразрядного уравнивания или поразрядного кодирования); параллельные АЦП (с одновременным квантованием сигнала с помощью набора компараторов, включенных параллельно источнику сигнала); последовательно-параллельные АЦП.

В настоящее время широко используются интегральные, функционально законченные АЦП, в одном корпусе которых находятся все необходимые компоненты для работы АЦП (за исключением источника питания). К таким компонентам относятся устройство компенсации температуры холодных спаев термопары, сигнализация обрыва термопары и др. Примером таких АЦП могут служить АЦП AD595,

AD571 и AD7550 фирмы **Analog Devices**, ADC0800 фирмы **National Semiconductors** и др.

В многоканальных модулях аналогового ввода используются многоканальные АЦП с коммутацией (мультиплексированием) входных аналоговых сигналов на входе АЦП.

Важной функциональной характеристикой модуля является наличие гальванической развязки сигналов. Точность преобразования аналогового сигнала в цифровой код зависит от разрядности АЦП. Наиболее часто встречаются модули с разрядностью преобразования от 8 до 16 бит. Естественно, чем выше разрядность, тем ниже быстродействие АЦП.

Модули аналогового ввода/вывода обычно питаются от блока питания контроллера напряжением 12 **VDC** или 24 **VDC**, или 110/220 **VAC**. Потребляемая модулем мощность обычно составляет около 2 Вт. Некоторые модули обеспечивают питание токовой петли.

Входные аналоговые сигналы подаются на модуль через клеммную колодку, проходят через гальваническую развязку, мультиплексируются и преобразуются в цифровой код с помощью АЦП. Далее, после соответствующей обработки, сигнал поступает на внутреннюю шину контроллера и обрабатывается процессором по заложенной программе.

Модуль аналогового вывода работает в обратной последовательности. Основным компонентом модуля аналогового вывода является цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Существуют ЦАП, основанные на методе параллельного суммирования токов или напряжений, пропорциональных весам разрядов преобразуемого цифрового кода. Эталонные токи или напряжения получают с помощью весовых резисторных сеток или резисторных делителей.

2.5.4 Коммуникационные модули

Коммуникационные модули предназначены для обмена данными между контроллером и внешними устройствами по вычислительным сетям передачи данных. Среди коммуникационных модулей находят применение коммуникационные модули локальных сетей CAN, DeviceNet, Profibus DP, Ethernet, сети GSM/GPRS и др., коммуникационные модули интерфейсов RS-232, RS-422/485.

Характеристиками коммуникационных модулей являются допустимая скорость обмена (бит/с), число обслуживаемых устройств обмена данными, количество портов ввода/вывода, напряжение гальванической изоляции, напряжение питания, диапазон рабочих температур и ряд других.

С целью недопущения снижения вычислительных ресурсов базового процессора, отвечающего за ввод/вывод, обработку информации и работу системы в целом, используется сетевой коммуникационный контроллер. В качестве коммуникационных контроллеров широко используются контроллеры фирмы Motorola MC68302, MC68360, MPC8xx/82xx [2.10-2.13].

В состав коммуникационного контроллера фирмы Motorola входят модуль центрального процессора CPU (Central Processor Unit), модуль системной интеграции SIM (System Integration Module) и модуль коммуникационного процессора (CPM — Communication Processor Module). В коммуникационных контроллерах серии MC68302, куда входят контроллеры MC68LC302/302V, MC68EN302 и др., используются 16-разрядные процессоры 68EC000, которые обладают малым энергопотреблением и невысокой стоимостью. Контроллеры серии MC68360 являются дальнейшим развитием серии MC68302 и обладают более высокой производительностью и расширенными функциональными возможностями. Контроллер имеет 32-разрядную шину данных и 32-разрядную шину адреса. В состав коммуникационного контроллера серии MC68360 входит 32-разрядный процессор CPU32+ (33 МГц). Модуль системной интеграции SIM60 реализует интерфейс с системной шиной. В состав модуля входят генератор тактовых импульсов, контроллер динамического ОЗУ, блок тестирования и отладки и др., а также сторожевой таймер (watch-dog timer) и таймер прерываний. В состав модуля CPM входят RISC-процессор, двухпортовое ОЗУ и большой набор периферийных устройств.

В коммуникационных контроллерах MPC8xx/82xx в качестве процессора используется 32-разрядный RISC-процессор Power PC со встроенными блоками кэш-памяти команд и данных. Коммуникационный процессор CPM и блок SIM этих контроллеров обеспечивают повышенную скорость обмена данными (до 100 Мбит/с по протоколу Fast Ethernet) и более высокую производительность. Тактовая частота процессора — 80 МГц.

Серия MPC82xx является следующим поколением коммуникационных контроллеров на базе RISC-процессора Power PC, тактовая частота которых повышена до 200 МГц, увеличено число последовательных каналов в блоке CPM, введен контроллер шины PCI.

Коммуникационные контроллеры MC68EN360/EN360V имеют интерфейсы RS-232, RS-485, Ethernet, флэш-память до 4 Мбайт, SRAM и др.

Корпус коммуникационного модуля выполнен из пластмассы или металла и крепится к стойке с помощью винтовых разъемов или специальной системы соединения, как правило, аналогичной системе крепления других модулей на стойку контроллера. Модуль также имеет разъем для подключения на внутреннюю шину контроллера.

Коммуникационный контроллер выполняет все необходимые операции по формированию прерываний, обмену данными по сети и по внутренней шине контроллера. Некоторые модули предназначены для соединения различных сетей; в этом случае контроллер выполняет операции по преобразованию протоколов.

Конфигурирование и программирование коммуникаций контроллера осуществляется с помощью специального программного обеспечения, обычно поставляемого фирмой-производителем вместе с контроллером.

2.5.5 Модули специального назначения

К числу специальных (функциональных) модулей относятся модули позиционирования, счетчики, модули взвешивания, модули часов реального времени и памяти, вычислительные, логические и диагностические модули, модули энкодера, технического зрения, одно- и многоканальные модули барьеров искробезопасности, модули мезонинных плат, модули питания и др.

Модуль позиционирования используется при автоматизации процессов перемещения изделий в различных отраслях промышленности, будь то упаковка изделий, производство автомобилей, робототехника, складское хранение или движение товаров от начальной до конечной позиции. При увеличении степени автоматизации предприятий критической становится возможность координации работы различных перемещающих устройств, дистанционное изменение программ движения и получение информации о состоянии продукции. Оборудование для управления перемещением должно обеспечивать гибкость и высокую точность, что возможно только при использовании цифровых сервоустройств. Для обеспечения быстроты и простоты связи, настройки и эксплуатации необходима интеграция устройств перемещения с контроллерами. В целом устройства для управления серводвижением включают контроллеры, приводы, двигатели и различную арматуру.

Модули позиционирования работают в следующих режимах:

- 151)** установка скорости движения и торможения;
- 152)** абсолютный пошаговый режим: координаты точек позиционирования задаются в виде абсолютных координат, сохраняемых в памяти в табличной форме;

153) относительный пошаговый режим: перемещение определяется пройденным путем;

154) режим контрольных точек: выполнение операций синхронизации при прохождении контрольных точек.

Модуль энкодера имеет один или несколько входов для приема сигналов от инкрементного энкодера (шифратора приращений) или от абсолютного энкодера. В качестве дополнительных функций модуля энкодера используются: измерение длительности и частоты импульсов, счет на базе счетчиков сигналов с дифференциальными или TTL-уровнями сигналов, измерение скорости и пр. Одной из важных характеристик модуля энкодера является максимально допустимая частота следования входных импульсов.

Модули технического зрения служат для обработки входных сигналов от телевизионных датчиков различного назначения. Это могут быть телевизионные камеры видеонаблюдения и охраны, контроля размеров изделий, телекамеры роботизированных технологических комплексов (РТК), телекамеры видеоконтроля качества продукции, ее маркировки и упаковки на линиях упаковки и сортировки продукции и др.

Модули барьеров искробезопасности (искрозащиты) предназначены для гальванической развязки электротехнического оборудования, находящегося во взрывоопасной зоне, и электротехнических устройств, находящихся во взрывобезопасной зоне.

Модули мезонинных плат служат для повышения функциональных возможностей базовой платы и устанавливаются на базовой плате, используя ее источники питания. Мезонинные модули позволяют за счет компактности размещения достигнуть экономии габаритов модуля.

К модулям специального назначения также относятся модули компараторов, модули имитации для тестирования программ, модули декодирования и др.

2.6. Системы распределенного ввода/вывода и управления

Выбор распределенных систем ввода/вывода и управления обусловлен следующими соображениями:

155) Необходимость территориальной удаленности средств автоматизации из зон с высоким уровнем температуры, электромагнитного излучения и механических нагрузок.

156) Удаленность базового ПЛК от станции ввода/вывода при их связи по сети значительно сокращает затраты на кабельную продукцию, особенно в случае применения оптоволоконна.

157) Процессор станции ввода/вывода, занятый преобразованием и обработкой входной информации, разгружает от этих функций центральный процессор, который сможет реализовать более сложные алгоритмы управления.

158) Модульность системы управления облегчает проектирование, монтаж, замену модулей и их эксплуатацию.

159) Модульность системы расширяет возможности масштабирования и модернизации системы ввода/вывода и управления, позволяет вводить в строй систему поэтапно.

160) Повышение надежности системы достигается за счет резервирования аппаратного обеспечения и приближения сигналов управления к объекту.

161) Быстрое интегрирование модульных систем ввода/вывода в общую информационную систему предприятия.

В табл. 2.39 представлены характеристики систем распределенного ввода/вывода и управления.

Таблица 2.39 Распределенные системы ввода/вывода и управления

№	Наименование	Число модулей в сегменте (корзине)	Число каналов в модуле	Интерфейсы	Степень защиты	Температура, °C	Отличительные особенности
1	ADAM серий 40xx, 41xx, 45xx, ADAM 6000, Advantech (Тайвань)	32	4, 8, 16	RS-485, Ethernet (ADAM 45xx, 6000)	IP20	-25...+75	ADAM 41xx — для жестких условий эксплуатации (-40...+85°C)
2	i-7000, M-7000, ICP DAS (Тайвань)	256 (без репитера)	8, 16	RS-485	IP20	-25...+75	Двойной сторожевой таймер, i-7188EGD с поддержкой ISA-GRAE, X-серия мезонинных модулей
3	Bus Terminal, Beckhoff (Германия)	64 (через K-bus до 255)	2, 4, 8	Profibus DP, Interbus, CANopen DeviceNet, ControlNet, Modbus, RS-232, RS-485, Ethernet TCP/IP	OP20	0...+60	Ширина модуля 12,5 мм
4	I/O Phoenix Contact, Phoenix Contact (Япония)	63 (127 с повторителями)	8, 16, 32	Profibus, Ethernet, Interbus, ASi	IP65/67	0...+60	Bluetooth (2,4 ГГц)
5	MELSEC ST, Mitsubishi Electric, Япония	32, 64, 128 и 256	4	Profibus DP, CC-Link, ASi, Melsec Net, RS-485	IP67	0...+55	Ширина модуля 12,5 мм. Скорость обмена 3...12 Мбод
6	Simatic ET 200S/ 200iS/ 200X/ 200co, Siemens (Германия)	64/32/7/8	2,4/2,4/2, 4/8,16	Profibus DP	IP20/30/67/67	0...+55	ET200iS — для взрывоопасных зон
7	Momentum M1E (связь по Ethernet), Schneider Electric (Франция)	8192/ 8192 каналов ввода/вывода	4, 8, 16, 32	TCP/IP и Interbus-S; ModbusRTU (RS-485)	IP20	0...+60	Встроенные Web-страницы (5) ПО: Unity Pro и ProWORX 984 Ladder Logic по стандарту IEC 61131-3
8	SmartSlices, Omron (Япония)	1024 I/O		DeviceNet, Profibus DP, CompoBus/S	IP20		«Горячая» замена модулей; ПО: CX-Integrator ПЛК: CS1/CJ1
9	Genius	32	8, 16	Genius, Profibus DP, Interbus-S, RS-485	IP20	0...+60	Ударная нагрузка до 15 g. Составной модуль
10	FieldControl, GE Fanuc (США, Япония)	8	8, 16 (всего 128 каналов)	Genius, Profibus DP, Interbus-S	IP20	0...+60	Единое ПО VersaPro
11	Terminator I/O, Koyo Electronics (Япония)	6 (корзина)	8, 16	Ethernet 10BaseT, Device NET, Modbus, Profibus DP	IP20	0...+60	Рекомендуемый базовый контроллер — DL205

12	Flex Integra I/O (1793)	8	3, 4	Ethernet, ControlNet, RS-232/422/485 и Remote I/O	IP20	—	Работают с модулями Flex I/O и модулями 1793
13	Flex I/O (1794)	8 узлов/адаптер	2, 4, 8, 16	ControlNet, DeviceNet, Remote I/O, Ethernet	IP20	-20...+75	5 г при 10...500 Пз и ударным нагрузкам (30 г при 11 мс.) ПО: RSLogix 5000, RSView32-SPC, -Messenger, -Trend из SCADA-пакета RSView32
14	FLEX Logix	9 адаптеров по 8 модулей	4, 16	Ethernet, DeviceNet, ControlNet, RS-232/RS-485	IP20	-20...+75	Модуль GPS глобальной сети GPS
15	SLX 200, Rockwell Automation (США)	60 каналам AI/АО и 128 каналам DI/DO	8, 16	RS-232, RS-485 Ethernet			Время наработки на отказ – 500 000 часов, поканальная изоляция
16	Think I/O, Kontron (Германия)	модули ввода/вывода WAGO 750/ 753	2, 4, 8	Profibus DP, CAN-open, Modbus RS-232, Ethernet 10BaseT/ 100BaseTX	IP20	0...+60	ПО: CoDeSys (стандарт IEC 61131-3), пакет SOPH.LA
17	WAGO I/O System, WAGO (Германия)	Число узлов в сети Profibus DP — 96; Interbus — 256; CAN — 110, 64 модуля на узел	2, 4, 8	Ethernet TCP/IP, Profibus DP, Interbus, DeviceNet, CANopen, CC-Link, RS-232/RS-485	IP20	0...50	ПО: WAGO-I/O-PRO по стандарту IEC 61131-3
18	I/O System XI/ON, Möller GmbH (Германия)	72	8, 16	Profibus-DP, CAN- open, Device Net, INTERBUS	IP20		ПО: XSoft Professional
19	I/O System BL 67	—	2, 4, 8, 16	Profibus DP, DeviceNet, ModbusTCP, Profinet IO, EtherNet/IP, CANopen	IP67	-25...+85	ПО: I/O Assistant
20	Excom, Turck GmbH (Германия)	32 станции на 16 модулей	2, 4, 8	Profibus DP/PA	IP20	-20...+60	Связь с ПЛК по Profibus через искровывозащитный барьер
21	ioLogik 4000, МОХА, Тайвань	32	2, 4, 8, 16	Ethernet, RS-232/RS-485	IP20	-20...+60	ПО: ioAdmin
22	NI CompactDAQ, National Instruments, США	8-слотовое шасси (256 каналов)	4, 8, 16, 32	USB 2.0	IP20	-40...+70	Гальванизоизоляция 2300 VDC. ПО: DAQ Assistant
23	Fastwel I/O, Fastwel Inc. (Россия)	63	8, 16	RS-232, FBUS	IP20	-40...+85	ПО: CoDeSys

№	Наименование	Число модулей в сегменте (корзине)	Число каналов в модуле	Интерфейсы	Степень защиты	Температура, °С	Отличительные особенности
24	X67 System В6-R (США)	253	2, 4, 6, 8	RS-232, RS422/485, CANopen, DeviceNet, Ethernet, Profibus DP	IP67	0...+60	Монтаж на DIN-рейку, топология — шина
25	IS-RP1, Pepperl + Fuchs (Германия)	8 на сегмент	16	Profibus DP/PA, Modbus, ControlNet	IP20	-20...+70	Число сегментов: 10 — FF, 31 — Profibus, Modbus.
26	Jet I/O 6500, Korenix (Германия)	—	4, 8, 14	Ethernet	IP31	—	Монтаж на DIN-рейку
27	RIO, Allen-Bradley (США)	До 32 шасси к одному master	—	Ethernet, ControlNet, RS-232/422	Ш320	—	—
28	IS1, ITC Electronics (Германия)	—	—	Modbus TCP	—	-20...+70	—
29	I/A Series RTU20, Foxboro, (США)	63	2, 4, 8, 16, 32	Modbus RTU	IP20	-25...+70	Резервирование ПЛК, АЦП, модулей
30	LB COOPER Crouse-Hinds/CEAG (США)	192 канала ввода/вывода	4, 8	Modbus RTU, Profibus DP, HART	IP20		Работа во взрывоопасных зонах
31	TREI 5B-05 TREI GmbH (Германия)	255 (поддержка 6000 каналов)	2, 4, 8	Ethernet 10/100, Bluetooth, RS-232, RS-485	IP20	0...+60	Наработка на отказ 150000 часов, монтаж на DIN-рейку
32	Деконт, Деконт-Ех «ДЭП» (Россия)	—	4, 6, 8, 16, 64	RS-232, 2×RS-485, 4×SSI	IP20	-40...+70	Взрывозащищенная серия Деконт-Ех (2, 4, 8 каналов)
33	КРОСС500	32	4, 8, 16	RS-232, RS-485, Ethernet	IP20	0...+50	ОСРВ: OS-9
34	ТРАССА500, ЗЭиМ (Россия)	32	1, 2, 4	4×RS-485, 2× RS-232, 1× Ethernet	IP20	0...+50	ОСРВ: RTOS 32, ПО — ISaGRAF
35	MIRageN, «Модульные системы Торнадо» (Россия)	32 шасси I/O	8, 16, 24, 32	3×RS-485	IP20	0...+70	Монтаж на DIN-рейку
36	DCS-2000, ЗАО «Эмикон» (Россия)	32	10, 12, 14	RS-485	IP30	-20...+70	Питание 24 VDC
37	Smart-RTU, «РТСофт» (Россия)	—	4, 8, 16	Ethernet, CAN, RS-232	IP20	0...+50	OC: Wind. NT Embedded; синхронизация от GPS

2.7. Методика выбора ПЛК

Выбор контроллеров для распределенной системы управления обусловлен большим числом разнородных факторов, зависящих прежде всего от того, является ли система вновь проектируемой или решаются задачи модернизации существующей.

щей системы. В последнем случае имеют значение факторы преемственности программно- аппаратных средств, квалификация обслуживающего персонала и службы ремонта, наличие сопроводительной документации и ее освоение, запас комплектующих, выявленные показатели надежности (наработка на отказ, срок службы, ремонтпригодность и др.).

При выборе контроллера для РСУ основной задачей является, естественно, наиболее полное удовлетворение технических требований на разработку РСУ (требования к информационным, управляющим и вспомогательным функциям, а также требования к техническому, программному, метрологическому и организационному обеспечению, требования к диагностике и техническому обслуживанию системы и др.).

Основные требования при выборе контроллера с учетом специфики производства и решаемых задач следующие:

- 162) Характеристики контроллера, соответствующие требованиям проекта или условиям существующего производства.
- 163) Выбор класса контроллера (моноблочный, модульный, PC-based, встраиваемый).
- 164) Соответствие контроллера международным стандартам (открытость ПЛК).
- 165) Наличие необходимых интерфейсов связи уровней иерархии системы.
- 166) Возможность визуализации данных (связь со SCADA-системами).
- 167) Наличие стандартных систем программирования и алгоритмов настройки параметров контроллера.
- 168) Показатели надежности контроллера (время наработки на отказ, возможности резервирования, «горячей замены», ремонтпригодность и др.).
- 169) Экономические показатели

— **Характеристики контроллера, соответствующие требованиям проекта или условиям существующего производства**

К наиболее важным характеристикам относятся параметры процессорного модуля (тип и быстродействие процессора, объем памяти и др.), наличие сопроцессора, время выполнения логической команды (инструкции), наличие сторожевого таймера, часов реального времени, число встроенных и наращиваемых входов/выходов, наличие в контроллере необходимого числа модулей ввода/вывода, специальных и коммуникационных модулей, среда программирования контроллера (удобство и простота программирования). Важным показателем контроллера явля-

ется возможность резервирования контроллера, модулей и плат, диагностика состояния контроллера и другие факторы (светодиодная индикация каналов и режимов работы, наличие панели визуализации и клавиатуры, гальваническая изоляция по входам и выходам, степень защиты контроллера и др.).

— **Выбор класса контроллера (моноблочный, модульный, PC-based, встраиваемый)**

После расчета аналоговых и дискретных каналов ввода/вывода следует сделать выбор класса контроллера — моноблочный, модульный, PC-based или встраиваемый контроллер. Моноблочный контроллер, имеющий, как правило, небольшое число встроенных дискретных и аналоговых каналов ввода/вывода, может использоваться автономно или с модулями расширения в малых и средних по сложности системах управления. При выборе модульного контроллера обеспечивается большее число каналов ввода/вывода, повышается функциональность контроллера за счет дополнительных функций, упрощается обслуживание контроллера, допускающее в ряде случаев «горячую» замену модулей и др. Модульность контроллера с использованием мезонинных модулей ввода/вывода по стандартам *Industry Pack* и *ModPack* и специальных модулей различного назначения является одной из тенденций развития контроллеров. При выборе PC-based контроллера значительно повышается многофункциональность контроллера за счет возможностей ПО, удобства программирования, снижается его стоимость. В случае модернизации существующей системы управления может быть рекомендована замена существующего контроллера на его новые модификации, которые, как правило, бывают полностью совместимы.

Выбор встраиваемого контроллера определяется IBM PC-совместимой архитектурой используемой рабочей станции с ОСПВ, а также необходимостью в достаточном обеспечении для решения сложных алгоритмов управления.

170) Соответствие контроллера Международным стандартам

Выбор контроллера, соответствующего Международным стандартам (открытость контроллера), означает соответствие стандарту качества ISO 9001, стандартам шинной архитектуры контроллера (VME, PCI, CompactPCI, PC/104 и др.), стандартным протоколам связи промышленных сетей (Profibus, Modbus, Interbus, CAN, Bit-bus и др.), стандартам связи с полевыми приборами (HART-протокол, AS-интерфейс, Fieldbus Foundation, RS-485 и др.), стандартам на ОСПВ (QNX, OS 9000, VxWorks и др.), стандартам на программное обеспечение контроллеров (IEC1131-3), стандартам на степень защиты корпуса (IEC 529), на габаритные размеры (IEC

297 — ^"-конструктивы, Евромеханика и IEC 917 — метрические конструктивы), на ударо- и вибропрочность (IEC 68-2) и др. В ряде случаев допускается соответствие отдельных показателей (например, габаритных размеров, показателей электропитания и др.) отраслевым стандартам (ТУ ГОСТ). В случае использования разработок на территории России необходимы сертификаты соответствия Госстандарта России на соответствие требованиям ГОСТ и разрешение Госгортехнадзора на применение в составе систем автоматизации на поднадзорных объектах.

171) Наличие необходимых интерфейсов связи уровней иерархии системы

В интегрированной системе управления информация о работе систем управления на полевом и контроллерном уровнях должна быть доступна на диспетчерском и административном уровнях иерархии системы. Эту связь обеспечивают различные интерфейсы связи, среди которых получают наибольшее распространение интерфейсы Ethernet и Industrial Ethernet. Интерфейс Ethernet обеспечивает высокую скорость передачи данных, низкую стоимость и поддерживается подавляющим большинством производителей программного и аппаратного обеспечения. Через сеть Ethernet серверы и операторские станции верхнего уровня управления предприятием получают непосредственный доступ к данным параметров технологического процесса. При наличии SCADA-системы, установленной на операторской станции, используется клиент-серверная архитектура связи, при которой SCADA-клиент получает прямой доступ к данным процесса с помощью OPC-сервера. Использование протокола Ethernet Modbus/ TCP позволяет легко интегрировать контроллеры со SCADA-системами, поддерживающими протокол Modbus (без необходимости дополнительного драйвера для контроллера). Дальнейшим развитием связи контроллеров с удаленными операторскими станциями является использование сети Internet и GSM технологии.

172) Возможность визуализации данных (связь со SCADA-системами)

Практически любая современная система контроля (мониторинга) и управления требует визуализации данных о процессе в режиме реального времени. Представление данных о ходе технологического процесса в виде таблиц, графиков и мнемосхем, а также сигнализация отклонений параметров от заданных значений осуществляется с помощью SCADA-систем с OPC-сервером. Наличие у ряда PC-based контроллеров встроенной SCADA-системы (например, Trace Mode и MasterSCADA) позволяет значительно ускорить процесс настройки проекта и повысить эффективность представления информации, снизить затраты на приобретение SCADA-

системы и коммуникационных интерфейсов. К таким контроллерам относятся российские контроллеры Р130 ТМ, Ломиконт ТМ, Лагуна, Теконик и др. В случае применения контроллеров др. марок следует сформулировать условия выбора той или иной SCADA-системы, о чем будет сказано в гл. 2 раздела 2.

173) Наличие стандартных систем программирования и алгоритмов настройки параметров контроллера

Наличие стандартных систем программирования контроллера, таких как ISaGRAF, STEP7, CoDeSys, FP Win и др., позволяют ускорить процесс ввода в эксплуатацию систем регулирования и упростить процесс обслуживания системы, особенно в случае автоматизации малоизученных объектов управления. Крайне важно наличие у контроллера режима автонастройки параметров ПИД-регулятора — коэффициента усиления и постоянной времени интегрирования G . (постоянная времени дифференцирования T_d , как правило, устанавливается программно в соотношении с полученным значением времени интегрирования $T_d = T_i/4.5$). Известен ряд методик определения параметров настройки ПИД-регулятора от классических до оригинальных, некоторые из которых рассмотрены в гл. 3 раздела 1. Известны режимы настройки параметров адаптивных регуляторов и др. алгоритмов управления, реализуемых, как правило, на программном уровне.

174) Показатели надежности контроллера (время наработки на отказ, возможности резервирования, «горячей замены», ремонтпригодность и др.)

К показателям надежности относятся время наработки на отказ (желательно иметь 100 тыс. часов и более), срок службы (10 лет и более), ремонтпригодность (возможность легкой замены модулей, блоков). Повышение надежности и точности достигается за счет средств диагностики, прогнозирования отказов, режимов безударного переключения, «горячего» резервирования, гальванической развязки, дублирования и троирования аппаратных средств, рестарта ПО и другими методами.

175) Экономические показатели

К экономическим показателям при выборе контроллера относятся цена контроллера и программного обеспечения, стоимость сопровождения в течение жизненного цикла контроллера, затраты на обучение и обслуживание и др. Экономические затраты складываются из стоимости контроллера, затрат на кабельную продукцию, а в случае беспроводной связи с контроллером — стоимости приемопередающих устройств и программного обеспечения. Следует учитывать затраты на обучение, модернизацию и сопровождение в течение всего жизненного цикла контроллера.

При проектировании распределенных систем управления с большим числом каналов ввода/вывода применяется методика тендерных торгов для оптимального выбора аппаратных средств и программного обеспечения.

Рядом фирм предлагается упрощенная методика выбора контроллеров. В качестве примера ниже рассматривается **методика выбора контроллера фирмы Allen-Bradley**.

Для системы распределенного управления фирма **Allen-Bradley** производит контроллеры FlexLogix. В состав системы, помимо контроллера, входят модули ввода/вывода FLEX I/O, коммуникационная плата 1788 для связи с сетью ControlNet (устанавливается непосредственно в контроллер) и программное обеспечение RSLogix5000.

Выбор модели контроллера и модулей ввода/вывода осуществляется в несколько шагов (этапов).

Шаг 1. Определение числа каналов ввода/вывода и выбор модуля

Ниже приведена табл. 2.40 характеристик выбранных устройств ввода/вывода.

Таблица 2.40. Характеристики устройств ввода/вывода

Тип сигнала	Параметры сигнала	Количество точек ввода/вывода	Количество точек ввода/вывода на модуль	Количество модулей	Тип модуля
Дискретный вход	24 VDC	43	16	3	1794-IB16
Дискретный вход	120 VAC	48	8	6	1794-IA8
Дискретный выход	24 VDC	15	16	1	1794-OB16
Дискретный выход	«СК»	5	8	1	1794-OW8
Дискретный выход	129 VAC	25	8	4	1794-OA8
Аналоговый вход	4...20 mA	6	4	2	1794-IF41
Аналоговый вход	0...10 В	2	4	0	1794-IF1
Аналоговый выход	4...20 mA	4	4	1	1794-OF41

Шаг 2. Компоновка системы (определение конфигурации системы)

На этом этапе выбирается расположение контроллера (по месту, в щите и т. д.), использование центрального контроллера или системы удаленного ввода/вывода. Контроллер FlexLogix поддерживает 8 локальных модулей ввода/вывода (на локальной DIN-рейке), 8 модулей ввода/вывода в локальном расширении (на DIN-рейке локального расширения) и 16 удаленных модулей ввода/вывода по сети ControlNet.

Для локального расширения требуется адаптер локального расширения 1794-FLA, для удаленного ввода/вывода по сети ControlNet — адаптер сети ControlNet (1794-ACN15 или -ACNR15 в зависимости от типа модулей ввода/вывода).

Шаг 3. Определение объема памяти контроллера

Расчет объема памяти производится исходя из числа точек ввода/вывода и времени, необходимого на обработку одного сигнала. Объем памяти для дискретной точки ввода/вывода — 400 байт, аналоговой — 2600 байт, одного коммуникационного модуля — 5000, для выполнения одной задачи — 4000 байт. Итого в примере — 12000 байт.

Определим число дискретных точек ввода/вывода: $43 + 48 + 25 + 15 + 5 = 136$; число аналоговых точек ввода/вывода: $6 + 2 + 4 = 12$; число коммуникационных плат — одна плата 1788 — CNC.

Таким образом, необходимая величина памяти контроллера равна:

- 176) задачи контроллера: $2 \times 4000 = 8000$ байт;
- 177) дискретные точки ввода/вывода: $136 \times 400 = 54400$ байт;
- 178) аналоговые точки ввода/вывода: $12 \times 2600 = 31200$ байт;
- 179) коммуникационные модули: $2 \times 5000 = 10\,000$.

Всего — 103 600 байт (101,17 кбайт). Фирмой **Allen Bradley** выпускаются контроллеры 1794-L33 с объемом памяти 64 кбайт и 1794-L34 с объемом памяти 512 кбайт. С учетом требуемого объема памяти выбран контроллер 1794-L34.

Шаг 4. Выбор необходимого числа DIN-реек

Общее число модулей (см. шаг 1) составляет 18. На локальной рейке (вместе с контроллером) можно разместить 8 модулей и до 8 модулей — на рейке локального расширения. При этом можно разделить 8 модулей ввода/вывода, находящихся на одной рейке, на две части, соединив их кабелем 1794-CE1 или 1794-CE3. В нашем примере потребуется одна локальная DIN-рейка для 8 модулей и две DIN-рейки локального расширения на 6 и 4 модуля. Для связи контроллера, находящегося на локальной рейке, с адаптером 1794-FLA, находящимся на рейке локального расширения, также используется кабель 1794-CE1 или 1794-CE3.

Шаг 5. Выбор источника питания.

Для выбора источника питания необходимо вычислить общую потребляемую мощность контроллера и модулей ввода/вывода. Для примера рассчитаем потребляемую мощность контроллера и модулей ввода/вывода, размещенных на локальной рейке. На этой рейке разместим контроллер, четыре модуля дискретного ввода 1794-IA8 и четыре модуля дискретного вывода 1794-OA8 (табл. 2.41).

Таблица 2.41. Расчет потребляемой мощности

Тип устройства	Номинальный ток, мА	Потребляемая мощность, Вт	Количество устройств	Общая потребляемая мощность, Вт
ПЛИК 1794-L34	640	21,1	1	21,1
Модуль 1794-IA8	7,1	4,5	4	18,0
Модуль 1794-OA8	2,25	4,1	4	16,4
Общая потребляемая мощность — 55,5 Вт				

Выпускаемый фирмой **Allen-Bradley** источник питания для контроллеров FLEX типа 1794-PS13 рассчитан на максимальную мощность 36 Вт. Поэтому выбираем два источника 1794-PS13.

Шаг 6. Проверка связей контроллера с модулями ввода/вывода (определение числа соединений).

Определим число соединений с учетом следующих нормативов: число соединений локальной рейки (соединение типа Рэк) — 1; число соединений рейки локального расширения — 1; модуль ввода/вывода — 1. Если модули 1794-IA8 (4 шт.) и 1794-OA8 (4 шт.) находятся вместе с ПЛИК 1794-L34 на локальной рейке, то используется одно соединение. Для рейки локального расширения с адаптером 1794-FLA и модулями 1794-IA8 (2 шт.), 1794-IB16 (3 шт.), 1794-OB16 (1 шт.) используется одно соединение. Для удаленной рейки по сети ControlNet с адаптером 1794-ACN15 (1 шт.), включающей модуль 1794-OW8 (1 шт.), 1794-IF41 (2 шт.) и 1794-OF41 (1 шт.) число соединений равно 5, т.к. каждый удаленный модуль и адаптер требуют одного соединения. Таким образом, общее число соединений примера — 10.

Для передачи и приема данных (тегов) необходимы следующие соединения: производимый тег (тег, передаваемый одним контроллером другим контроллерам) для одного потребителя — 1 соединение; при n потребителей и m тегов число соединений равно $m \cdot n$. Кроме того, учитывается число соединений, равное числу сообщений. Предположим, что на передачу данных требуется 22 соединения (6 — производимые теги, 4 — потребляемые теги, 12 — сообщения). Тогда общее число соединений составит $22 + 10 = 32$ соединения.

Шаг 7. Выбор программного обеспечения

Выбор ПО определяется выбором контроллера, коммуникационных плат, рабочей станции и панели оператора. Выбранное ПО сведено в табл. 2.42

Таблица 2.42. Программное обеспечение.

Тип устройства	Программное обеспечение	Тип, серия для заказа	Примечание
Контроллер FlexLogix 1794	RSLogix 5000	Серия 9324	Работает под управление Windows NT
Коммуникационная плата ControlNet 1788-CNC, -CNCR	RSNetWorx для ControlNet (поставляется с RSLogix 5000)	9324-RLD300 NXENE	
Коммуникационная плата в рабочей станции	RSLinx (поставляется с RSLogix 5000)	9324	—
Рабочая станция	RSView32	9301	—
Панель оператора PanelView	Пакет программирования PanelBuilder	9301 2711-ND3 или -ND1	—

Лекция

по теме №4.2.3. Оборудование и компоненты, распределенных систем управления

ВОПРОСЫ

1. Щитовое оборудование.
2. Промышленные компьютеры.
3. Локальные микропроцессорные регуляторы.
4. Технические характеристики оборудования и компонентов PCY.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Профессия, 2009. – 592 с. (269-352).

1. Щитовое оборудование

3.2. Щитовое оборудование

3.2.1 Щиты и пульты

Щиты (шкафы) предназначены для размещения приборов, регуляторов, пускорегулирующей, коммутационной и сигнальной аппаратуры и других средств автоматизации, а также для удобства размещения, обслуживания и защиты от тепловых, электромагнитных и механических воздействий щитовых приборов.

Основные принципы проектирования современных шкафов управления:

180) Модульность: полностью сборный шкаф, включающий каркас (состоит из 4-х стоек, закрепленных к верхней и нижней рамам), заднюю и боковые панели, переднюю дверь (стальная или из закаленного стекла), верхнюю панель и цоколь. В зависимости от заказа шкафы могут иметь заднюю и (или) боковую дверь.

181) Термостатирование: устройство теплообмена, состоящее из терморегулятора с системой вентиляции и (или) обогрева шкафа.

182) Унифицированные монтажные, установочные и крепежные изделия (монтажные платы, вертикальные и горизонтальные рейки, кронштейны, закладные гайки, петли, дверные ограничители, платы кабельного ввода, замки и ручки).

Классификация шкафов управления:

Стандартный напольный шкаф по спецификации западных фирм SAREL, RITTAL, SCHROFF и др. (рис. 3.1).

183) Высота 1200 мм (ширина 600 и 800 мм; глубина 600 и 800 мм).

184) Высота 1600 мм (ширина 600 и 800 мм; глубина 600 и 800 мм).

185) Высота 1800 мм (ширина 600, 800 и 1000 мм; глубина 400, 500, 600 и 800 мм).

186) Высота 1800 мм (ширина 1000 мм; глубина 400 и 600 мм).

187) Высота 1800 мм (ширина 1200 мм; глубина 400, 500 и 600 мм).

188) Высота 2000 мм (ширина 400 мм; глубина 500 и 600 мм).

189) Высота 2000 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 400, 500, 600 и 800 мм).

190) Высота 2200 мм (ширина 600, 800 и 1200 мм; глубина 600 и 800 мм).

Щиты по спецификации заводов-изготовителей РФ (рис. 3.2)

191) Щит шкафной с правой дверью (ЩШ-ПД). Высота 2200 мм (ширина 600 и 1000 мм; глубина 800, 1000 и 1200 мм).

192) Щит шкафной с левой дверью (ЩШ-ЛД). Высота 2200 мм (ширина 600 и 1000 мм; глубина 800, 1000 и 1200 мм).

Щит шкафной с задней дверью (ЩШ-ЗД). Высота 2200 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 600 и 800 мм).



Рис. 3.1

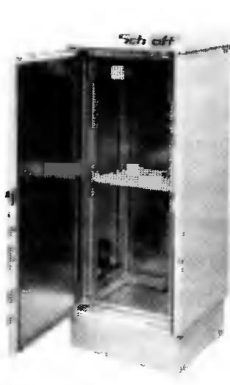


Рис. 3.2

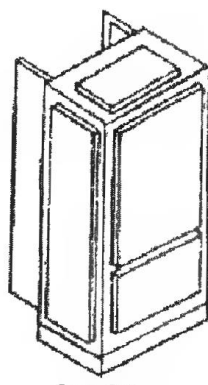
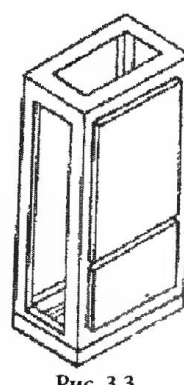
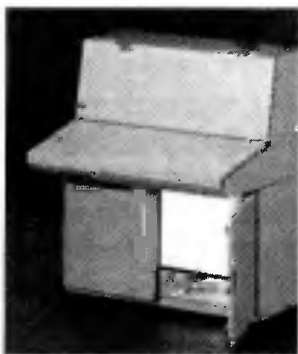


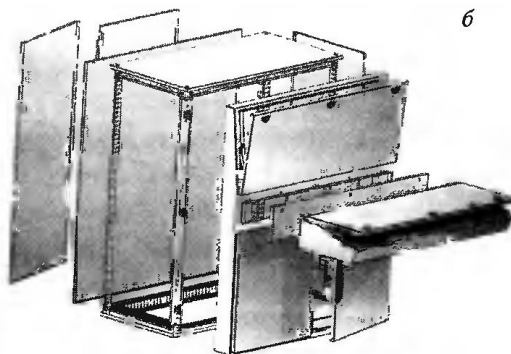
Рис. 3.3



а



б



в



г



Рис. 3.4

- 193) Щит шкафной с задней дверью, открытый с двух сторон (ЩШ-ЗД-02). Высота 2200 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 600 и 800 мм).
- 194) Щит шкафной с задней дверью, открытый справа (ЩШ-ЗД-ОП). Высота 2200 мм (ширина 600, 1000 и 1200 мм; глубина 600 и 800 мм).
- 195) Щит шкафной с задней дверью, открытый слева (ЩШ-ЗД-ОЛ). Высота 2200 мм (ширина 600, 1000 и 1200 мм; глубина 600 и 800 мм).
- 196) Щит шкафной с передней и задней дверью (ЩШ-ПЗД). Высота 2200 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 600 и 800 мм).
- 197) Щит шкафной с передней и задней дверью (ЩШ-ПЗД). Высота 1800 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 400 и 600 мм).
- 198) Щит шкафной малогабаритный с передней (задней) дверью (ЩШМ). Высота 400, 600, 1000 и 1400 мм (ширина 300, 400, 600 и 800 мм; глубина 250, 350, 500 и 600 мм).

Панельные и секционные щиты по спецификации заводов-изготовителей РФ (рис. 3.3)

199) Щит панельный с каркасом (ЩПК). Высота 2200 мм (ширина 600, 800 и 1000 мм; глубина 600 мм).

200) Щит панельный малогабаритный (ЩПМ). Высота 400 (ширина 300 мм; глубина 600 мм); высота 600 мм (ширина 400 мм; глубина 600 мм), высота 1000 мм (ширина 600 и 800 мм; глубина 600 мм).

Секционный щит (состоит из 2, 3 и более секций). Высота 2280 мм (ширина секций 600, 800 и 1000 мм). Каждая секция имеет помимо базовой панели также панель вспомогательную (ПнВ) шириной 600, 800 и 1000 мм, панель вспомогательную с дверью (ПнВ-Д) шириной 1000 мм, панель декоративную (ПнД) шириной 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1600 и 1800 мм, панели торцевые левую и правую (ПнТ-Л и ПнТ-П) шириной 600 мм. Высота декоративных панелей 600, 800 и 1000 мм, остальных — 2280 мм.

Пульты (панели) управления по спецификации западных фирм SAREL, RITTAL, SCHROFF, ETA и др.

Полностью сборный пульт управления с откидной верхней панелью или пульт управления, состоящий из основания, консоли (столешницы) с откидной панелью и верхней части с откидной передней панелью показан на рис. 3.4. Откидные панели обеспечивают удобство монтажа и обслуживания установленного оборудования, пускорегулирующей и сигнальной аппаратуры. Высота пульта 1400 мм, ширина 1200, 1400 и 1600 мм, глубина 600 и 800 мм. На рис. 3.4, в показан пульт фирмы RITTAL «TopPult».

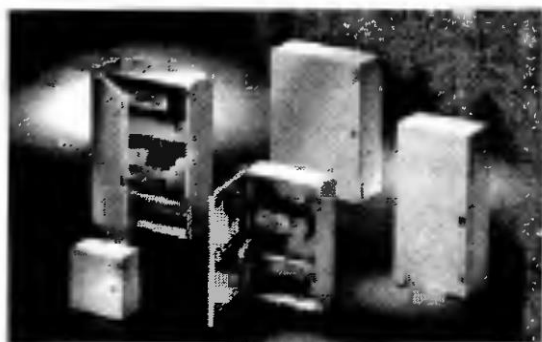


Рис. 3.5

Стандартный настенный шкаф (рис. 3.5):

201) высота 300 мм (ширина 200, 300 и 400 мм; глубина 150 и 200 мм);

202) высота 400 мм (ширина 300, 400 и 600 мм; глубина 150, 200 и 250 мм);

203) высота 600 мм (ширина 400 и 600 мм; глубина 200, 250, 300 и 400 мм);

204) высота 800 мм (ширина 600 и 800 мм; глубина 250 и 300 мм);

205) высота 1000 мм (ширина 600, 800 и 1000 мм; глубина 250, 300 и 400 мм);

206) высота 1200 мм (ширина 800 и 1000 мм; глубина 300 и 400 мм).

К принадлежностям настенных шкафов относятся монтажные платы, рейки, платы кабельного ввода, замки, приборы освещения, терморегуляторы и др.

Пульты отдельно стоящие и приставные по спецификации заводов-изготовителей РФ

207) Пульт (П). Высота 900 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 600 и 800 мм).

208) Пульт приставной (ПП). Высота 900 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 400 и 600 мм).

209) Пульт приставной правый (ПП-П). Высота 900 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 400 и 600 мм).

210) Пульт приставной левый (ПП-Л). Высота 900 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 400 и 600 мм).

211) Пульт с вертикальной приборной приставкой (ПВП). Высота 1600 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 1200 мм).

212) Пульт с наклонной приборной приставкой (ПНП). Высота 1200 мм (ширина 600, 800, 1000 и 1200 мм; глубина 1200 мм).

Основные характеристики шкафов и пультов К ним относят:

213) Габариты и исполнение шкафа.

214) Степень защиты шкафа IP и IK (IP— степень защиты от проникновения твердых тел и воды, диапазон от IP11 до IP68; IK— степень защиты от внешних механических ударов; диапазон— от IK01 до IK10). Большинство шкафов имеют степень защиты IP50...IP66 и IK08...IK10.

Материал корпуса. Используются стальной лист толщиной 1,5...2,0 мм (нержавеющая сталь). Для настенных шкафов используются (помимо стального листа) следующие материалы: ударостойкий фибerglass, поликарбонат и ABS. Настенные шкафы из фибerglassа, поликарбоната и ABS используются в производствах с агрессивными средами (гальваника, нефтепереработка, другие химические производства). Для герметизации корпусов используются прокладки из полиуретана. Температурный диапазон при эксплуатации корпусов из поликарбоната от -50 до +130 °C, из ABS от -40 до +70 °C.

215) Цвет покрытия шкафа. Цвет должен соответствовать стандарту МЭК (RAL 7032, RAL 7035, RAL 2000 и др). Основные цвета: серый, светло-серый, светло-голубой, серебристый и черный (для цоколя и рамы).

Термостатирование шкафа

Средства термостатирования должны обеспечить постоянную температуру и влажность внутри шкафа при колебаниях наружной температуры и влажности. Встроенный внутрь термостат управляет врезными вентиляторами и нагревателями. Как правило, поток воздуха распространяется снизу вверх с помощью расположенных внизу шкафа 19"-нагнетателей и выходит через щели в верхней панели шкафа. Блок 19"-нагнетателей, состоящих из 3 вентиляторов, имеет высоту Ш, 2U или 3U. Для фильтрации воздуха, проходящего через приточные и вытяжные отверстия, применяются фильтры из синтетического волокна [3.16].

На рис. 3.6 показаны блок врезных вентиляторов (рис. 3.6, **а**) и система воздуховода фирмы **Rittal** (рис. 3.6, б). Также используется замкнутая система вентиляции, при которой воздух циркулирует внутри шкафа без выхода наружу.

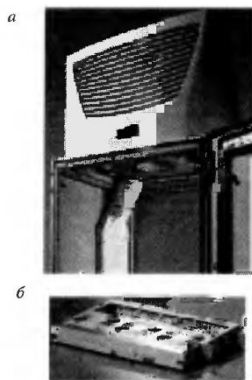


Рис. 3.6

Шкафы и пульта для АСУ ТП должны соответствовать стандарту МЭК 60439-1, ГОСТ Р 51321.1-2000, ГОСТ 10985-80 и др. Согласно СПДС (Система Проектной Документации для Строительства), ГОСТ 21.101 (Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов) и ГОСТ 21.408-93 исходными материалами для проектирования щитов и пультов являются рабочие чертежи проекта — схемы автоматизации, чертежи фасадов и схемы внутренних соединений щитов и пультов, принципиальные электрические и пневматические схемы, таблицы соединений и подключений внешних проводок и чертежи установок средств автоматизации.

В целом, выбор шкафов и пультов определяется следующими условиями:

- 216) функциональное назначение проекта (контроль, сигнализация, управление, мониторинг процесса и др.);
- 217) количество средств автоматизации и их габариты, размещаемые на передних панелях, поворотной раме и внутри шкафа или пульта;
- 218) удобство монтажа, обслуживания и ремонта;

- 219) допустимые площади размещения шкафов или пультов;
- 220) правила техники безопасности в части расстояний между шкафами и оборудованием, а также проходов для обслуживания;
- 221) климатические условия в месте установки шкафа или пульта (температура, влажность, процентное содержание вредных примесей...);
- 222) возможные электромагнитные и механические воздействия на шкафы и пульты.

3.2.2 Низковольтная аппаратура

К низковольтной аппаратуре принято относить низковольтные коммутационные изделия (реле, пускатели, кнопки и кнопочные посты, переключатели, автоматические выключатели, устройства пусковые и др.), а также светосигнальную аппаратуру (сигнальные лампы, световые табло, светосигнальные колонны). Низковольтная аппаратура применяется в электрических цепях с напряжением до 1000 В (в основном с напряжением 220/230/240, 380/400, 600/690 **VAC** и 12, 24, 48, 110 **VDC**).

Реле. Реле подразделяются на промежуточные реле, реле времени, реле контроля тока, напряжения, температуры, реле защиты электродвигателей (от обрыва фаз, к.з., перегрузки по току, перегрева) и др. Основное внимание ниже отводится промежуточным реле, широко используемым в щитовом оборудовании. Характеристики др. типов реле указаны в каталогах отечественных производителей реле (ООО «Реле и автоматика», ОАО «Завод Электропульт», ОАО «Кашинский завод электроаппаратуры», ООО «Элефант» и др.), а также в каталогах зарубежных фирм (**FINDER, Rockwell/ Allen Bradley, Omron, Relco** и др.).

Основными характеристиками промежуточных реле являются: напряжение питания, число и тип контактов, максимально допустимый ток через контакты реле (максимальное напряжение переключения), наличие/отсутствие индикации включения/отключения, габариты, вид монтажа (печатная плата или розетка), число циклов срабатывания при полной нагрузке, время срабатывания, напряжение изоляции между обмоткой и контактами, допустимая температура окружающей среды, степень защиты по МЭК и др.

Напряжение питания постоянного тока (по исполнениям) у промежуточных реле составляет: 6, 9, 12, 15, 24, 27, 48, 60, 110, 220 **VDC** (реже используются 5, 80, 125 **VDQ**). Напряжение питания переменного тока (по исполнениям) составляет: 6, 12, 24, 36, 40, 48, 60, 110, 127, 220, 380 **VAC** (реже используется 550 и 660 **VDC**). Напряжение питания реле, устанавливаемых на печатные платы, составляет: 5, 6, 7, 9, 12, 14, 18, 21, 24, 28, 36, 48, 60, 90, 100 **VDC**.

Контакты реле делятся на замыкающие (НО, NO), размыкающие (НЗ, NC) и переключающие (П, CO). Число контактов составляет (по исполнениям реле) от 1 до 8. Наибольшее применение в схемах автоматизации находят реле с переключающими контактами (до 4П).

Коммутируемое напряжение постоянного и переменного тока для большинства отечественных реле составляет 12 (24).. 250 В (для реле серий РПЛ, РЭВ от 24 до 660 В). Максимальное коммутируемое напряжение реле зарубежных фирм составляет 250 В и 400 В. Механический ресурс реле (число циклов срабатывания) составляет для различных типов промежуточных реле от $10 \cdot 10^6$ до $50 \cdot 10^6$. Для некоторых реле зарубежных фирм при заказе оговаривается материал контакта и контакта AgSnO_2 и др.). Время срабатывания/возврата контактных групп составляет порядка 10 мс. Напряжение изоляции между обмоткой и контактами составляет от 2000 до 4000 VAC.

Для удобства эксплуатации при замене реле используются розетки для установки (монтажа) на DIN-рейку, панель или печатную плату. На рис. 3.7 показано реле, состоящее из вставного блока серии 55.34 и розетки серии 94 фирмы **FINDER**.

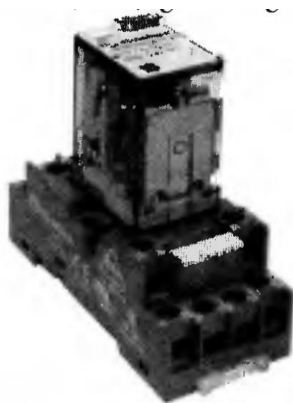


Рис. 3.7

Диапазон рабочих температур отечественных реле составляет от $\sim(20 \dots 45^\circ\text{C})$ до $+(40 \dots 55^\circ\text{C})$. Для реле западных фирм этот диапазон составляет от -40 до $+70^\circ\text{C}$ ($+85^\circ\text{C}$).

В табл. 3.1 (с. 333) приведены основные характеристики промежуточных реле.

Электромагнитные пускатели. Пускатели представляют собой силовые реле и применяются в схемах управления (пуска) электродвигателей приводов, вентиляторов, включения/отключения нагревателей и другого силового оборудования путем непосредственного подключения к сети. При наличии электротепловых

реле пускатели осуществляют защиту электродвигателя от перегрузки (диапазон регулирования номинального тока несрабатывания составляет от 0,1...0,14 до 90...125 А и более в зависимости от типа теплового реле).

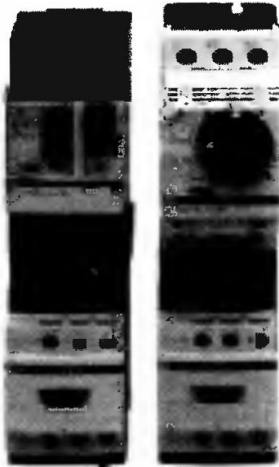


Рис. 3.8

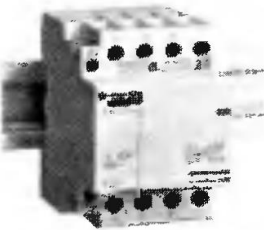


Рис. 3.9

Напряжение питания катушек отечественных пускателей при частоте 50 Гц составляет: 24, 36, 40, 48, 110, 127, 220, 230, 240, 380, 400, 415, 500 и 660 **VAC**. При частоте 60 Гц напряжение составляет 24, 36, 48, 110, 220, 380, 415, 440 **VAC**.

Пускатели подразделяют по назначению на реверсивные и нереверсивные, а также по наличию или отсутствию теплового реле. К характеристикам пускателя также относят число и тип контактов, степень защиты (IP), класс износостойкости, климатическое исполнение и др.

Среди отечественных пускателей можно отметить ПМ12 (исполнение ПМ12-О10xxx, -025xxx, -040xxx, -Об3xxx, -125xxx). Исполнение ПМ12-010 имеет 3 главных контакта НО и 2 вспомогательных контакта (1НО, 1НЗ). Исполнение ПМ12-025 имеет число вспомогательных контактов (НО и НЗ) от 2 до 10 и т. д.

Пускатели серии ПМЕ-200 (ПМЕ-211, -212, -213, -214, -221, -222) применяются для дистанционного пуска непосредственным подключением к сети, остановки и реверсирования трехфазных асинхронных электродвигателей мощностью 11 кВт и более при напряжении до 660 **VAC** (ПМЕ-213 и ПМЕ-214). Номинальное напряжение питания катушек пускателя составляет 24, 36, 42, 48, 110, 127, 220, 380 и 500 **VAC**.

Исполнение пускателей по номинальному току тепловых реле РТТ-1; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25 А. Число главных контактов — 3НО, число вспомогательных контактов от 1НО (ПМЕ-211) до 4НО+4НЗ (ПМЕ-214).

Пускатели ПМА-3000 на номинальный ток до 40А выпускаются на напряжение питания катушек: 24,36,40,42,48,110,127, 220,230,240, 380,400,415 440,500 и 660В. Пускатели используются с тепловыми реле РТТ-211.

В табл. 3.2 (с. 334) приведены характеристики трехполюсных электротепловых токовых реле с температурной компенсацией ОАО «Кашинский завод электроаппаратуры».

Модульные пускатели зарубежных фирм (**ABB**, **Schneider Electric** и др.) состоят из 2...3-х элементов, к которым относятся автоматический выключатель, рубильник с предохранителем, контактор, электронное реле перегрузки, вспомогательные контакты, элементы механической блокировки и др.

На рис. 3.8 представлен пускатель с контактором фирмы **Schneider Electric**.

Фирма **ABB** выпускает трехполюсные контакторы на мощность от 4 кВт (9 А) до 400 кВт (750 А) при напряжении 400 **VAC** и от 4 кВт (7 А) до 400 кВт (700 А) при напряжении 690 В. Также выпускаются 4-х полюсные контакторы на ток от 25 А до 125 А. При заказе следует указать типоряд контактора, номинальный ток, количество главных (силовых) и вспомогательных контактов.

Фирма **Schneider Electric** производит 4-полюсные пускатели на 400 **VAC ce-puu** LC1- Kxx на мощность от 0,37 кВт (6 А) до 900 кВт (1800 А). Другая серия пускателей фирмы— LC1-СТ контакторы. Модульные контакторы серии СТ (рис. 3.9) коммутируют токи до 100 А (напряжение 230.. 240 **VAC**). Количество полюсов (от 1 до 4) достигается компоновкой модулей шириной 9 мм. Однополюсный контактор состоит из двух модулей, имеет 1НО контакт, номинальный ток 25 А. 2-полюсный контактор СЕ в зависимости от номинального тока от 16 до 100 А состоит из 2,4 или 6 модулей и имеет 2 НО контакта. 3-х полюсный контактор состоит из 4-х или 6-ти модулей на ток 25, 40 или 63 **VAC**, имеет 3 НО или 2 НО+1 НЗ контактов. 4-полюсный контактор состоит из 4 или 6 модулей (25 А или 63 А), или 12 модулей (100 А). Число контактов: 4 НО, 4 НЗ или 2 НО+2 НЗ. Выпускается серия 2-, 3- и 4-полюсных контакторов серии СТ с ручным управлением. Эти контакторы позволяют вручную коммутировать цепи до 63 А. При этом они оборудованы переключателем на 3 положения: автоматический пуск, ручной пуск и удержание, останов. Для контакторов серии СТ выпускаются вспомогательные устройства: вспомогательные контакты

(НО+НЗ), реле времени (выдержка при включении, подача напряжения на определенное время и др.), модуль подачи командного импульса длительностью 250 мс, модуль ограничения напряжения в цепи управления и др.

Кнопки и кнопочные посты

Кнопки управления характеризуются следующими основными показателями:

- 223) с фиксацией или без фиксации (с пружинным возвратом);
- 224) тип и число контактов (НО, НЗ) в контактной группе;
- 225) с подсветкой или без подсветки;
- 226) размеры, форма и цвет кнопки;
- 227) ток и напряжение коммутации;
- 228) тип подключения (под винт, пайка, разъем и т. д.);
- 229) кнопка аварийного останова с фиксацией, кнопка «под ключ»;

Кнопки зарубежных фирм с целью унификации элементов выпускаются составными в виде двух модулей (непосредственно кнопка и контактная группа), а в случае кнопки с подсветкой в виде трех модулей (модуль светодиода, контактная группа, кнопка). Также выпускаются кнопки с подсветкой и без подсветки в сборе. В случае подсветки кнопки напряжение питания составляет 12...24 **VDC**, 48...120 **VAC**, 230... 240 **VAC**. Ресурс кнопок составляет порядка 10-10⁶ циклов. На рис. 3.10 показана составная кнопка с подсветкой типа XB6 DW 3B5B фирмы **Schneider Electric**.

Кнопочные посты управления в сборе применяются для установки «по месту» (вне щита) и состоят из одной, двух («пуск» и «стоп»), трех кнопок или из двух кнопок и сигнальной лампы.



Рис. 3.10



Рис. 3.11

В табл. 3.3 (с. 335) приведены основные характеристики кнопок и кнопочных постов.

Переключатели

Аналогично кнопкам переключатели, используемые в системах управления, могут быть как составными (ручка переключателя и контактный блок, а при наличии подсветки также блок светодиода), так и в сборе (рис. 3.11).

Основные характеристики переключателей:

- 230) число положений: 2-, 3-и 4-позиционные;
- 231) наличие или отсутствие фиксации;
- 232) тип и количество контактов контактного блока;
- 233) наличие или отсутствие подсветки;
- 234) тип переключающего устройства (ручка, ключ);
- 235) цвет ручки переключателя;
- 236) габаритные размеры и др.

В табл. 3.4 приведены характеристики ряда переключателей фирм **Schneider Electric** и **Rockwell Automation/Allen Bradley**.

Сигнальная арматура

Промышленностью РФ выпускается сигнальная арматура различных типов: АЕ, АМЕ, АС-1201, АС-220, АСЛ, АВР, АСКМ и др. с лампами серии КМ, ТЛ, неоновыми и лампами накаливания на напряжения 24 **VDC**, 220/380 **VAC**.

Однако, в связи с ограниченным ресурсом этих ламп (ресурс ламп накаливания составляет около 3000 ч, неоновых — 20000 ч) в промышленности находят применение светодиодные сигнальные лампы серии СКЛ. Ресурс светодиодных ламп от 25000 до 100000 ч. К достоинствам светодиодных ламп также относятся малое потребление, высокая ударо- и вибропрочность, малое тепловыделение, высокая цветовая эффективность и малые габариты. С учетом замены лампы серии СКЛ выпускаются в конструктивном исполнении, с цветом свечения, типом цоколя в соответствии с заменяемыми сигнальными арматурами. СКЛ выпускаются 3-х цветов: красный, зеленый, желтый. По заказу выпускаются светодиодные лампы белого, синего и оранжевого цветов.

На рис. 3.12 приведен общий вид светодиодной лампы СКЛ-12.



Рис. 3.12



Рис. 3.13

В табл. 3.5 приведены характеристики отечественных светосигнальных ламп.

Сигнальные блоки подразделяются на блоки постоянного свечения и блоки со вспышкой. Сигнальный блок состоит из базового блока и 1...5-ти светосигнальных блоков (цвет, л и н з ы по заказу) или одного звукового блока (рис. 3.13).

В табл. 3.6 приведены характеристики светодиодных сигнальных ламп, сигнальных блоков и светосигнальных колонн зарубежных фирм.

Для отображения световой буквенно-цифровой предупредительной и аварийной сигнализации, а также с целью повышения информативности сигнала на лицевых панелях щитов устанавливаются световые табло. В табл. 3.7 (с. 338) приведены характеристики световых табло ОАО «Завод Электропульт».

Автоматические выключатели

Автоматические выключатели предназначены для питания и защиты от перегрузок и коротких замыканий электрических цепей с потребителями различного назначения, в том числе для пуска и останова электродвигателей (рис. 3.14).

Основные характеристики автоматических выключателей:

- 237) число полюсов;
- 238) номинальный ток, А;
- 239) номинальное напряжение, В;
- 240) минимальное рабочее напряжение, В;
- 241) отключающая способность, кА;
- 242) число допустимых циклов срабатывания;
- 243) время срабатывания, мс;

- 244) наличие подсветки;
- 245) габаритные размеры, мм и др.

Минимальное время срабатывания требуется при токе короткого замыкания, возникающем при коротком замыкании фазного и заземленного нулевого проводников. Ток перегрузки, который является следствием подключения к сети слишком большого числа потребителей, также требует быстрого отключения от сети. Токи утечки (порядка 30 мА при прямом контакте и 300 мА при косвенном контакте), возникающие при нарушении изоляции или контакте с токоведущими частями электрооборудования, вызывают срабатывание дифференциальных автоматических выключателей (рис. 3.15).

В табл. 3.8 (с. 338) приведены основные технические характеристики отечественных и зарубежных автоматических выключателей.

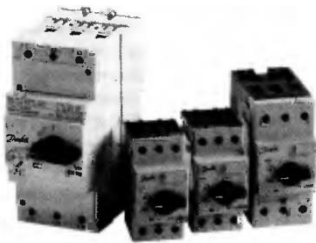


Рис. 3.14



Рис. 3.15

3.3. Промышленные компьютеры (ПК)

3.3.1 Архитектура и отличительные особенности ПК

Промышленный компьютер (ПК) представляет собой PC-совместимую платформу специального исполнения, которое гарантирует повышенную надежность в жестких условиях промышленной эксплуатации. К таким неблагоприятным производственным условиям относятся повышенные температура и влажность, наличие вибраций и ударов, запыленность и задымленность помещений, наличие электропроводящих частиц (графитовая и угольная пыль) и др.

Архитектура ПК отличается от архитектуры офисных компьютеров наличием сторожевого таймера, энергонезависимой памяти, дополнительными интерфейсами и конструктивным исполнением.

Сторожевой таймер — это устройство, выполняющее автоматическую перезагрузку ПК или вырабатывающее немаскируемое прерывание при зависании (сбое) программы. В сторожевой таймер записывается значение определенного интервала времени, и таймер производит обратный отсчет. При нормальной работе программа периодически восстанавливает исходное значение интервала времени, и таймер не успевает обнулиться. В случае сбоя программы, когда она перестает

обращаться к таймеру, последний обнуляется, и происходит прерывание или перезагрузка операционной системы. Время перезагрузки может составлять от 1 до 250 с.

Энергонезависимая память — участок памяти с быстрым доступом, практически без ограничений по числу циклов перезаписи, и сохраняющий информацию при отключении питания. Эта статическая память, объем которой в современных ПК непрерывно возрастает, используется для хранения наиболее важной информации.

Современные твердотельные накопители (флэш-диски) имеют время произвольного доступа менее 0,1 мс, скорость обмена до 16 Мбайт/с, число циклов перезаписи до 1 млн, встроенную функцию EDC/ECC (коррекция ошибок), время наработки на отказ не менее 1 млн часов. Емкость твердотельных накопителей не много уступает емкости накопителей на жестких магнитных дисках (НЖМД).

Конструктивные особенности ПК призваны обеспечить надежную работу ПК в широком диапазоне температур, защиту от атмосферных и механических внешних воздействий, возможность круглосуточной работы в цеховых условиях, низкий уровень излучения и помех, возможность расширения и интеграции с системой управления, удобство обслуживания и др.

Современные ПК способны работать в диапазоне температур от 0 до +50 °С, а отдельные ПК от -10 до +60 °С (нижний предел обусловлен качеством изображения ЖК мониторов, а верхний — допустимой рабочей температурой процессоров). Предельная влажность окружающей среды ПК составляет 95%. Для предотвращения перегрева ПК оснащены вентиляторами и сигнализатором температуры в зоне процессоров.

Защита от воздействий окружающей среды согласно международному стандарту IEC 529 указывается в паспорте на ПК. Как правило, степень защиты по лицевой панели для операторских ПК соответствует IP65 (полная защита от пыли и струй воды, выбрасываемых с произвольного направления). Такая защита обеспечивается пленочным исполнением клавиатуры передней панели ПК, наличием сенсорного экрана, герметизацией стыков с помощью резиновых уплотнений. При необходимости защиты не только передней панели, но и всего корпуса ПК последний должен устанавливаться в герметичный шкаф управления с системой терморегулирования (например, фирм **Schroff**, **Rittal** и др.)

Существуют ПК полностью герметичные (без вентиляторов и вентиляционных отверстий в корпусе), с малым энергопотреблением и естественным охлаждением с отводом тепла в окружающую среду через корпус.

Защита от электромагнитных помех и низкий уровень излучения обеспечивается выбором материала корпуса — специальных сортов стали и лицевой панели (алюминий). Излучение снижается при применении жидкокристаллических мониторов.

Способность ПК противостоять вибрационным и ударным нагрузкам обеспечивается рядом Конструктивных решений, а именно:

246) многоточечное крепление сменных плат;

247) амортизирующее (антивибрационное) крепление жесткого диска;

248) использование твердотельных накопителей (флэш-дисков) и процессоров с низким энергопотреблением и не нуждающихся в охлаждении вентиляторами. Высокая надежность ПК обеспечивается надежностью отдельных элементов, и резервированием, мерами повышения долговечности отдельных узлов ПК. Так, в ПК используются резервированные блоки питания с возможностью «горячей замены» (без выключения ПК), резервированные накопители на жестких дисках с RAID- массивами (хранение информации одновременно на нескольких носителях), пылеулавливающие фильтры и др. Корпус ПК, выполненный из стали толщиной до 1,25 мм, дополнительно усилен ребрами жесткости, имеет запирающуюся переднюю крышку, закрывающую доступ к отсекам накопителей, тумблерам и кнопкам, портам USB и др., что способствует повышению надежности функционирования ПК. Взрывозащищенные ПК имеют взрывозащищенные ЖК дисплеи, клавиатуру и мышь, соединенные вместе с помощью волоконно-оптических кабелей.

Возможность расширения является важной характеристикой ПК, поскольку позволяет в одном корпусе дополнительно устанавливать различные платы ввода/вывода, контроллеры, коммуникационные модули и др. Для этого используются многослотовые (до 20 слотов) высоконадежные объединительные платы. На системной шине ПК могут функционировать различное число плат формата ISA и PCI. Так, системная шина ISA допускает установку до 18 плат, для расширения шины PCI используются активные объединительные платы с дополнительными мостами. Объединительная плата за счет сегментации системной шины позволяет устанавливать на ней разные процессорные платы, так что на одной плате может быть установлено до 4 автономных компьютеров. Все это увеличивает функциональные возможности современных ПК.

Поскольку процессорная плата, установленная в один из слотов объединительной платы, может быть легко заменена без традиционной и трудоемкой разборки компьютера, что характерно для офисного компьютера, ремонт и обслуживание ПК существенно упрощаются.

Промышленные компьютеры выпускаются в различных формфакторах: формате PICMG (PCI+ISA), PCI, ISA, AT и др., полного или половинного размера, поддерживают различные системные шины (ISA, PCI, CompactPCI, MicroPCI). В ПК находят применение процессоры Intel, AMD, IBM, Motorola и ряд др. В качестве мониторов ПК используются жидкокристаллические мониторы, имеющие по сравнению с мониторами на ЭЛТ ряд неоспоримых преимуществ, в том числе малое энергопотребление, нечувствительность к внешним электромагнитным полям и низкий уровень электромагнитного излучения, безвредность для глаз человека, меньшие габариты и вес и др. К недостаткам следует отнести несколько худшую цветопередачу, большую стоимость. Угол обзора современных ЖК-дисплеев в ПК составляет 160... 170 градусов, размер экрана от 5,7" до 32", наработка на отказ до 100000 ч. В зависимости от условий применения выпускаются ПК следующих классов.

Рабочая станция (WS — Workstation)

Рабочая станция (рис. 3.16) имеет:



Рис. 3.16

- встроенный ЖК монитор;

Отличительные характеристики ПК класса Rack PC:

- 249) тип процессоров: Pentium 4, Pentium III, Celeron D и др;
- 250) число слотов расширения: (3...12)хPCI, (1...8)хISA;
- 251) оперативная память: 128... 1024 МБ;
- 252) допустимая рабочая температура: 0...60°C.

Остальные характеристики приведены в табл. 3.9 (с. 340).

BoxPC

BoxPC (рис. 3.19) — промышленные компьютеры блочного (компактного) исполнения, устанавливаемые внутри щитов и пультов, на стене, в коммутационных шкафах или непосредственно на оборудовании. За счет малых габаритов эти ПК занимают ограниченное пространство. В классе BoxPC выпускаются различные

«бортовые вычислители» или спецЭВМ для установки в составе бортовых систем управления на наземном, морском и воздушном транспорте. Эти ПК работают при температурах от - 40 до +65°C (иногда и более), при вибрациях до 10 g (20...2000 Гц), при одиночных ударах до 100 **g** и более и многократных ударах до 20 **g**. За счет высокой герметичности эти ПК работают при влажности воздуха до 100% и пониженном атмосферном давлении до 5 мм рт. ст. На рис. 3.19 показан VohPC типа UNO-2176 фирмы **Advantech**. Отличительные характеристики ПК класса VohPC:

253) тип процессоров: Pentium 4, Pentium III, Celeron D;

254) процессорная плата: PICMG, ISA, PCI, ATX;

255) оперативная память: 128Мбайт...1 Гбайт;

256) твердотельный диск: СотраПФлэш, DiskOnChip;

257) число слотов расширения: (1...3)xISA, (3...7)xPC1;

Остальные характеристики приведены в табл. 3.9

TowerPC

TowerPC (рис. 3.20) — ПК настольного исполнения для установки на столах в операторских помещениях и пунктах управления. Эти ПК также могут использоваться в качестве серверов или рабочих станций.

Отличительные характеристики ПК класса TowerPC:

258) тип процессоров: Pentium, Celeron, PowerPC и др.;

259) процессорная плата: PICMG;

260) число слотов расширения: (2...4)xISA, (4...6)xPC1;

261) оперативная память: от 512 МБ.

Остальные характеристики приведены в табл. 3.9.

Переносные ПК (серия «mobile» или «portable»)

Переносные ПК представляют собой портативную переносную рабочую станцию (рис. 3.21). ПК имеет встроенный TFT ЖК-дисплей с изменяющимся углом наклона



Рис. 3.19



Рис. 3.20



Рис. 3.21

размером 12,1"или 14,1 "по диагонали (разрешение 1024x768 точек). Предназначен для работы в полевых условиях, на удаленном объекте и др., где невозможно или затруднено применение обычных ПК.

Отличительные характеристики переносных ПК:

- 262) тип процессора Pentium 4, Celeron D;
- 263) число слотов расширения: 8xISA, 4xISA/PCI;
- 264) оперативная память: 256 Мбайт...2 Гбайт;
- 265) откидная полнофункциональная клавиатура с манипулятором Touch Pad.

Остальные характеристики приведены в табл. 3.9.

Промышленный планшетный компьютер

Промышленный планшетный компьютер (рис. 3.22) предназначен для эксплуатации в качестве носимого (вес 2 кг) средства сбора, обработки и отображения информации (ОС Windows 2000/XP, Linux) в полевых условиях и в промышленных цехах с повышенной влажностью воздуха, конденсатом, пылью, пониженным давлением, пониженной или повышенной температурой, при наличии радиочастотных и электромагнитных полей. Планшетный ПК (270x197x46 мм) оснащен восемью программируемыми клавишами (кнопками) управления и может быть оперативно установлен в транспортное средство с помощью специального кронштейна и выполняет функции как бортового, так и носимого компьютера. Жесткий диск установлен в съемный модуль с применением специальных амортизаторов.



Рис. 3.22

ПК сохраняет работоспособность в условиях сильных радиочастотных электромагнитных полей напряженностью до 30 В/м и частотой до 4000 МГц, а также магнитных полей промышленной частоты напряженностью до 1000 А/м. Корпус изделия выполнен путем литья из алюминий-магниевого сплава, что обеспечивает высокую стойкость к внешним механическим воздействиям (вибрация и удары).

Все разъемы изделия снабжены резиновыми заглушками для обеспечения защиты от влаги и пыли. Ввод информации и управление осуществляются главным образом с помощью сенсорного экрана и восьми функциональных клавиш, которые могут быть запрограммированы на вызов необходимых прикладных программ. Воз-

можно подключение внешней промышленной клавиатуры через порт USB. ПК оснащен аккумуляторной батареей, обеспечивающей автономную работу в течение от 2 до 4 часов.

Планшетный ПК имеет порты ввода/вывода: RS-232C, USB 2.0, LAN (опция), COM-порт, металлический байонетный разъем электропитания, два слота PCMCIA типа II (опция). Через COM-порт может быть подключен расширитель портов, на котором имеются четыре USB 2.0 (два из них с нестандартными разъемами), два RS-232C, LAN, Modem, VGA, Mic-in, Audio-out.

Промышленный карманный компьютер

Промышленный защищенный карманный компьютер (рис. 3.23) предназначен для эксплуатации в качестве навигационного устройства (в комплекте с GPS-приемником и навигационным программным комплексом), а также в качестве носимого (вес 450 г) средства сбора, обработки и просмотра информации (ОС Windows Net 4.2, Microsoft Windows Mobile 2003) в полевых условиях и промышленных цехах с повышенной влажностью воздуха, пылью, пониженным давлением, повышенной температурой, в условиях вибраций и ударных нагрузок, а также в качестве бортового компьютера в транспортных средствах.

Так, сверхмалые габариты промышленного карманного компьютера «Кулон» НПО «Техника-сервис» (90x150x33, мм) и масса (450 г) устройства обеспечивают высокий уровень мобильности и доступности вычислительных ресурсов. Карманный компьютер имеет разрешение экрана VGA (640x480, 256 цветов) и позволяет отображать больший, по сравнению с другими карманными компьютерами, объем информации. Это дает дополнительные преимущества при использовании устройства для навигации, работы с электронными таблицами и Интернетом.



Рис. 3.23

Карманный компьютер «Кулон» имеет слот PCMCIA, последовательный порт RS-232, выведенный на внешний разъем DB-9 на корпусе изделия, и USB 1.1, что дает возможность подключения широкого спектра периферийного оборудования

(внешних накопителей, ЦАП/АЦП и т. д.), оснащенного драйверами под соответствующие операционные системы. Компьютер оснащен штатным аккумулятором высокой емкости (1800 мА-ч), обеспечивающим длительность автономной работы изделия до 13 ч (в зависимости от яркости подсветки и ресурсоемкости приложений). На переднюю панель выведена клавиша включения/выключения беспроводного интерфейса, для удобства использования и экономии заряда батареи (продление срока автономной работы). Корпус изделия выполнен путем литья из алюминий-магниевого сплава, что обеспечивает высокую стойкость к внешним механическим воздействиям, таким как вибрации и удары. Все разъемы компьютера защищены резиновыми заглушками для обеспечения их защиты от влаги и пыли. Ввод информации и управление осуществляется с помощью сенсорного экрана и четырех функциональных клавиш, которые могут быть запрограммированы на вызов отдельных баз данных, программных средств и пр. Возможно подключение внешней промышленной USB-клавиатуры. Компьютер комплектуется станцией для связи с любым компьютером, оснащенным шиной USB 1.1.

3.3.2 Технические характеристики промышленных компьютеров

В табл. 3.9 приведены технические характеристики представительных моделей (типов) ПК ряда фирм, необходимых для выбора ПК в соответствии с требованиями конкретного производства.

Отсутствующие в ряде ячеек таблицы данные (тип процессора, HDD и др.) при заказе ПК выбираются пользователем. Ряд характеристик, присущих базовым конфигурациям, опущены, так как являются общими для ПК. К таким характеристикам относятся:

266) операционная система: в ПК используются ОС Microsoft Windows 98/2000/NT7

XP/XP Embedded/CE.NET, MS DOS 6.22;

267) материнская плата: ASUS компании **ASUS**;

268) дисковод FDD 1,44 Мбайт предустановлен;

269) накопитель CD/DVD предустановлен;

270) органы управления на передней панели: клавиши питания, RESET, индикаторы

питания, разъемы клавиатуры, мыши и др.

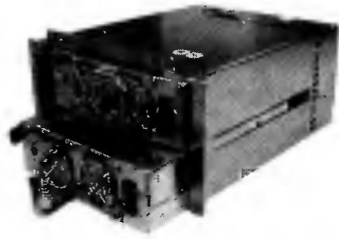


Рис. 3.24

Отдельные классы ПК имеют конструктивные особенности. Так, к особенностям корпуса Box PC относятся дополнительные планки для крепления ПК в шкафу, на стене и пр. Корпуса RACK PC, WS и др. имеют антивибрационное крепление плат и жестких дисков, дверцы с ключом для ограничения доступа к кнопкам управления и дисководам.

Блоки питания ПК обладают высокой надежностью и долговечностью, поддерживают PFC-функцию (Power Factor Correction — режим коррекции напряжения питания), защиту от перенапряжений и коротких замыканий по выходу (при повышении выходного напряжения часть нагрузки отключается, а при коротком замыкании отключается весь блок питания). Кроме того, блоки питания имеют тепловую защиту: при повышении температуры до 90...110°C блок питания отключается.

Система резервирования питания ПК предусматривает размещение в корзине от 2 до 4 блоков питания с функцией «горячей» замены. При этом общая нагрузка равномерно распределена по блокам питания так, что каждый из блоков нагружен на 50% мощности (при двух блоках) или на 1/3 мощности (при трех блоках питания) и т. д. При выходе одного из блоков питания нагрузка автоматически перераспределяется на оставшиеся работоспособные блоки питания. Неисправный блок может быть заменен без остановки работы ПК. На рис. 3.24 показан общий вид блоков питания, а в табл. 3.11 (с. 347) приведены основные технические характеристики блоков питания фирмы **ICP Electronics**.

TFT ЖК-мониторы имеют различные размеры по диагонали и соответственно различное оптимальное разрешение изображения (табл. 3.13, с. 348).

Достоинства ЖК-дисплеев определяются их характеристиками:

- 271) частота развертки по горизонтали 30...97 кГц;
- 272) отсутствие мерцания, хорошая геометрия изображения;
- 273) низкое энергопотребление;
- 274) высокая стойкость к вибрациям и ударам;
- 275) отсутствие рентгеновского излучения;
- 276) высокие яркость и контрастность;

277) малые размеры и вес;
исполнения с сенсорным экраном.

3.3.3 Стандарты шин расширения

Промышленная шина расширения (expansion bus) прошла большой путь развития в направлении увеличения разрядности передаваемых данных, скорости обмена данными, конструктивных усовершенствований и стандартизации.

К первым промышленным шинам расширения относятся шины ISA, EISA, MicroPC. В начале 90-х годов разработаны шины PCI, CompactPCI, VME и др.

Шина расширения ISA (Industry Standard Architecture) является 8/16 разрядной шиной (16 бит данных и 24 бит адреса). Скорость передачи данных в зависимости от разрядности — 8/16 Мбайт/с. Тактовая частота — 8 МГц. Несмотря на низкую скорость обмена, шина имеет ряд достоинств, к которым относятся поддержка до 20 плат расширения. Также процессорные платы на шине ISA в 5..6 раз дешевле аналогичных плат на др. системных шинах. Шина ISA используется до настоящего времени при управлении процессами, где не требуется высокого быстродействия.

Шина расширения EISA (Extended Industry Standard Architecture) — расширенная ISA-шина, разработанная по инициативе фирмы **Compaq** в 1988 г. Это стандартизованная 32-разрядная синхронная шина с тактовой частотой 8 МГц. Максимальная скорость обмена в пакетном режиме (длина пакета 1024 байта) составляет 32 Мбайт/с. Допускается установка до 8 слотов и плат расширения.

Шина расширения PCI (Peripheral Component Interconnect — шина соединения периферийных компонентов) — разработана фирмой Intel в 1992 г. и представляет собой 32/64-разрядную синхронную, процессорно-независимую шину. Пропускная способность при тактовой частоте 33 МГц составляет 132 Мбайт/с (32-разрядная) и 264 Мбайт/с (64-разрядная). При тактовой частоте 66 МГц пропускная способность в 2 раза больше (264/528 Мбайт/с). Число слотов расширения — 4, число контактов коннектора — 188. Для подключения к шине более 4-х периферийных устройств используются мосты PCI (PCI Bridge). Две шины PCI соединяются одноранговым мостом. Для подключения др. шин (ISA, CompactPCI) используются специальные мосты. Увеличенное число шин расширения PCI используется в серверах баз данных. Шина PCI поддерживается организацией PCISIG (PCI Special Interest Group). Стандартная спецификация шины - PCI v2.1. В 1995 г. для поддержки шины PCI создан консорциум PICMG (PCI Industrial Computer Manufacturers Group).

Шина PCI-X создана для увеличения пропускной способности за счет повышения разрядности данных. Шина PCI-X является 64-разрядной шиной. При тактовой частоте 66 МГц пропускная способность составляет от 533 до 4356 Мбайт/с.

Шина Industrial PCI (IPCI) предложена в 1995 г. рядом европейских фирм. Допускает размещение на пассивной объединительной плате до 5 плат PC1 в формате 3U или 6U.

Шина PCI+ISA предложена в 1995 г. консорциумом PICMG для интеграции плат ISA и PCI на пассивной объединительной плате. Число плат расширения — до 4.

Шина CompactPCI (CPCI) разработана фирмой **Intel** и консорциумом PICMG в 1995 г. для увеличения числа слотов расширения и размещения плат размером 3U и 6U. Стандарт шины — IEEE 1101.11. Тип шины CPCI — синхронная, мультиплексируемая, процессорно-независимая шина разрядностью 32/64. Пропускная способность шины соответственно 133/266 Мбайт/с. Тактовая частота 66 МГц. Число коннекторов на плате 3U — 1, на плате 6U — 2. Коннекторы — пятирядные 235-штырьковые с шагом между контактами 2 мм. За счет высокого качества системного разъема (стандарт МЭК 1076-4-101) удалось увеличить число слотов расширения по сравнению с шиной PCI с 4 до 8. Контакты цепей питания разъема удлиненные. При установке модуля в первую очередь подключается питание, а при выемке модуля питание сохраняется дольше, за счет чего облегчается «горячая» замена модуля. Для увеличения числа слотов до 20 используются мосты PCI. Спецификация CPCI использует процессоры Pentium, Alpha, Power PC, AMD и др. С процессорами Pentium используются ОС MS DOS, Windows 95/98/NT, OS/2, UNIX, Linux. С процессорами Power PC — ОС AIX, Solaris, MacOS и др. Наиболее популярными ОС жесткого реального времени являются ОС OS/2, QNX, VxWorks. Основными производителями компонентов CPCI являются фирмы **Motorola, DEC, Force, PEP Modular Computers, Inova Computers** и др. Предполагается, что шина CPCI в будущем заменит шину ISA.

Шина PXI (PCI extensions for Instrumentation) разработана фирмой **National Instruments** на базе шины CompactPCI и в тех же конструктивах. Представляет собой модульную инструментальную платформу для высококачественных измерений.

Шина VMEbus (Versa Module Eurocard bus) разработана группой компаний во главе с фирмой **Motorola**. Разрядность адреса шины — 16/32/64 бит, разрядность

данных — 8/16/32/64 бит. Скорость передачи данных — 80 Мбайт/с. Шина поддерживает установку до 21 плат расширения. Стандарт шины — ANSI/VITA 1-1994.

Стандарты PCI 104 и PC/104 Plus разработаны для уменьшения габаритов и потребления энергии аппаратно-программным комплексом на шинах расширения ISA (PC/104) и PCI (PC/104 Plus). Стандарт МЭК — P996 1 Standard for Compact Embedded — PC Modules (стандарт для компактных PC-модулей). Стандарт ориентирован на встраиваемые системы, работающие в жестких условиях производства. Габариты плат уменьшен до размера 3,6"х3,8" (91,5х96,5 мм). Высота одного модуля — 24 мм, а два состыкованных модуля занимают высоту 2". Прочные и надежные штырьковые 40- и 64-контактные разъемы (общее число контактов 104) заменили стандартные ламельные разъемы PC. Стандарт PC/104 полностью совместим с 8/16 разрядной шиной ISA и отличается только типом коннектора и нагрузкой линий связи. Стандарт PC/104 Plus совместим с шиной PC1 и имеет дополнительный коннектор для шины PCI. Диапазон температур модулей в стандарте PC/104 и PC/104 Plus составляет -40...+85°C (в отдельных спецификациях -65...+125°C). В этих стандартах выпускаются интерфейсы Ethernet, ArcNet, CAN, Profibus, Interbus и др. Стандарт PC/104 поддерживается консорциумом PC/104, который объединяет около 50 фирм.

Формат MicroPC разработан фирмой **Octagon System**. Промышленные компьютеры, контроллеры и модули формата MicroPC применяются в диапазоне температур -40...+85°C, имеют уменьшенные размеры плат (124,5х114,3 мм). За счет 4-точечной системы креплений плат повышается механическая прочность изделий в формате MicroPC. Платы выдерживают вибрацию до 5 **g** и ударные нагрузки до 20 **g**. Нарботка на отказ плат MicroPC составляет до 200000 часов. Формат MicroPC полностью совместим с шиной ISA, а также используется с поддержкой шины PCI. Напряжение питания модулей формата MicroPC составляет 5 **VDC**.

3.3.4 Операционные системы реального времени (ОСРВ)

Операционная система (ОС) — Operating System (OS) — комплекс программ, обеспечивающих управление основными ресурсами вычислительной системы компьютера (процессора, оперативной памяти, периферийных устройств). ОС является основной частью системного программного обеспечения. К основным функциям операционных систем относятся ведение файловой системы, распределение оперативной памяти, динамическая компоновка выполняемых программ, обработка

прерываний, обеспечение многозадачной работы, взаимодействие с оператором, сетевое взаимодействие и другие функции.

Операционную систему составляют монитор, загрузчик, супервизор, планировщик и набор системных обслуживающих программ (утилит). При включении компьютера операционная система загружается в первую очередь и далее служит платформой и средой для дальнейшей работы компьютера.

Операционная система реального времени (ОСРВ), используемая в системах контроля и управления, имеет отличия от обычной ОС. По определению, данному Мартином Тиммерманом, система реального времени — это система, которая предсказуемо (в смысле времени реакции) реагируют на не предсказуемые (по времени появления) внешние события [3.17].

Таким образом, система работает в режиме реального времени, если ее быстродействие адекватно скорости протекания физических процессов в системе контроля или управления. При этом необходимо соотносить быстродействие контроллеров, работающих под этой ОСРВ, с различной периферией и другим оборудованием АСУТП.

Основными требованиями, предъявляемыми к системам реального времени, относятся: предсказуемость, возможность параллельного выполнения нескольких задач (многозадачность), возможность обеспечения механизма наследования приоритетов и безотказность работы в течение длительного времени.

Различают системы жесткого и мягкого реального времени. Системой жесткого реального времени (hard) называется система, неспособность которой обеспечить реакцию на внешние события в заданное (минимальное) время, квалифицируется как отказ.

К системам мягкого реального времени (soft) относят системы, не подпадающие в категорию жестких систем. Время реакции таких систем может быть несколько больше заданного.

К ОСРВ относятся следующие операционные системы: QNX, UNIX, RT Linux, Vx- Works, MS DOS, PC DOS, Windows NT, Windows CE.NET, OS-9, OS 2000, OS 5000, OS/2 и некоторые др. [3.18-3.22].

В настоящее время существует большое число ОС (более 100), которые классифицируются по следующим признакам:

278) по количеству пользователей, одновременно обслуживаемых системой, различают одно- и многопользовательские ОС;

279) по числу процессов, которые одновременно выполняются под управлением ОС: существуют одно- и многозадачные ОС (далее рассматриваются только многозадачные ОС);

280) по типу доступа пользователя к системе: системы с пакетной обработкой, системы с разделением времени и системы реального времени;

281) по типу аппаратно-программного комплекса: одно- и многопроцессорные ОС, сетевые ОС и распределенные ОС.

Далее рассматриваются наиболее известные ОСРВ.

Операционная система QNX (*QNX Software System*, Канада)

QNX представляет собой 16/32-разрядную операционную систему, которую пользователь может конфигурировать по своему усмотрению. Система QNX построена по технологии FLEET (Fault-tolerance — отказоустойчивая, Load-balancing — регулирующая нагрузку, Efficient — эффективная, Extensible — расширяемая, Transparent — прозрачная).

QNX соответствует требованиям стандарта POSIX (Portable Operating System Interface — интерфейс переносимых операционных систем). Она ориентирована на приложения реального времени и обеспечивает мультизадачность, приоритетную диспетчеризацию, быстрое переключение контекстов — все необходимые составляющие системы реального времени.

QNX является гибкой, эффективной, модульной и простой системой за счет двух фундаментальных принципов:

282) архитектуры типа микроядра;

283) связей между процессами, базирующихся на сообщениях.

QNX состоит из малого ядра (микроядра), управляющего группой взаимодействующих процессов. Размер ядра QNX — менее 8 кбайт. Оно предназначается только для двух существенных функций:

- передачи сообщений — ядро руководит маршрутизацией всех сообщений между всеми процессами во всей системе;

• диспетчеризации — диспетчер является частью ядра и вызывается всякий раз, когда процесс изменяет состояние в результате полученного сообщения или прерывания.

Управление всем сервисом QNX, за исключением предоставляемого ядром, производится как управление стандартными процессами QNX.

Архитектура QNX позволяет пользователю наращивать ОС собственными программами, чтобы обеспечить новый сервис. Драйверы устройств являются процессами, которые избавляют операционную систему от специфики, требуемой для поддержки конкретного оборудования. Поскольку драйверы запускаются как стандартные процессы, добавление нового драйвера в QNX не влияет на другие части операционной системы. Единственное изменение, которое необходимо выполнить в окружении QNX, это запуск нового драйвера.

Операционная система QNX Neutrino RTOS

RTOS (Realtime Operating System) корпорации **QNX Software Systems** является микроядерной операционной системой, которая обеспечивает многозадачный режим с приоритетами и имеет клиент-серверную архитектуру. В среде QNX Neutrino каждый драйвер, приложение, протокол и файловая система выполняются в защищенном адресном пространстве вне ядра. В случае сбоя любого компонента он может автоматически перезапуститься без влияния на другие компоненты или ядро. Хотя система QNX является конфигурируемой, т. е. отдельные модули можно загружать статически или динамически, нельзя сказать, что она использует подход, основанный на компонентах. Все модули полагаются на базовое ядро и спроектированы таким образом, что не могут использоваться в других средах.

QNX Neutrino RTOS состоит из ядра, планировщика процессов (process manager) и расширенных сервисов на уровне пользователя. ОС реализует в ядре только наиболее фундаментальные сервисы, такие как передача сообщений, сигналы, таймеры, планирование потоков, объекты синхронизации. Все другие сервисы ОС, драйверы и приложения выполняются как отдельные процессы, которые взаимодействуют через синхронную передачу сообщений.

Планировщик процессов строится на базе ядра и обеспечивает дополнительную семантику уровня процессов, управление памятью и путями доступа к файлам. Все другие компоненты: файловые системы, набор протоколов, очереди сообщений, приложения выполняются в защищенном адресном пространстве и являются расширенными сервисами. Взаимодействие компонентов осуществляется через передачу сообщений. Передача сообщений играет роль виртуальной «программной шины», которая позволяет оперативно динамически подгружать и отгружать любой компонент. Как следствие, любой модуль, даже драйвер устройства, может быть замещен или перезапущен оперативно, для чего в большинстве ОСРВ требуется перезапуск системы. Сообщения передаются прозрачно через границы процессора, обеспечивая бесшовный доступ к любому ресурсу в сети.

Обладая вытесняющим микроядром и планировщиком с приоритетным обслуживанием, QNX Neutrino RTOS способна быстро и с высокой предсказуемостью реагировать на события реального времени.

QNX Neutrino RTOS имеет малые времена обработки прерываний, быстрое переключение контекстов. Инверсия приоритетов преодолевается с помощью распределенного наследования приоритетов. Упрощенное моделирование активностей реального времени проводится через синхронную передачу сообщений. Вложенные прерывания и фиксированная верхняя граница времени обработки прерывания гарантируют, что высокоприоритетные прерывания обрабатываются быстро с предсказуемым временем.

Операционная система UNIX

ОС UNIX является многопользовательской многозадачной операционной системой с разделением времени. Несмотря на многообразие версий UNIX, архитектура и основные интерфейсы системы достаточно жестко стандартизованы. Основной организацией, занимающейся выработкой стандартов для UNIX, является Open Group, возникшая в результате слияния X/Open и OSF в 1997 г. В операционной системе UNIX традиционно поддерживается классическая схема мультипрограммирования. Система имеет возможность параллельного выполнения нескольких пользовательских программ. Поскольку каждый процесс выполняется в собственной виртуальной памяти, процессы в системе защищены друг от друга.

В компьютерах с архитектурой SMP несколько процессоров имеют доступ к общей памяти через высокоскоростной общий интерфейс. Диспетчер процессов, обеспечивающий распределение ресурсов процессоров между процессами, использует кольцевой режим планирования (round robin). Основной смысл такого планирования состоит в том, что время процессоров делится на кванты фиксированного размера, а процессоры, готовые к выполнению, выстраиваются в кольцевую очередь. Очевидно, что чем больше процессоров в системе, тем меньше процессов остается в очереди на исполнение, поскольку они распределяются на любые свободные в данный момент ЦПУ. Кроме того, в ОС UNIX был внедрен механизм легковесных процессов (light-weight processes) или нитей управления. Нити — это процессы, исполняющиеся в одной и той же виртуальной памяти обычного (обладающего виртуальной памятью) процесса. Механизм нитей позволяет еще больше поднять эффективность работы SMP-систем, так как позволяет распараллеливать вы-

полнение даже в рамках одного процесса. Синхронизация выполнения нитей достигается при помощи механизма замков (lock). Многопоточность помогает решить и другую проблему — обеспечение работы в режиме реального времени.

Большинство версий UNIX в настоящее время поддерживают мягкое реальное время (SCO, DEC UNIX, Reliant UNIX, IRIX, Solaris). Кроме того, существуют реализации UNIX-подобных систем с поддержкой жесткого реального времени (LYNX, QNX). Такие ОС широко используются для управления контроллерами, в системах сбора информации, для создания интерактивных систем ввода и т. д. К особенностям таких версий UNIX относятся чрезвычайно компактное ядро с возможностью размещения его в ПЗУ и отсутствие или запрещение выгрузки процессов во внешнюю память.

Сейчас большая часть операционных систем семейства UNIX является 64-разрядными, в отличие от Windows NT, остающейся по-прежнему 32-разрядной и существующей только на двух платформах — Intel и DEC Alpha, хотя изначально эта ОС задумывалась как многоплатформенная.

К важным свойствам ОС UNIX относятся ряд специальных черт, позволяющих автоматически переконфигурировать системы после выхода из строя отдельных компонентов, дублировать наиболее критические компоненты систем, производить автоматическую перезагрузку системы в случае ее краха (LAR-функции).

Практически все версии UNIX поддерживают высокий уровень масштабируемости для симметричных мультипроцессорных систем. Как правило, хорошая масштабируемость определяется как линейный рост производительности с увеличением числа процессоров. Однако это не всегда так, поскольку общая производительность, естественно, зависит от масштабируемости общесистемных интерфейсов (шин, коммутаторов), дисковой подсистемы и от подсистемы оперативной памяти и от других составляющих.

ОС UNIX широко используется для реализации кластерных решений. Как известно, под кластерами традиционно понимается объединение нескольких стандартных вычислительных систем (называемых узлами), используемых как единое целое для обеспечения доступа пользователей к приложениям, системным ресурсам и данным.

Кластерные решения обеспечивают высокий уровень надежности: при выходе из строя одного или даже нескольких узлов, работа приложения может быть продолжена на любых других узлах, входящих в состав кластера. При этом дополнительная нагрузка будет равномерно распределяться среди работающих узлов

кластера. Второй важной задачей, решаемой при помощи кластерных технологий, является увеличение производительности путем добавления новых узлов и усиления существующих.

Интерфейс с командной строкой позволяет чрезвычайно просто и гибко с минимальными трудозатратами осуществлять администрирование сложных сетей и объектов операционной среды. Оболочки командной строки, входящей в состав Unix, поддерживают развитые языки сценариев, которые часто оказываются наиболее эффективным средством автоматизации сложных задач администрирования. Кроме того, администраторы и пользователи UNIX могут работать в системе через различные графические оконные интерфейсы, в том числе и через удобный стандартизованный интерфейс CDE (Common Desktop Environment).

В системе UNIX, как в многопользовательской среде, всегда большое внимание уделялось проблеме безопасности. Основные принципы и уровни безопасности для ОС UNIX разрабатываются на основе документа Национального центра компьютерной безопасности США (NCSC) «Критерии оценки надежных компьютерных систем», известного как «Оранжевая книга». Оранжевая книга определяет иерархию 4 уровней безопасности, каждый последующий из которых строже предыдущего.

Для большинства версий UNIX стандартным является уровень безопасности C2: управляемая защита доступа с требованием возможностей ревизии, защиты паролем, других средств контроля владения и использования ресурсов, строгого тестирования и документирования.

За время существования UNIX для этой операционной системы было написано огромное количество приложений. Объем программного обеспечения написанного для UNIX настолько велик, что уже сам по себе обеспечит этой ОС долгую жизнь. Для разных версий UNIX это количество к настоящему времени достигает более 10000. Только для Solaris фирмы **Sun Microsystems** ежемесячно появляется более 150 новых приложений.

ОС Linux и ОС RT-Linux

Базовая версия операционной системы Linux разрабатывалась на основе модели UNIX и задумывалась как ОС для настольных компьютеров. Таким образом, с программной точки зрения ОС Linux является UNIX-подобной операционной системой. Значительная часть ПО, написанного за последние два десятка лет для ОС UNIX, может без каких-либо изменений использоваться и в ОС Linux. В традицион-

ных версиях ОС Linux для взаимодействия с оператором имеется алфавитно-цифровая консоль, позволяющая управлять загрузкой операционной системы, осуществлять ввод команд и контролировать работу ОС. Как и во всех версиях ОС UNIX, хранение и поиск постоянных данных и исполняемых программ осуществляется в ОС Linux средствами файловой системы. Различные устройства также представляются в виде специальных файлов. Реализованная на дисковых накопителях файловая система является неотъемлемой частью исполнительской среды ОС Linux.

По вышеприведенной классификации ОС Linux является многопользовательской многозадачной сетевой ОС. Количество одновременно исполняемых задач ограничиваются только объемом памяти и временными соотношениями между ними. ОС Linux поддерживает стандарты открытых систем и протоколы сети Internet. Все компоненты системы, включая исходные тексты, распространяются с лицензией на свободное копирование и установку для неограниченного числа пользователей.

Характерные особенности ОС Linux:

- 284)** многозадачность (является обязательным условием) и многопользовательский режим;
- 285)** защищенный режим процессора (386 protected mode);
- 286)** защита памяти процесса — сбой программы не вызывает зависания системы;
- 287)** экономная загрузка — Linux считывает с электронного диска только те части программы, которые используются для выполнения в данный момент времени;
- 288)** виртуальная память со страничной организацией (т. е. на диск из памяти вытесняется не весь неактивный процесс, а только требуемая страница); объем виртуальной памяти до 3 Гбайт;
- 289)** ОС и все программы работают каждый в своем виртуальном адресном пространстве, и таким образом не имеют возможности изменять код или данные другого процесса;
- 290)** сертификация по стандарту POSIX.1, совместимость со стандартами System V и BSD на уровне исходных текстов;
- 291)** наличие бесплатного исходного текста всех программ, включая тексты ядра, драйверов, средств разработки и приложений.
- 292)** управление заданиями в стандарте POSIX; совместима на уровне исходных кодов с UNIX SVR4 и BSD 4.4, что предоставляет возможность быстрого переноса

программного обеспечения под другие программные (совместимые с UNIX и POSIX) и аппаратные платформы (Alpha и Sparc);

293) наличие собственной файловой системы и поддержка ряда распространенных файловых систем (MINIX, Xenix, файловые системы System V);

294) прозрачный доступ к разделам DOS (или OS/2 FAT), поддержка всех стандартных форматов CD ROM и поддержка сети TCP/IP, включая протоколы FTP, Telnet, NFS и др.

Открытость исходных текстов и архитектуры ОС Linux наряду с растущей популярностью заставляют программистов переносить свои наработки на аппаратные платформы SGI, IBM, Intel, Motorola и др. В частности, Motorola активно работает в своей традиционной сфере встраиваемых систем и продвигает на рынок продукт LinuxEmbedded.

Стандартное Linux-ядро занимает около 1,5 Мбайт, а требуемый этим ядром объем памяти составляет более 4 Мбайт. Кроме того, требуется память для поддержания файловой системы, а если система работает в бездисковом режиме, то и память для электронных дисков. Ядро имеет модульную структуру, что позволяет манипулировать неиспользуемыми в конкретных приложениях функциональными возможностями. Дистрибутив ОС Linux занимает несколько сотен Мбайт.

Операционная система Linux не является ОС реального времени. В ОС Linux реализован механизм планирования процессов, который называется режимом равноправия и который предназначен для систем с разделением времени. В ОС Linux отсутствуют ограничения на захват процессора процедурами обслуживания прерываний. При этом приоритет таких процедур превышает приоритет любой пользовательской задачи. Иными словами, даже в чрезвычайно быстрых системах с мощными процессорами класса Pentium время отклика пользовательских процессов в условиях перегрузки может достигать сотен миллисекунд и даже секунд, что недопустимо для ОСРВ. Поэтому для управления процессами в режиме реального времени используется ОС RT-Linux.

ОС RT-Linux — это система, в которой Linux-ядро является отдельной задачей, выполняемой под управлением небольшой управляющей программы-диспетчера, работающей в реальном времени. Приложения реального времени исполняются под управлением этой программы, остальные — под управлением ядра Linux. Одним из преимуществ этого метода является то, что программа-диспетчер реального времени может иметь достаточно малые размеры и простую структуру, что облегчает проверку соответствия системы требованиям реального времени. Кроме

того, ОС Linux, исполняющая обычные (не real-time) задачи, является в данном случае обыкновенной Linux, совместимой с другими версиями этой операционной системы и допускающей быстрое осуществление различных модификаций и модернизаций.

Таким образом, запуск из ядра реального времени Linux-ядра осуществляется как задача с наименьшим приоритетом. В RT-Linux все прерывания обрабатываются ядром реального времени, а в случае отсутствия обработчика реального времени — передаются Linux-ядру. Фактически Linux-ядро является простаивающей (idle) задачей операционной системы реального времени, запускаемой только в том случае, если никакая задача реального времени не исполняется. Такое решение сочетает в себе открытость системы с поддержкой приложений жесткого реального времени.

ОС Windows NT с RTX

ОС Windows NT — многозадачная операционная система разработки фирмы Microsoft. Основным достоинством ОС Windows является повышенная надежность. В основе системы управления памятью Windows NT лежит система виртуальной памяти, встроенная в ядро ОС.

Каждое приложение может использовать до 2 Гбайт отдельного адресного пространства виртуальной памяти. Для создания виртуальной памяти используются дисковые устройства. Система виртуальной памяти Windows NT позволяет создать до 16 отдельных файлов страниц, расположенных на разных дисковых устройствах, установленных в компьютере.

ОС Windows NT использует все возможности защищенного режима процессора, в частности - переключение задач и страничную организацию. Используя 32-разрядное смещение, приложение может работать с памятью объемом до 4GB без применения сегментных регистров процессора.

Каждому приложению (или процессу) предоставляется линейное адресное пространство размером 4 Гбайт. Область размером 2 Гбайт предоставлена приложению, другие 2 Гбайт адресуемого пространства зарезервированы для использования ОС.

Разделение адресных пространств выполняется с помощью назначения приложениям индивидуальных наборов таблиц страниц виртуальной памяти. В результате для каждого приложения выполняется отображение линейных адресов в собственный набор страниц виртуальной памяти, не пересекающийся с набором страниц других приложений.

Полное изолирование адресных пространств создает трудности при необходимости организации обмена данными между различными приложениями. Для организации обменов применяются дескрипторы прототипа PTE (prototype Page Table Entry). Дескрипторы PTE создаются ОС для совместного использования страниц, содержащих исполняемый код, а также для работы с файлами. Есть также способ организации общей памяти при помощи библиотек динамической компоновки DDL.

Расширение реального времени RTX (Real Time Extension) для ОС Windows NT корпорации Ventur Com позволяет создавать приложения для высокоскоростного управления с детерминированным временем реакции на внешние события.

RTX интегрировано в ядро Windows NT и для обеспечения необходимых функций использует сервис Windows NT и API WIN32. Каждый процесс RTX выполняется как драйвер устройства ядра NT, при этом процессы не защищены друг от друга. Такая реализация приводит к быстрому переключению контекста, но небезопасна с точки зрения конфиденциальности.

RTX добавляют к Windows NT специфическую для реального времени функциональность, а именно: обеспечивается возможность создавать процессы реального времени, управляемые собственным планировщиком. Планировщик работает по правилам реального времени и использует алгоритм вытеснения по приоритетам. Процессы реального времени и стандартные процессы Win32 имеют средства взаимодействия друг с другом. Процессы реального времени имеют свой собственный программный интерфейс RTAPI, реализующий развитый набор средств, характерный для программных интерфейсов (API) OCPB. Приложение может использовать как стандартные функции Win32, так и специфические функции API реального времени (RTAPI). Имеется возможность контроля над работоспособностью и временами реакции системы, что гарантирует ее предсказуемость (зависания стандартных приложений Windows NT не приводят к зависанию приложений реального времени); предоставляется возможность работы с быстрыми часами и таймерами высокого разрешения, а также обеспечивается возможность прямого доступа к памяти и физическим устройствам.

OCPB VxWorks

Операционная система реального времени VxWorks и инструментальная среда Tornado фирмы Wind River Systems предназначены для разработки ПО встроенных компьютеров, работающих в системах жесткого реального времени.

Операционная система VxWorks является системой с кросс-средствами разработки прикладного программного обеспечения, при этом разработка ведется на

инструментальном компьютере (host) в среде Tornado для последующего исполнения на целевой машине (target) под управлением VxWorks.

ОС VxWorks поддерживает целевые архитектуры (targets): Motorola 680x0 и CPU32, PowerPC; Intel 386/486/Pentium, Intel 960; Spare, Mips R3000/4000; AMD 29K, Motorola 88110; HP PA RISC; Hitachi SH7600; DEC Alpha.

ОСРВ VxWorks построена по технологии микроядра, т. е. на нижнем непрерываемом уровне ядра выполняются только базовые функции планирования задач и их управления коммуникацией/синхронизацией. Все остальные функции операционной системы более высокого уровня (управление памятью, вводом/выводом, сетевые средства и т. д.) базируются на простых функциях нижнего уровня, что позволяет обеспечить быстроедействие и детерминированность ядра, а также легко строить необходимую конфигурацию операционной системы.

В многозадачном ядре Wind используется алгоритм планирования задач, учитывающий приоритеты и включающийся по прерываниям. В качестве основного средства синхронизации задач и взаимоисключающего доступа к общим ресурсам в ядре Wind применены семафоры. Имеется несколько видов семафоров, ориентированных на различные прикладные задачи: двоичные, целочисленные, взаимного исключения и POSIX

Все аппаратно-зависимые части ОС VxWorks вынесены в отдельные модули для того, чтобы разработчик встроенной компьютерной системы мог сам портировать VxWorks на свою нестандартную целевую машину.

ОС VxWorks была первой операционной системой реального времени, в которой реализован протокол TCP/IP с учетом требований реального времени. ОС VxWorks поддерживает все сетевые основные средства и протоколы (TCP, IP, UDP, ARP, PPP, Telnet, FTP, NFS и др.).

Реализация SNMP-агента предназначена для применения ОС VxWorks в интеллектуальном сетевом оборудовании (хабы, мосты, маршрутизаторы, повторители) и других устройствах, работающих в сети.

Трассировку системных событий (переключения задач, запись в очередь сообщений, установка семафора и т. д.) позволяет вести динамический анализатор WindView, который отображает накопленные в буфере события на временной диаграмме аналогично экрану логического анализатора.

Специально для систем с сильно ограниченным объемом памяти компания Wind River Systems разработала редуцированное ядро WindStream, которое требует для работы не более 8 кбайт ПЗУ и 2 кбайт ОЗУ. При этом для WindStream применим весь спектр инструментальных средств VxWorks, включая WindView.

В качестве интерфейса между инструментальной и встроенной целевой машинами используются внутрисхемные эмуляторы и ROM-эмуляторы, включаемые в гнездо ПЗУ микропроцессора целевой системы.

Инструментальная среда Tornado имеет открытую архитектуру, что позволяет другим фирмам-производителям интегрировать свои программные продукты с Tornado. В стандартную конфигурацию Tornado входят ядро VxWorks и системные библиотеки, дистанционный отладчик, конфигуратор и др.

ОС 2000.

ОС 2000 является ОС реального времени. Разработка ОС РВ базируется на принципах соответствия международным стандартам, мобильности, использования концепции микроядра и объектно-ориентированного подхода.

При разработке операционной системы использовались международные стандарты POSIX 1003.1, стандарт на мобильные операционные системы (программный интерфейс) и стандарт C, описывающий язык и библиотеки языка C.

В рамках стандарта POSIX реализованы математические функции, функции обработки символов и строк, функции распределения памяти и др.

Использование стандартов при разработке операционной системы облегчает создание мобильных прикладных программ, т.е. их переносимость с одной ОС на другую.

Операционная система состоит из ядра и системных потоков управления. Ядро выполняет функции планирования, синхронизации и взаимодействия потоков управления, а также низкоуровневые операции ввода/вывода. Функции ядра выполняются в контексте вызвавшего его потока управления или функции обработки прерывания. Микроядро представляет собой небольшую часть ядра ОС, функциями которой пользуются другие части ОС. Микроядро содержит функции управления потоками нижнего уровня и средства синхронизации. Все другие функции (например, захват и освобождение семафора, низкоуровневые операции ввода/вывода) выполняются вне микроядра, используя его функции.

Системные потоки выполняют более сложные функции операционной системы, такие как ввод/вывод информации по сети или обмен информацией с файловой

системой. Использование системных потоков для сложных и протяженных во времени функций ОС позволяет продолжать работу параллельно с выполнением этих функций.

При оценке систем реального времени используются две важнейшие характеристики: время ответа на прерывание и время ответа потока управления.

Время ответа на прерывание — это время между моментом, когда был выставлен запрос на прерывание, и моментом, когда начала выполняться первая команда функции обработки прерывания. Время ответа потока управления — это время между моментом, когда был выставлен запрос на прерывание, и моментом, когда начала выполняться первая команда потока, который должен отреагировать на это прерывание.

Для разработки прикладного программного обеспечения используется комплекс, состоящий из двух ПЭВМ, соединенных по сети: инструментальная ПЭВМ с ОС UNIX и целевая ПЭВМ, для которой разрабатывается программное обеспечение. Разработка программного обеспечения ведется на инструментальной ПЭВМ. Средства разработки позволяют оттранслировать программу, написанную на языках С и Ассемблер, а также отлаживать программу, загруженную в целевую машину.

Так как прикладная программа обычно представляет собой несколько параллельно выполняемых потоков управления, то возникает потребность в средствах синхронизации. В соответствии с POSIX реализованы следующие средства синхронизации: целочисленные семафоры, мьютексы и условные переменные. Семафоры обеспечивают две основные операции: захват семафора и освобождение семафора. В обеих операциях используется счетчик семафора — целое число, начальное значение которого определяется при создании семафора. Начальное значение определяет максимальное количество потоков управления, которые могут одновременно захватить семафор.

Мьютексы имеют много общего с семафорами. Они также используются для синхронизации потоков управления на основе операций захвата мьютекса и освобождения мьютекса. Основные отличия мьютексов от семафоров состоят в том, что мьютекс может быть захвачен не более чем одним потоком управления. Освободить мьютекс может только владелец, захвативший его. В силу этого мьютексы нельзя использовать в функциях обработки прерываний.

В ОС реализованы функции часов и таймеров. Для хранения даты и времени в системе используются различные структуры данных, позволяющие хранить

время в секундах и наносекундах. Программные таймеры позволяют запланировать выполнение какой-либо деятельности в определенный момент времени в будущем.

Базовые операции ввода/вывода, а также асинхронный ввод/вывод реализованы в соответствии со стандартом POSIX, который обеспечивает единообразный доступ к устройствам различных типов. Потоки ввода/вывода и форматированный ввод/вывод реализован в соответствии со стандартом C.

Устройства и файлы являются основными понятиями системы ввода/вывода. Устройства делятся на физические (например, последовательный и параллельный порт, диск) и логические (например, программные каналы, сокеты).

Для ввода (чтения) информации из устройства и вывода ее в устройство используется понятие файла. Одним устройствам (например, последовательному порту) соответствует один файл, другим (например, диску) — несколько файлов. Файлы, соответствующие устройствам первого типа, называются специальными файлами.

Устройства с прямым доступом (диски, флэш-память, оперативная память) могут содержать несколько файлов, каждый из которых рассматривается как последовательность байтов. Внутри файла также обеспечивается прямой доступ. Такие файлы называются регулярными.

Программный канал представляет собой логическое устройство, предназначенное для передачи данных между потоками управления. Данные, записанные в программный канал, считываются оттуда в порядке поступления (First-In-First-Out, первым записан — первым прочитан). Существует 2 типа программных каналов: именованные и неименованные. Первым соответствуют файлы типа FIFO, вторым — файлы типа PIPE. Операция записи и чтения обеспечивают целостность данных и целостность файлов.

ОС 5000

ОС 5000 — операционная система реального времени.

ОС 5000 обладает следующими функциональными возможностями:

- 295)** управление выполнением задач;
- 296)** взаимодействие между задачами через аппарат передачи сообщений;
- 297)** включение процедур по прерываниям;
- 298)** поддержка текущего времени суток и даты, управление программными таймерами, генерация временных меток;
- 299)** вызов при инициализации ОС указанных при генерации пользовательских процедур;

- 300) динамическое выделение группы событий и синхронизация выполнения задач с ними;
- 301) управление ресурсами с последовательным доступом и семафорами;
- 302) управление драйверами функциональных клавиатур, сети МАПС, сети RS-485;
- 303) управление передачей данных между абонентами разных сетей (нижнего и верхнего уровней) — организация моста и др.

ОС Microware OS-9

Операционная система реального времени OS-9 корпорации **Microware System** является многозадачной, многопользовательской операционной системой для встраиваемых приложений, работающих в режиме реального времени. Эта система предназначена для работы в таких системах, как мобильные телекоммуникационные устройства, встраиваемые терминалы доступа в Интернет, интерактивные цифровые телевизионные приставки. OS-9 работает на процессорах Motorola, ARM/StrongARM, Intel IXP1200 Network Processor, MIPS, PowerPC, Hitachi SuperH, Intel Pentium и др.

Ядро OS-9 является масштабируемым, полностью вытесняемым, поддерживает функционирование большого числа процессов с различными уровнями приоритетов (до 65535) и обеспечивает работу до 255 пользователей. Ядро OS-9 содержит более 90 системных вызовов, которые дают возможность управлять динамическим режимом диспетчеризации, распределением памяти, межпроцессорной коммуникацией и т. д.

Благодаря наличию стандартизированной коммуникационной среды в OS-9 доступны современные и наиболее перспективные коммуникационные протоколы, такие как ISDN, ATM, X.25 и др.

Корпорация **Microware** одной из первых лицензировала Java для встраиваемых приложений и является лидером по предложению разнообразных средств и приложений в рамках OS-9 для различных классов устройств. В OS-9 пользователю предлагается Java VM, Java-Compiler/JIT, Java-ROMizer, Java Applets Lib, Embedded Java, Personal Java.

В качестве интегрированной кросс-среды разработки приложений для OS-9 используется пакет Hawk корпорации Microware, который функционирует на платформе MS Windows NT. Hawk является открытой средой и предоставляет сторонним разработчикам инструментальных средств более сотни API, позволяющих

включать в состав среды Hawk продукты известных фирм разработчиков инструментального ПО.

Для тестирования и верификации ПО разработано средство верификации программного обеспечения CodeTEST (Applied Microsystems), встраиваемое в Hawk. Это средство дает возможность осуществлять трассировку встраиваемого ПО и контролировать его характеристики, а также ход выполнения тестов и распределение памяти.

ОСРВ Windows CE .NET

Windows CE — это полноценная 32-разрядная, объектно-ориентированная, многозадачная операционная система семейства Microsoft Windows с поддержкой фиксированной очереди приоритетов с исполнением до завершения.

Аббревиатура CE по одной версии означает Consumer Electronic, по другой — Consumer Edition. Уже сейчас эта система используется в Интернет-приставках (WebTV), сотовых телефонах, карманных компьютерах, в автомобилях, промышленных системах и т. п. Изначально она разрабатывалась для блокнотных ПК. Однако эта операционная система развивается очень динамично. Ее последняя версия представляет собой ОС реального времени, поддерживающую все основные интерфейсы и механизмы взаимодействия приложений, реализованные в Windows NT. Поэтому специалисты АСУ ТП используют ее на уровне контроллеров в промышленной автоматике.

Первый вариант ОС Windows CE — Windows CE 1.0 выпущен компанией Microsoft в 1996 г. В сентябре 1997 года была выпущена Windows CE 2.0. В ней были расширены возможности управления питанием, реализована поддержка экранов с более высоким разрешением и глубиной цвета, встроенных модемов и т. д. Через год появилась очередная версия — Windows CE 2.1. В ней также улучшена работа с графикой, расширены возможности файловой системы, включены криптографические средства (Crypto API).

Архитектура Windows CE соответствует монолитной модели архитектуры ОС, однако для повышения масштабируемости часть сервисов системы оформлена как отдельные модули, взаимодействующие с ядром по технологии COM. Модульность Windows CE является ее главным преимуществом. Можно создать систему только из базового ядра, или систему только с поддержкой экрана, интерфейса и пр. Это позволяет создавать операционную систему под конкретное устройство и его функции. Для полноценной работы Windows CE, использующей все

компоненты архитектуры, требуется всего 2 Мбайт ПЗУ, причем выполняться она может (даже с графической оболочкой) в оперативной памяти менее 512 кбайт.

В управлении памятью система Windows CE реализует виртуальную модель, когда каждый процесс имеет индивидуальное адресное пространство, что обеспечивает высокую степень защищенности данных и кода.

Поскольку ОС Windows CE является W i п 3 2 - с о в м е с т и м о й, разработка системы реального времени на базе этой ОС проводится с использованием богатого набора инструментальных средств. Также компания Microsoft предоставляет специализированные средства разработки приложений для Windows CE.

В 2000 году появилась ОС Windows CE 3.0. Ее основными достоинствами по сравнению с предыдущими версиями являются:

- 304)** операционная система реального времени;
- 305)** поддержка Win32 API;
- 306)** поддержка технологий COM+, DCOM, RPC, DirectX, DHTML;
- 307)** поддержка стандартных коммуникационных Internet-протоколов: TCP/IP и PPP;
- 308)** поддержка Microsoft Message Queue Services (MSMQ);
- 309)** расширение возможностей файловой системы: максимальный размер объекта увеличен до 256 Мбайт, а файла в нем — до 32 Мбайт;
- 310)** файловая система API расширяется до стандарта Win32;
- 311)** число уровней приоритетов увеличено с 8 до 256 (для потоков с одинаковым приоритетом используется управление на основе предустановленных для потоков квантов и приоритетов).

Версия Windows CE 5.0 объединяет возможности OCPB и последние технологии Windows. При старте Windows CE создает виртуальное адресное пространство емкостью 4 Гбайт, разделенное на ядро и пользовательское пространство, которое делится на слоты по 32 Мбайт. Инструментальная среда разработки — пакет Platform Builder.

Следует различать систему реального времени (CPB) и операционную систему реального времени (OCPB). Первая включает в себя следующие элементы: аппаратуру, операционную систему и прикладное ПО. OCPB это только один из элементов CPB и она должна обеспечивать набор функций, позволяющих всей системе соответствовать предъявляемым к ней требованиям.

Windows CE обладает всеми необходимыми для встроенных приложений свойствами компактности, масштабируемости, ОС жесткого реального времени, много- платформенности.

Компактность. Windows CE является самой компактной из всех операционных систем семейства Windows. Минимальная конфигурация, включающая в себя ядро и основные службы, требует менее 500 Кбайт. Полнофункциональный вариант ОС, с графическим интерфейсом пользователя, коммуникационными возможностями и т. п. занимает около 2,5 Мбайт. При этом большинство компонентов могут быть записаны в ПЗУ контроллера и, следовательно, отнимают минимум оперативной памяти.

Масштабируемость. Windows CE состоит из набора компонентов, некоторые из которых являются обязательными, а некоторые — факультативными.

ОС жесткого реального времени. Заложенные в Windows CE средства позволяют использовать эту ОС в качестве операционной системы реального времени.

Поддержка различных аппаратных платформ. Windows CE поддерживает различные вычислительные платформы компании Microsoft.

Высокая надежность устройств с Windows CE обеспечивается тем, что эти системы могут выполняться непосредственно из ROM или специальной флэш-памяти. При желании прикладные программы можно разместить в той же флэш-памяти, что позволит существенно повысить надежность всей системы.

ОС MS DOS

ОС MS DOS будет сохранять довольно прочные позиции на уровне контроллеров в системах управления. Это объясняется в первую очередь стабильностью этой операционной системы, ее дешевизной, нетребовательностью к ресурсам и простотой в эксплуатации. MS DOS не является ОСПВ. Поэтому поддержка работы в реальном времени осуществляется исполнительными модулями, реализующими соответствующие функции. Это требует от программистов более высокой квалификации в области работы систем реального времени, понимания основ контроля и управления технологическими процессами. Примером применения ОС MS DOS компанией AdAstra является система Trace Mode до версии 4.20. После этой версии исполнительные модули разрабатывались для Windows 3.1 и Windows NT. Кроме того, в Trace Mode версии 5.0 исполнительные модули для контроллеров разрабо-

таны для запуска под MS DOS. Хотя MS DOS имеет много недостатков и ограничений, но она остается на рынке и занимает значительную его долю. В новой версии системы значительно увеличен вычислительный ресурс.

Другие ОС

Существует ряд операционных систем реального времени для встраиваемых систем. К ним относятся OCPB Jbed, Nucleus, RTOS CORTEX, DeltaOS и др.

Система Jbed фирмы **Oberon Microsystems** является OCPB с ядром, ориентированным на Java-технологии, и может рассматриваться как Java-платформа для встроенных систем и систем реального времени.

Операционная система Nucleus корпорации **Accelerated Technology** предназначена для встраиваемых приложений. Nucleus является кросс-системой, т. е. программный продукт создается на одной программно-аппаратной платформе, а выполняется на другой. OCPB Nucleus поставляется вместе с открытым кодом.

CORTEX— это многозадачная OCPB для встраиваемых приложений, разработанная корпорацией **ARTESYS (Australian Real Time Embedded Systems)**. Исходный код системы свободно распространяется для образовательных и некоммерческих целей.

DeltaOS является OCPB для встраиваемых приложений, разработанной китайской корпорацией **CoreTek Systems**. Система поддерживается для наиболее популярных семейств микропроцессоров, таких как PowerPC, Intel X86, ARM, MIPS.

Более подробные сведения об этих OCPB приведены в работе [3.22].

3.3.5 Флэш-диски

В последние годы отмечается стремительный рост интереса к твердотельным накопителям информации, выполненным по флэш-технологии. Использование флэш- дисков вместо обычных накопителей находит самое широкое применение:

- в мобильной аппаратуре;
- бортовых системах сбора и регистрации;
- отказоустойчивых системах промышленной автоматизации;
- телекоммуникационном оборудовании;
- для других задач, требующих сочетания повышенной надежности, вибро- и ударопрочности, быстрогодействия в жестких условиях эксплуатации.

Флэш-диски можно условно разделить на несколько категорий:

— Устройства памяти в виде микросхем (DiskOnChip), которые устанавливаются в специальные панельки, размещенные на процессорной плате (рис. 3.25). Объ-

ем памяти от 128 Мбайт, интерфейсы IDE, USB 2.0. В данном случае функции постоянного и энергонезависимого запоминающего устройства выполняются одной микросхемой. Большинство промышленных процессорных плат имеют разъем для установки DiskOnChip. После установки микросхемы на плату в системе появляется дополнительный накопитель, ничем не отличающийся, с точки зрения операционной системы, от обычного жесткого диска.

— Устройства памяти в виде съемных (заменяемых) модулей в формате карт PCMCIA (тип I, II и III), карт Compact Flash и Multimedia Card. Это быстрые, компактные съемные устройства, допускающие установку и извлечение в процессе работы системы. Они полностью эмулируют жесткий диск и удобны тем, что могут быть использованы в качестве переносных накопителей информации. Объем памяти от 512 Мбайт, интерфейс Compact Flash, тип 1. Для установки в систему эти устройства требуют специальных разъемов, которыми оснащены многие промышленные компьютеры и контроллеры (рис. 3.26).

— Устройства памяти, конструктивно выполненные в виде корпуса обычного жесткого диска формата 2.5", 3.5" или 5.25" со стандартными интерфейсами IDE, SATA и SCSI. Такие устройства полностью совместимы с обычными жесткими дисками по интерфейсным разъемам и способам подключения, имеют высокую степень надежности, не создают акустических и электромагнитных шумов, обладают низким энергопотреблением, малым весом, мало восприимчивы к вибрациям и ударам (рис. 3.27).

Устройства памяти в виде модулей (DiskOnModule) со стандартным интерфейсом IDE. Модульные IDE флэш-диски представляют собой маленькую платку с 40- или 44-контактным разъемом. Они предназначены для непосредственной установки в IDE-разъем процессорной платы и имеют два варианта исполнения: с прямым вертикальным разъемом и с L-образным разъемом, благодаря чему могут устанавливаться параллельно процессорной плате (3.28). Модульные IDE флэш-диски также полностью эмулируют работу обычного жесткого диска. Объем памяти — от 32 Мбайт до 100 Гбайт и более.



Рис. 3.25

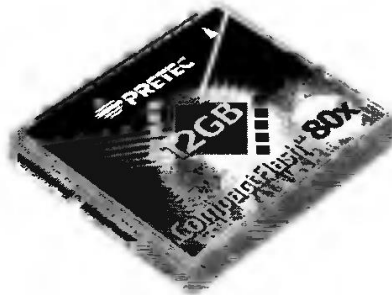


Рис. 3.26



Рис. 3.27



Рис. 3.28

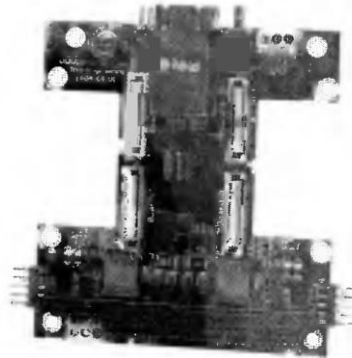


Рис. 3.29

5. Адаптеры PC/104 для электронных дисков. Если на Вашей процессорной плате нет необходимого разъема для установки DiskOnChip, модулей CompactFlash и плат PCMCIA, можно воспользоваться платами расширения с интерфейсами ISA или PC/104. На такие платы можно установить 2-4 микросхемы DiskOnChip, 1 модуль CompactFlash или 1-2 карты PCMCIA (рис. 3.29).

Скорость обмена (чтение/запись) флэш-дисков — от 10 до 40 Мбайт/с (в SSD 5000 до 60 Мбайт /с), число циклов стирания/записи — от 2 млн для DiskOnChip до 5 млн для накопителей серии SSD с интерфейсом SCSI.

3.4. Панели оператора

Операторская панель представляет собой устройство оперативного ввода и отображения буквенно-цифровой или графической информации при обмене данными с удаленным контроллером или компьютером. Эта информация отображается на экране текстовых или графических панелей оператора при подключении их к контроллеру или компьютеру по последовательным интерфейсам RS-232, RS-422/RS-485. Помимо буквенно-цифровой информации на экране панели оператора отображаются графики, диаграммы, тренды, динамические рисунки и пр.

В качестве устройства ввода применяется функциональная пленочная клавиатура или сенсорный экран. Помимо клавиш и жидкокристаллического индикатора на лицевую панель могут быть выведены светодиодные индикаторы работы каналов, сигнализации аварии и др.

Панель оператора обменивается информацией по сетям Ethernet, Modbus, Profi-bus, DeviceNet и др. Панель оператора имеет возможность подключения к контроллерам большинства фирм производителей. Программное обеспечение панелей оператора для конфигурации под ОС Windows 98/NT/2000/XP обеспечивает удобное и легкое программирование панелей.

Таким образом, применение операторской панели во многих случаях более экономично, чем применение полноценного компьютера или монитора. Помимо отображения измеряемых параметров операторская панель позволяет управлять процессом, изменяя задание регуляторам или состояние исполнительных механизмов. Встроенные часы реального времени имеют функцию автоматического перехода на летнее время. Часы реального времени в ПЛК гарантированно синхронизируются с часами реального времени панели. Панель оператора позволяет просто создать отчет и сохранить его. Отчет представляет собой текстовый блок и содержит информацию об изменении значений параметров процесса (регистров управляющего контроллера) во времени. Печать отчета может производиться либо в определенное время, либо по событию. Возможность защиты паролем различных объектов и кнопок позволяет избежать постороннего воздействия на производственный процесс. Можно установить несколько уровней защиты, что позволяет предоставлять различным пользователям различные права.

Ряд панелей оператора могут отсылать аварийные и обычные отчеты, тренды и рецептуры по электронной почте. Сообщения также могут пересылаться на мобильные телефоны в виде SMS.

Операторские панели имеют слоты для одной или двух карт расширения. Доступны следующие типы карт расширения:

312) IFC-MC используется для увеличения памяти терминала PCMCIA флэш-картой.

Память может использоваться как для самого проекта, так и для хранения резервной копии приложений, трендов и рецептов.

313) IFC-PI используется для подключения принтера через параллельный порт.

314) IFC-ETTP и IFC-ETCX используются для подключения терминала к Ethernet по

TCP/IP протоколу. Подключение осуществляется витой парой, либо коаксиальным кабелем.

Получили применение текстовые и графические панели оператора.

Текстовые панели с буквенно-цифровым монохромным ЖК-дисплеем с подсветкой имеют 2 (4) строки по 20 символов или 8 строк по 40 символов. Общее число клавиш, в том числе программируемых, у текстовых панелей колеблется от 5 до 30. Число пикселей экрана от 122х32, 128х64 до 160х180.

К числу функциональных возможностей текстовых панелей оператора относят парольную защиту, а также защиту ввода данных, создание архивов, трендов, алармов, диаграмм, барграфов, ввод/вывод дискретных сигналов, симуляцию щитовых приборов, индикацию состояния оборудования, математические и другие функции.

На рис. 3.30 показана текстовая панель TD200 фирмы **Siemens**.



Рис. 3.30

Графические панели оператора с монохромным и цветным сенсорным экраном позволяют создавать мнемосхемы процесса, динамически отображать значения переменных, управлять процессом с помощью функциональных клавиш, переключать страницы экрана и создавать отчеты, выводя страницы экрана на печать с указанием даты и времени, осуществлять диагностику контроллера или компьютера. Для проектирования изображений в состав ПО панелей входят встроенные графические компоненты, а также изображения различных видов кнопок, тумблеров, переключателей, измерительных приборов и регуляторов, часы, самописцы и др.

Графические панели имеют многоязыковую поддержку приложений и все другие функции текстовых панелей оператора. Размер монохромного или цветного экрана (поддержка 128 или 256 цветов) в зависимости от модели составляет от 5,7" до 12,1". Графическая панель оператора с клавиатурой может иметь до 40 функциональных и сервисных буквенно-цифровых клавиш и имеет за счет этого большие габариты, чем панели оператора с сенсорным экраном.

На рис. 3.31 показана панель TP170B фирмы **Siemens**, на рис. 3.32 — панель Cimrex 90D фирмы **Beijer Electronics**, а на рис. 3.33 QuickPanel фирмы **GE Fanuc**.

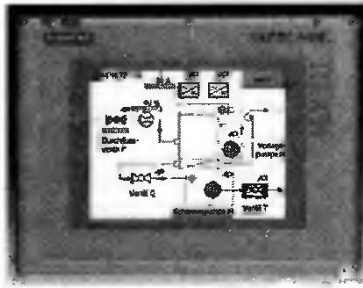


Рис. 3.31

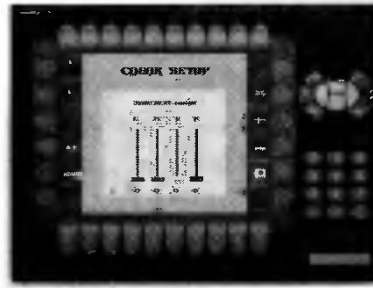


Рис. 3.32

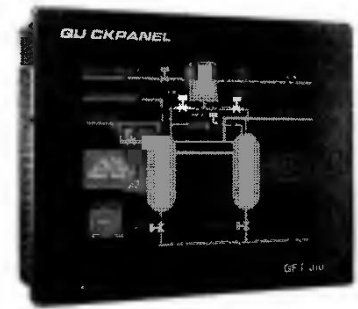


Рис. 3.33

Отдельную группу составляют мобильные (переносимые на руке) панели оператора с цветным или монохромным ЖК-индикатором (табл. 3.11). Мобильные панели позволяют выполнять функции оперативного управления и мониторинга параметров из любой точки системы. Терминалы при этом должны иметь специальные соединительные коробки. При необходимости мобильная панель может быть запрограммирована на непосредственное подключение к контроллеру, компьютеру или к сети через встроенный интерфейс (например, RS-485, Profibus и др.). Подключение и отключение мобильных панелей оператора может производиться во время работы оборудования.

На рис. 3.34 представлена мобильная панель фирмы **Siemens**.

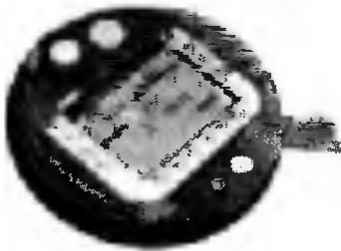


Рис. 3.34

Панели оператора могут соединяться с контроллером или компьютером в режиме точка-точка, с использованием полевой шины в режиме одна панель — несколько ПЛК и один ПЛК — несколько панелей оператора или в сетевой архитектуре (Ethernet TCP/IP, Modbus Plus, Profibus DP, DeviceNet). Степень защиты большинства панелей оператора IP65.

Программирование панелей оператора осуществляется с помощью специализированного ПО, работающего в среде Windows 98/NT/2000/XP. Сохранение и перенос данных и параметров настройки возможен также с помощью SMS-карт (Smart Media Card). Программирование панелей оператора производится на языке LD или др. по стандарту IEC 61131-3.

Пакеты программирования помимо многоязыковой поддержки имеют развитую библиотеку графических символов и примитивов. В состав пакетов программирования обычно входят драйверы контроллеров большинства крупных фирм-производителей.

В табл. 3.10 приведены основные технические характеристики панелей оператора различных фирм-производителей.

3.5. Источники бесперебойного питания (ИБП)

Защита электропитания систем сбора и обработки информации, контроля и управления технологическими процессами является важнейшим условием надежной работы оборудования. ИБП позволяют не только фильтровать скачки напряжения питания, но и корректно завершить работу всех приложений в случае длительного отключения электропитания либо восстановить питание при кратковременном его отключении.

ИБП применяются для питания ответственных серверов БД РВ, локальных сетей, различного оборудования для автоматизации и управления, телекоммуникационных



Рис. 3.35

систем и систем безопасности. Благодаря наличию коммуникационного порта RS-232 обеспечивается связь ИБП с компьютером и мониторинг состояния ИБП.

Исходя из различия мощностных характеристик ИБП имеют следующие конструктивные исполнения: настольное, напольное (стоечное) и 19" исполнение (рис. 3.35).

Для различных моделей мощность ИБП колеблется от 75 Вт (время автономной работы 40 минут), 300 Вт (время автономной работы 10...30 мин), 3...5 кВт (время 8...10 мин), 80 кВт (время 6...8 мин) до 600 кВА и более.

При перерывах времени отключения электропитания более 30 мин целесообразно использование резервного питания от дизель-генератора.

Среди наиболее часто встречающихся неисправностей электропитания наблюдаются следующие:

- пропадание или резкие скачки напряжения;
- электромагнитные и радиочастотные помехи;
- колебания частоты питающего напряжения;
- искажение синусоидальной формы напряжения;
- переходные процессы при коммутации силовых элементов;
- высоковольтные импульсы и др.

К методам устранения неисправностей электропитания относят следующие:

- Переход на питание от встроенных аккумуляторных батарей (АБ) при пропадании электропитания или значительном повышении (понижении) входного напряжения. Время переключения составляет 2...4 мс. Форма напряжения при питании от АБ синусоидальная или прямоугольная. Время работы от АБ зависит от нагрузки — при уменьшении нагрузки время работы от АБ увеличивается.
- Фильтрация входного напряжения с защитой от высоковольтных импульсных помех и провалов напряжения с коррекцией амплитуды входного напряжения.
- Переключение нагрузки ИБП на внешнюю сеть в случае длительной перегрузки или перегрева или других неисправностей без перерыва электропитания.
- Модульное конфигурирование ИБП с автоматическим отключением неисправного модуля и перераспределением нагрузки. Замена модуля осуществляется без отключения нагрузки от питающей сети.
- Резервирование ИБП с равномерным распределением нагрузки. При этом номинальная мощность работы параллельной системы ИБП с резервированием равна номинальной мощности одного ИБП.

К другим особенностям ИБП относятся автоматическое тестирование состояния АБ, высокая перегрузочная способность (возможность выдерживать значительные перегрузки, вплоть до 200...300%, без перехода на by-pass). Режим by-pass — это режим обхода питания ИБП по схеме on-line на питание критичной нагрузки входным сетевым напряжением. Также в ИБП используется возможность увеличения времени батарейной поддержки и уменьшения времени заряда батарей за счет дополнительного зарядного устройства, дистанционное включение/отключение ИБП с помощью пульта дистанционного управления. Важной характеристикой ИБП является принцип резервирования N+1, N+2, N+3, заключающийся в том, что при вы-

ходе одного из модулей ИБП нагрузка равномерно распределяется среди оставшихся N модулей. Кроме того, при уменьшении нагрузки лишние модули ИБП отключаются.

Наибольшее применение получили следующие типы ИБП [3.23, 3.24]:

315) ИБП по схеме с двойным преобразованием энергии или On-line ИБП. Точность стабилизации выходного напряжения при сбалансированной нагрузке 1...3%.

316) ИБП с переключением (Standby UPS или off-line, рис. 3.36).

В нормальном режиме выпрямитель подзаряжает АБ. При уменьшении или пропадании питания срабатывает переключатель, продолжая питать нагрузку от АБ. Однако, на время переключения (3...5 мс) образуется разрыв в питающем напряжении.

317) ИБП, взаимодействующие с сетью (Line Interactive UPS, рис. 3.37). ИБП отличается наличием автотрансформатора, подключенного к нагрузке. Таким образом, этот ИБП регулирует напряжение на выходе. Выходное напряжение растет, если напряжение на входе падает и наоборот. ИБП, взаимодействующие с сетью, регулируют выходное напряжение ступенчато. При уменьшении напряжения на 12...15% подключается повышающая обмотка автотрансформатора, которая повышает выходное напряжение на 12... 15% и наоборот. При более значительном изменении сетевого напряжения ИБП переключается на работу от АБ.

318) Феррорезонансные ИБП (Ferroresonant UPS). Схема ИБП этого класса отличается от предыдущей тем, что в ней вместо автотрансформатора включен феррорезонансный трансформатор. Его основное назначение — стабилизация выходного напряжения. Поскольку феррорезонансный трансформатор обладает значительной индуктивностью в момент переключения нагрузка питается энергией, накопленной в магнитном поле трансформатора. Таким образом, в момент переключения нет разрыва питающего напряжения. Это позволяет отнести этот тип ИБП к типу On-line ИБП. Точность стабилизации выходного напряжения 1...5%. При снижении нагрузки погрешность уменьшается.

Большинство известных ИБП являются «On-line» ИБП, схема построения которых характеризуется двойным преобразованием входного напряжения. В нормальном режиме работы входное напряжение преобразуется в постоянное, а затем с помощью инвертора вновь преобразуется в переменное напряжение. При пропадании входного напряжения инвертор, постоянно подключенный к АБ, мгновенно переходит на пита-



Рис. 3.36

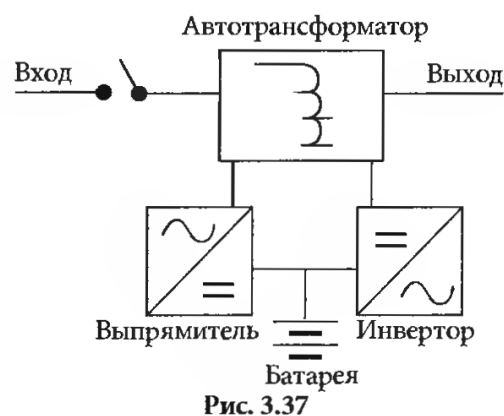


Рис. 3.37

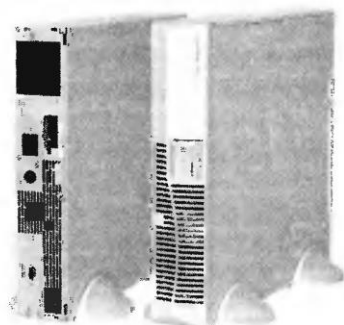


Рис. 3.38

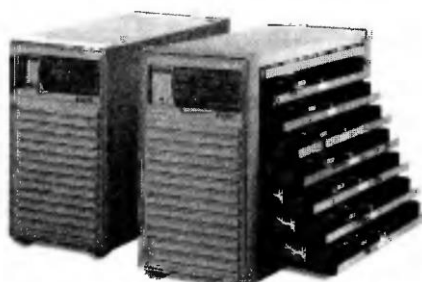


Рис. 3.39

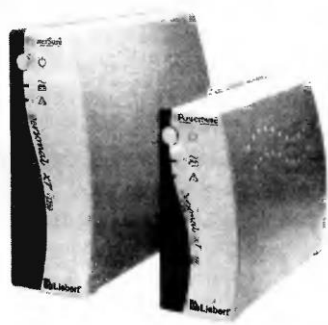


Рис. 3.40



Рис. 3.41

ние от нее, продолжая обеспечивать нагрузку переменным напряжением без разрыва синусоиды входного напряжения и без искажения ее формы. ИБП по схеме «On-line» имеют на входе стабилизатор напряжения, предотвращающий переход ИБП на питание от АБ при колебаниях входного напряжения. ИБП по схеме «On-line» используются для ответственных применений (питание файл-серверов, рабочих станций и пр.).

Основные типы ИБП имеют синусоидальную форму выходного напряжения. Коэффициент гармонических искажений On-line ИБП и феррорезонансных ИБП < 5%.

Некоторые On-line ИБП способны корректировать форму выходного напряжения даже при работе с нелинейными нагрузками значительной мощности.

Борьба с импульсными помехами в ИБП осуществляется установкой варисторной защиты (варисторный шунт) и гальваническим разделением сигналов.

Системы бесперебойного питания делят на децентрализованные, централизованные и структурированные.

Децентрализованные системы бесперебойного питания предполагают наличие большого числа маломощных ИБП для каждого из терминалов и одного дизель-генератора. Они позволяют функционировать при отключении питания каждый терминал самостоятельно в течение определенного времени в зависимости от мощности ИБП.

Централизованные системы включают несколько работающих параллельно ИБП и одного или нескольких дизель-генераторов. Такая структура применяется для больших систем и крупных объектов.

Структурированные системы занимают промежуточное место между децентрализованными и централизованными системами. Структурированные системы бесперебойного питания включают несколько ИБП средней или большой мощности («On-line» ИБП) и один или несколько дизель-генераторов. Применяются для питания систем управления небольших участков или цехов.

Среди режимов работы ИБП известны следующие:

319) нормальный — когда нагрузка получает питание от электросети, а АБ находится

в режиме контролируемого подзаряда;

320) аварийный — нагрузка получает переменное напряжение питания от инвертора,

который питается от АБ;

321) «холодный старт» — режим автономного запуска ИБП при отсутствии напряжения на его входе.

Большинство ИБП имеют КПД (отношение мощности, потребляемой нагрузкой, к полной мощности, потребляемой ИБП), равное 70...80%.

К числу используемых аккумуляторов относят герметичные свинцово-кислотные или свинцово-гелиевые герметичные необслуживаемые аккумуляторы (напряжение 12 В, емкость 7 А·ч), срок службы порядка 5 лет в соответствии с EUROBAT.

Программное обеспечение, как правило, входит в комплект поставки ИБП.

На рис. 3.38 представлен ИБП фирмы **Powerware** 9125 RM, на рис. 3.39 ИБП HF Top Line фирмы **Meta System**, на рис. 3.40 ИБП фирмы **Liebert** и на рис. 3.41 —

модуль РМС фирмы **RITTAL**. Модуль РМС включает выпрямитель, усилитель, инвертор, статический байпас и микропроцессорную систему контроля работы ИБП, включая систему зарядки аккумуляторов. Выпускаются модули на мощности 10, 20, 30 и 40 кВА.

В табл. 3.12 приведены основные технические характеристики ИБП.

3.6. Локальные микропроцессорные регуляторы

3.6.1 Назначение и характеристики микропроцессорных регуляторов

Локальные микропроцессорные регуляторы предназначены для измерения, сигнализации и регулирования технологических параметров в локальных системах автоматизации. Регуляторы входят в состав распределенных систем управления, а также могут использоваться автономно в структуре систем автоматического регулирования.

Микропроцессорный регулятор представляет собой функционально законченное микропроцессорное программируемое устройство.

К характерным особенностям микропроцессорных регуляторов относятся:

- 322) Цифровая индикация текущих значений параметров и задания.
- 323) Конфигурация регулятора кнопками с панели прибора.
- 324) Жесткая или свободно-конфигурируемая структуры.
- 325) Совмещение функций измерения, индикации, сигнализации и регулирования.
- 326) Входные и выходные каналы (аналоговые, дискретные).
Наличие программного задатчика (число сегментов программы).
- 327) Алгоритмические функции регулирования (позиционное, ПИД-регулирование, следящее, соотношения, каскадное и др.).
- 328) Наличие режима автонастройки параметров регулятора.
- 329) Функция ручного управления с панели регулятора.
- 330) Связь с персональным компьютером (наличие интерфейса RS-232C, RS-422/RS-485) и возможность программирования с компьютера.

Достоинства микропроцессорных регуляторов:

- 331) высокие технические характеристики: точность, многофункциональность, быстродействие и др.;
- 332) удобство обслуживания, ремонтпригодность;
- 333) простота настройки, отсутствие требований знания программирования;
- 334) малые габариты, низкая стоимость.

К недостаткам регуляторов следует отнести малоканальность (от одного до четырех каналов), ограничение алгоритмов управления, связанное с ограничением памяти.

Рассмотрим особенности локальных микропроцессорных регуляторов более подробно.

— Цифровая индикация текущих и заданных значений параметра осуществляются с помощью жидкокристаллического дисплея с высокой разрешающей способностью или с помощью 4...6-разрядных семисегментных индикаторов (высота символов 8 или 14 мм). На ЖК-дисплее могут отображаться тренды технологических параметров, гистограммы, буквенно-цифровая индикация значений параметров, а также небольшие мнемосхемы процесса. Размер экрана ЖК-дисплея от 50x100 мм до 134x130 (5"). Примером регуляторов с ЖК-дисплеем служат, например, программный регулятор процесса IMAGO 500 фирмы **JUMO** (Германия) и одноконтурный контроллер серии YS-100 (-131, -136) фирмы **YOKOGAWA**.

Светодиодные индикаторы могут иметь регулируемую яркость, устанавливаемую с компьютера через интерфейс RS-232. Помимо значений задания параметра на индикаторы выводится информация, необходимая при программировании регулятора. На индикаторы также выводится информация об обрыве датчиков, превышении значения заданного интервала, сообщения об ошибках (диагностика) и др. На отдельном индикаторе отображается номер канала. Цвет свечения индикаторов — красный и зеленый.

К числу достоинств микропроцессорных регуляторов относится удобная и простая установка задания, а также конфигурация регулятора с помощью кнопок на лицевой панели прибора. К числу параметров конфигурации регулятора относятся: установка заданного значения параметра, а в случае программного регулирования — установка параметров программы (времени и значения параметра на каждом участке программы), выбор входного сигнала от датчика (тип термопары или термометра сопротивления, аналоговый сигнал, диапазон измерения), уставки значений параметров сигнализации и гистерезиса уставок, тип выходного сигнала (ШИМ, ФИМ, аналоговый или дискретный выход), параметры П-, ПИ- или ПИД-регулятора, длительность импульса, время перехода индикаторов регулятора в «спящий» режим с пониженной яркостью и др. Важной характеристикой регулятора является возможность перехода с помощью кнопок на панели регулятора в режим дистанционного управления и формирования сигналов «больше» — «меньше» с выхода ре-

гулятора на исполнительный механизм. Контроль за положением вала исполнительного механизма или состоянием магнитного пускателя (реле) осуществляется с помощью бар- графа или индикаторов на панели регулятора.

335) Микропроцессорные регуляторы имеют жесткую или свободно-кон- фигурируемую структуру. Жесткая структура регулятора, формируемая заводом- изготовителем, ограничивает возможности конфигурации регулятора потребителем. Однако такие микропроцессорные регуляторы более простые в обслуживании и имеют более низкую стоимость. Сохраняются возможности установки заданных значений технологического параметра, сигнализации, установки параметров ПИД- регулятора, ручное управление и некоторые другие. Свободно-конфигурируемая структура регулятора допускает использование всего набора функций потребителем в зависимости от требований технологического процесса. Режим конфигурации регулятора с помощью кнопок на панели прибора защищен от несанкционированного доступа паролем или может быть разрешен при определенной последовательности, в том числе временной, нажатия кнопок.

336) Микропроцессорный регулятор совмещает функции измерения, индикации измеряемого параметра, задания, номера канала измерения и функции регулятора. Многие микропроцессорные регуляторы имеют функцию измерения и индикации до восьми и более каналов измерения с поочередной автоматической или по вызову оператора индикацией значений этих параметров на индикаторах регулятора. Функция сигнализации предусматривает сигнализацию по верхнему, нижнему пределу значения параметра, по величине отклонения параметра от заданного значения, по скорости изменения параметра и др. К функциям регулирования относятся функции 2- или 3-позиционного регулирования, регулирования с непрерывным или ШИМ выходным сигналом. С помощью регулятора могут быть реализованы различные схемы управления — одноконтурная и многоконтурная (до двух контуров), каскадная, управление по возмущению, программное управление.

Большинство микропроцессорных регуляторов имеют ограниченное число входных и выходных каналов. Число аналоговых входов, как правило, 1 или 2. Известны регуляторы с числом входных каналов от 2 до 5, а также многоканальные микропроцессорные регуляторы с числом каналов до 10. К аналоговым входам относятся входы для термопар, термометров сопротивления, унифицированных токовых сигналов и сигналов напряжения. Выходные аналоговые сигналы: токовые сигналы (0...5, 0/4...20 мА), сигналы напряжения (1...5, 0...10 В и др.), частотный сиг-

нал. Число аналоговых выходных сигналов 1 или 2. К дискретным входным сигналам относят импульсные сигналы, дискретные входы от контактов реле, конечных выключателей и пр. К дискретным выходным сигналам относятся релейный выход (СК— «сухой контакт» или «сухой ключ») или транзисторный выход р-р-р или п-р-п (ОК — «открытый коллектор», 24 **VDCI**150 тА). Транзисторный выход может использоваться для управления силовыми тиристорными блоками. Управление мощностью нагревателя по методу ШИМ состоит в том, что нагрузка включается на долю периода, а среднее значение выводимой мощности определяется отношением времени включения к периоду ШИМ. Помимо метода ШИМ используется фазоимпульсное управление (ФИМ) тиристорами, при котором тиристоры каждый полупериод открываются с регулируемой фазовой задержкой от 0 до 180° (управление по углу отсечки в каждом полупериоде). Помимо тириستоров для управления нагрузкой используются симисторы. Симистор, имеющий оптическую развязку цепи управления от силовой цепи (оптосимистор), управляет открытием тиристора в момент напряжения на тиристоре близком к нулю. При 100%-ной мощности нагрузка (нагреватель) включена постоянно; при 90%-ной мощности нагрузка выключена каждый десятый период; при 50%-ной мощности нагрузка включена каждый второй период; при 25%-ной мощности нагрузка включена каждый четвертый период и т. д. Число дискретных входов регулятора от 2 до 4, дискретных выходов — до 6, в том числе один дискретный выход используется для сигнализации неисправности регулятора. К числу аналоговых выходов относится встроенный цифро-аналоговый преобразователь с выходным сигналом 0...5, 0/4...20 мА.

Более подробные данные о числе и характеристики входных и выходных сигналов приведены в табл. 3.14.

337) Наличие программного задатчика существенно расширяет возможности микропроцессорных регуляторов. Длительность программы определяется числом участков программы (сегментов) и длительностью каждого сегмента. Большинство программируемых ПИД-регуляторов имеют программные задатчики на 10... 12 участков. Однако, известны ПИД-регуляторы с числом участков программы до 49 и 99 сегментов. Запись программы в память регулятора состоит в задании числа участков программы, а также координат точек по оси абсцисс (ось времени) и оси ординат (ось значений параметра). Число программ, хранящихся в памяти регулятора и готовых к включению, составляет от 10 до 50. При остановке программы оператором или по причине отсутствия питания дальнейший ход программы продолжается с точки прерывания.

В микропроцессорных регуляторах предусмотрены различные режимы регулирования, в том числе позиционное и ПИД-регулирование. Позиционное регулирование применяется в процессах, когда не требуется высокого качества регулирования. При этом достоинствами позиционного регулирования являются его простота, наглядность алгоритма его работы, отсутствие большого числа параметров настройки и необходимости обслуживания квалифицированными специалистами. Для позиционного регулирования в структуре микропроцессорного регулятора используются элементы дискретного выхода: реле, транзисторы или оптосимисторы. Для усиления сигнала управления с выхода «сухого» контакта слаботочного реле (СК) сигнал поступает на более мощное реле или магнитный пускатель. Выходной сигнал транзистора (оптотранзистора) применяется, как правило, для управления низковольтным реле (до 50 В) или поступает на вход однофазного или трехфазного тиристорного силового блока. В случае релейного выхода для защиты транзистора из-за большого тока самоиндукции рекомендуется параллельно обмотке реле устанавливать диод. В случае коммутации силовых нагрузок большой мощности (напряжение 380 В, токи 50 А и более) рекомендуется использовать оптосимисторы и оптосимисторные силовые блоки. Оптосимисторы имеют внутреннюю схему перехода через ноль, гальванически изолированы (как и оптотранзисторы) от схемы управления, не создают помехи, не вызывают искру и имеют длительный ресурс работы. Оптосимисторы также используются для управления парой встречнопараллельно включенных тиристоров. В тех случаях, когда требуется повысить точность позиционного регулирования, вместо двухпозиционного используется трехпозиционное регулирование. При этом, в случае управления, например, тепловым объектом, один из дискретных выходов используется для подачи основной мощности, а другой дискретный выход обеспечивает собственно регулирование подачей относительно небольшой мощности. Когда не допускается частая коммутация нагрузки, что свойственно позиционному регулированию, в регуляторе устанавливают определенную величину гистерезиса.

В микропроцессорных регуляторах, как правило, имеются несколько дискретных выходов типа СК или ОК, которые могут быть использованы как для управления, так и для сигнализации отклонения измеряемого параметра от задания.

Алгоритм ПИД-регулирования, а также режим автоматической настройки параметров регулятора (коэффициент усиления, время интегрирования и расчетное время дифференцирования), заложен в подавляющем большинстве микропроцес-

сорных регуляторов. В тех случаях, когда режим автонастройки параметров регулятора отсутствует либо дает неудовлетворительные результаты в силу технологических особенностей объекта управления, оптимальные параметры настройки ПИД-регулятора приходится находить опытным путем, например, по виду переходной характеристики объекта.

338) Режим автоматической настройки оптимальных параметров регулятора может осуществляться по различным методикам [3.19]. Общее для этих режимов является то, что выход регулятора на определенное короткое время отключается от объекта и по анализу входного сигнала с использованием критерия Циглера — Никольса или других критериев рассчитываются параметры регулятора. Рассчитанные за 2...5 шагов эти параметры автоматически заносятся в память регулятора, после чего регулятор немедленно вступает в процесс регулирования с новыми оптимальными параметрами настройки. Режим автонастройки рекомендуется повторить при изменении свойств объекта или режима работы. В технических характеристиках регуляторов заранее указывается отношение времени интегрирования к времени дифференцирования для расчета последнего или это отношение программируется наравне с другими параметрами. Как правило, это отношение составляет: $T / T' = 4,5...5$.

И Д

339) Локальные микропроцессорные регуляторы имеют станцию дистанционного управления, включающую переключатель «ручное - автоматическое» и две кнопки управления «больше» и «меньше», с помощью которых осуществляется управление реверсивным исполнительным механизмом, электромагнитным клапаном и пр. Для контроля положения исполнительного механизма или состояния клапана применяются барграф и (или) светодиодные индикаторы.

340) Большинство микропроцессорных регуляторов имеют интерфейс связи с компьютером (RS-232), а также интерфейс RS-485 для связи с распределенной системой сбора данных и управления, в том числе с другими регуляторами, терминалами и станциями сбора данных (до 31 устройства по протоколу Modbus RTU на максимальную длину 1200 м). С использованием прилагаемого программного обеспечения осуществляется установка и настройка параметров регулятора. Программа позволяет архивировать данные, выводить на экран тренды, сообщения о превышении параметрами установок.

3.6.2 Технические характеристики локальных микропроцессорных регуляторов

Среди множества микропроцессорных регуляторов, выпускаемых почти каждой крупной фирмой, специализирующейся на производстве программно-аппаратных средств АСУ ТП, можно выделить одно- и многоканальные ПИД-регуляторы, программные регуляторы, различающиеся характером выходного сигнала, коммуникационными возможностями, габаритом и др.

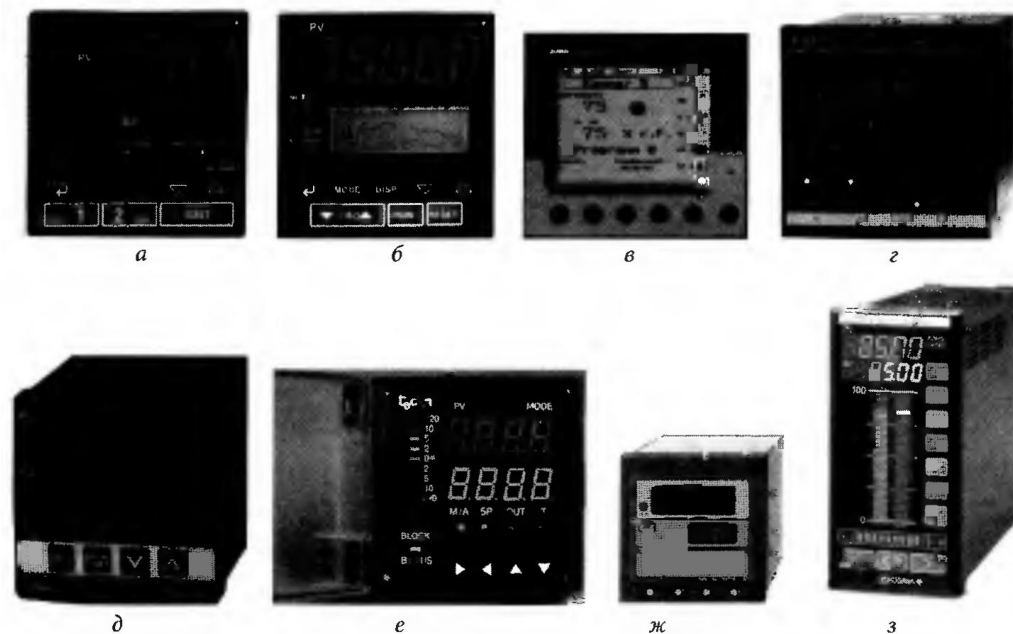


Рис. 3.42

В табл. 3.14 приведены технические характеристики некоторых типов микропроцессорных регуляторов.

Напряжение питания микропроцессорных регуляторов, приведенных в табл., 220 **VAC**. Регуляторы UP350, UP550/570, TROVIS 6494 и IMAGO 500 имеют дополнительно источники питания 15 и 24 **VDC**.

Габариты регуляторов соответствуют стандарту DIN 43700 и составляют (ШхВ) 96х96, 48х96, 96х48 или 48х48 мм.

На рис. 3.42 показан общий вид микропроцессорных регуляторов UP350 (а), UP550/750 (б), IMAGO 500 (в), T424 (г), DTA 9696 (д), ТКМ 21 (е), Термодат (ж), US 1000 (з).

Помимо основных функций, представленных в разделе 3.6.1, ряд микропроцессорных регуляторов выполняют дополнительные функции, а именно:

- 341) фильтрацию, масштабирование, извлечение квадратного корня;
- 342) математические и логические функции (сложение, вычитание, умножение, сравнение, вычисление среднего арифметического и др.);
- 343) автоматическую регулировку уровня засветки дисплея;

обеспечение питания регулятора от встроенных источников питания и др.

3.7. Взрывозащита АСУ ТП

В «Правилах устройств электроустановок» (ПУЭ) под взрывоопасной зоной подразумевается помещение или ограниченное пространство в помещении, в котором имеются или могут образоваться взрывоопасные смеси.

Согласно МЭК 79-1 А, 79-4 и ГОСТ 12.1.01-78 устанавливается следующая классификация взрывоопасных смесей: I — метан на подземных горных работах; II — другие горючие газы и пары за исключением метана. Все газы и пары разделены на три взрывоопасные группы по категориям НА, НВ и ПС. Для каждой из групп определен безопасный экспериментальный максимальный зазор (БЭМЗ) между фланцами оболочки, через который не распространяется взрыв наружу, и температура самовоспламенения. Для категории смеси НА величина зазора составляет 0,9 мм и более, для НВ — от 0,4 до 0,8 мм, для ПС — менее 0,45 мм [1.107-1.109]. В зависимости от температуры самовоспламенения взрывоопасные смеси делят на следующие группы: Т1 (температура воспламенения более 450 °С); Т2 (температура самовоспламенения 300...450 °С); Т3 (200...300°С); Т4 (135... 200°С); Т5 (100... 135°С); Т6 (85...100°С). Более высокий температурный класс перекрывает более низкие температурные классы.

В Европе, в том числе в России, руководствуются рекомендациям стандарта МЭК 79-10, согласно которому взрывоопасные зоны для газов и паров делят на следующие зоны: зона 0 (группа II) — взрывоопасная смесь присутствует постоянно; зона 1 (группа II) — зона с возможностью появления взрывоопасной смеси; зона 2 (группа II) — появление взрывоопасной смеси возможно при неправильной эксплуатации, опасность возникает в редких случаях. Аналогично, для пыли взрывоопасные зоны делят на зону 20 (непрерывная или частая опасность), зону 21 (случайная опасность) и зону 22 (редкая опасность ввиду неправильной эксплуатации). В соответствии с Европейской директивой зоны 20, 21 и 22 также относятся к группе II. Европейская норма взрывозащиты имеет аббревиатуру **ATEX** (с французского **ATmosphere EXplo- sible**) и охватывает все виды Европейской взрывозащиты.

В США и Канаде взрывоопасные зоны делят на классы. Класс I — легковоспламеняющиеся газы и пары; класс II — легковоспламеняющиеся пыль и порошки; класс III — легковоспламеняющиеся вещества в жидком или твердом состоянии; класс I делят на группы: А (ацетилен), В (водород), С (этилен, этил), D (ацетон, аммиак, бензол, бутан, гексан и аналогичные газы); класс II включает группы Е (порошок

алюминия, магния и др.), F (угольная пыль), G (горючая пыль, в том числе от древесины, пластмассы и пр.).

Известны следующие типы взрывозащиты: d — взрывонепроницаемая оболочка (ГОСТ 22782.6-81); e — повышенная надежность; ia — искробезопасная электрическая цепь (зона 0); ib — искробезопасная электрическая цепь (зона 1); h — герметичная изоляция; m — герметизация; n — отсутствие искрообразования (отсутствие воспламенения); o — погружение в масло; p — метод повышенного давления; q — заполнение порошком; s — специальная защита.

Взрывозащита типа h, m, n и s соответствуют европейским стандартам. Взрывозащита типа d предусматривает наличие в аппарате щелей, проходя через которые взрывоопасная смесь быстро охлаждается на воздухе и теряет способность к воспламенению (стандарт МЭК 60079-1). Тип взрывозащиты e предусматривает способы предотвращения искрообразования (блокировка, отключение и др.).

Тип взрывозащиты ia и ib (искробезопасная электрическая цепь — ИБЦ) основан на принципе ограничения энергии, запасенной в электрической цепи, что делает любую электрическую цепь неспособной к воспламенению (стандарт МЭК 60079-1). Этот вид взрывозащиты находит наибольшее применение для контрольно-измерительных приборов и оборудования. Основным преимуществом ИБЦ является повышенная надежность эксплуатации устройств и удобство их обслуживания.

Уровни взрывозащиты Ex ia и Ex ib соответствуют стандарту МЭК 60079-11-99 и ГОСТ 3 51330.10-99. Тип взрывозащиты Ex ia — особо взрывобезопасный, допускает до 2-х независимых неисправностей и применим для зон 0, 1 и 2. Тип взрывозащиты Ex ib допускает одну неисправность и применим для зон 1 и 2. Допустимые безопасные параметры электрической цепи: максимальное напряжение разомкнутой цепи — до 30 В, максимальный ток (ток короткого замыкания) — 100 мА, максимально допустимая мощность — 0,45 Вт. Ограничение энергии осуществляется блоками искрозащиты на стабилитронах или с помощью гальванически изолированных развязывающих устройств (трансформаторы, оптопары, реле).

Тип взрывозащиты Ex n соответствует стандарту МЭК 60079-15. Взрывозащита h предусматривает герметичную изоляцию, например заливку неподвижных частей конструкции компаундом. Тип взрывозащиты o (погружение в масло) применяется для изоляции элементов электрической цепи от атмосферы, например в масляных трансформаторах.

Пример маркировки по взрывозащите оборудования по ГОСТ 22782.6-81:1 Ex ia IB T3. 1 — номер зоны взрывоопасной среды; Ex — знак для электрооборудования, созданного в соответствии со стандартами МЭК; ia — обозначение типа защиты (ИБЦ); IB — категория взрывоопасной смеси; T3 — группа взрывоопасной смеси.

В качестве другого примера рассмотрим маркировку газоанализатора СТМ 10 с видом взрывозащиты 1Ex d HC T4.

1 — зона 1 с вероятностью появления взрывоопасной смеси при нормальной работе; d — тип взрывозащиты — взрывонепроницаемая (герметичная) оболочка; HC — класс II, группа C (атмосфера, содержащая этилен или газы и пары равнозначной опасности); T4 — группа смесей с температурой самовоспламенения от 135 до 200°C.

Взрывозащищенное оборудование подразделяется на элементарные устройства, искробезопасное и связанное оборудование [1.107, 1.108].

К элементарным устройствам относят устройства, у которых не превышены значения параметров: 1,2 В; 0,1 А; 20 мкДж; 25 мВт (термопары, термометры сопротивления, светодиоды, контакты). Эти устройства могут быть размещены во взрывоопасной зоне.

Искробезопасное оборудование — это оборудование, у которого внешние и внутренние электроцепи искробезопасны. Внешнее оборудование (клапаны, преобразователи и пр.), устанавливаемые во взрывоопасной зоне, должно быть сертифицировано на искробезопасность.

Связанное оборудование — это оборудование или его цепи, которые при нормальном или аварийном режиме работы не отделены гальванически от искробезопасных цепей. Это оборудование должно размещаться во взрывобезопасной зоне. При установке во взрывоопасной зоне оборудование должно быть сертифицировано на взрывозащиту.

Для установки во взрывоопасной зоне выпускается различное взрывозащищенное оборудование. К числу такого оборудования, например, относятся:

- 344) операторские станции iPC-Ex фирмы **Peppel+Fuchs**;
- 345) панельные РС типа PS-Ex410 фирмы **Peppel+Fuchs**;
- 346) мониторы iPX-Ex фирмы **Peppel+Fuchs**;
- текстовые и графические терминалы TERM Ex фирмы **Peppel+Fuchs**;
- 347) распределительные и сигнальные коробки (корпуса) Ex фирмы **Rittal**;
- 348) стальные корпуса фирмы **Weidmuller**;

349) клеммы с маркировкой взрывозащиты Ex e фирмы **WAGO**.

Устройства ввода/вывода с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь» (группа компаний «Pepperl+Fuchs»).

Производителем таких устройств является ряд фирм, среди которых компания **Eicon Instruments**, входящая в группу компаний **Pepperl+Fuchs**.

Напомним, что в России взрывоопасные зоны подразделяются на зоны 0 (класса В-1 — с выделением горючих газов или легковоспламеняющихся жидкостей и возможностью образования с воздухом взрывоопасных смесей), зоны 1 (класса В-1а — когда такие смеси могут образовываться только в результате аварий и неисправностей). Для смесей воздуха с мелкодисперсными твердыми горючими веществами установлены взрывоопасные зоны 20,21 (класса В-II) и 22 (класса В-IIа).

Барьеры искрозащиты выпускаются многими зарубежными и отечественными фирмами и делят на активные и пассивные барьеры искрозащиты.

Активные барьеры обеспечивают искробезопасность и питание датчиков с унифицированным выходным сигналом 0/4...20 мА (электропневматические преобразователи, датчики с выходным унифицированным сигналом). Обеспечение искробезопасности цепей первичных преобразователей достигается применением гальванической развязки на основе разделительных трансформаторов и оптронов, а также схем ограничения тока и напряжения.

Пассивные барьеры искрозащиты обеспечивают искробезопасность датчиков, не имеющих источников питания (термопары и термометры сопротивления без унифицированного выходного сигнала, сухие контакты и пр.). Основное отличие между активным барьером с гальванической изоляцией и пассивными барьерами заключается в том, что в активном барьере присутствуют безопасные элементы, назначением которых является ограничение опасного сигнала по напряжению и току, передаваемого во взрывоопасную зону.

Как правило, конструктивно блок искрозащиты представляет собой неразборный блок, залитый компаундом (рис. 3.43). Принцип взрывозащиты заключается в том, что при появлении опасного напряжения на зажимах барьера, значение которого превышает порог стабилизации, в цепи появляется ток, вызывающий срабатывание предохранителя.

Блоки искрозащиты на стабилитронах используют защищенные плавкими предохранителями стабилитроны для ограничения напряжения шунтированием

аварийного тока на землю. В нормальном режиме напряжение пробоя стабилитрона не нарушается и он не проводит ток. При аварии во взрывобезопасной зоне и при пре-



Рис. 3.43

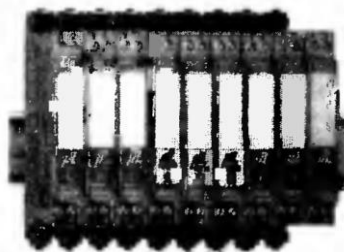


Рис. 3.44

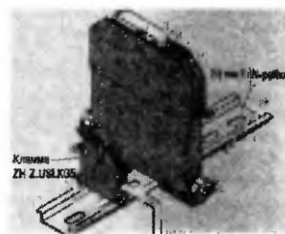


Рис. 3.45

вышении напряжения пробоя стабилитрон переходит в режим стабилизации напряжения, проводя ток, который ограничивается резистором; при дальнейшем увеличении тока срабатывает предохранитель. На рис. 3.44 показаны блоки искрозащиты рZ600 фирмы **Eicon Instruments**.

Заземление барьера достигается его установкой на заземляющую DIN-рейку (эквипотенциальное заземление, при котором сохраняется равный потенциал для различных проводящих частей). Также имеется одна клемма для заземления проводом (рис. 3.45). Устройства, устанавливаемые во взрывоопасной зоне, должны быть изолированы от земли. При необходимости их заземления применяются барьеры с гальванической развязкой.

Барьеры искрозащиты с гальванической развязкой серии рO300 и рD400 (одноканальные и двухканальные) фирмы **Eicon Instruments** имеют широкий спектр функциональных возможностей (ввод/вывод аналоговых и дискретных сигналов, преобразование сигналов термодпар, термометров сопротивления, включая токовый сигнал 4...20 мА, управление клапанами, ретрансляцию «СК» в опасной зоне на релейных контактах или на оптоизолированном транзисторном выходе типа «ОК» и др.), монтируются на DIN-рейку.

В табл. 3.15 приведены барьеры искрозащиты с гальванической развязкой (модули дискретного ввода/вывода).

Рабочий режим модуля конфигурируется пользователем: вход — контакт или проксимитор; входной контакт — нормально разомкнут или нормально замкнут; выходной транзистор — нормально закрыт или нормально открыт; сигнализация обнаружения повреждения линии.

К другим барьерам искробезопасности с гальванической развязкой относятся 4-канальные модули дискретного ввода/вывода HiD серии 2000. Модули имеют светодиодные индикаторы статуса сигнала и аварии, малую потребляемую мощность, монтируются на объединительной плате.

Модули HiD серии 3000 объединяются по шине Fieldbus. Задание и контроль параметров с управляющего персонального компьютера осуществляются через шину Profibus.

Группой компаний **Pepperl+Fuchs** выпускается искробезопасная система интерфейсов дистанционного процесса IS-RPI. Искробезопасные блоки ввода/вывода могут устанавливаться прямо во взрывоопасной зоне, что значительно сокращает стоимость электропроводки. Каждый функциональный модуль соединяет 16-канальные блоки ввода/вывода. Межсетевой интерфейс питает до 8 функциональных модулей и соединяет их с внешней полевой шиной (Profibus, ControlNet, Modbus, Foundation Fieldbus). Таким образом, один межсетевой интерфейс обеспечивает питание и сопряжение до 128 входов/выходов с полевой шиной. В систему IS-RPI входят функциональные модули, представленные в табл. 3.16.

3.8. Технические характеристики оборудования и компонентов распределенных систем управления

Таблица 3.1. Технические характеристики промежуточных реле

Тип реле (фирма)	Напряжение питания	Диапазон коммутируемых токов, А / напряжения, В	Количество контактов	Способ крепления	Габариты (Ш×Г×В), мм
РП-12 (ООО «Реле и автоматика»)	100, 110, 220 VAC	0,01...5/24...250	1НО, 1НЗ, 2П	На панель	98×147×136
РП-21 (ООО «Реле и автоматика»)	6, 12, 24, 27, 48, 60, 110 VDC; 12, 24, 36, 40, 110, 127, 220, 230, 240 VAC	0,003...6/12...220 VDC; 12...380 VAC	0...4 НО, 0...2 НЗ, 0...4 П	DIN-рейка	34×34×54
РП-16 (ООО «Реле и автоматика»)	12, 24, 48, 110, 220, VAC	0,05...5/24...220	4НО, 2НЗ, 2П	На панель	66×138×151
НН54Р (ООО «Реле и автоматика»)	12, 24, 110 VDC; 12, 24, 110, 220 VAC	3,0/12...230	4П	DIN-рейка	29×30×75
НН53Р (ООО «Реле и автоматика»)	12, 24, 110 VDC; 12, 24, 110, 220 VAC	5,0/12...230	3П	DIN-рейка	29×30×75
РЭП-34-22 (ОАО «Каширский завод электроаппаратуры»)	12, 24, 36, 40, 48, 110, 220, 230, 240, 380, 400, 415, 440, 500, 660 VAC	0,01...10/12...220 VDC; 12...660VAC	2НО, 2НЗ; 3НО, 1НЗ; 4НО, 4НЗ; 6НО, 2НЗ; 8НО	Розетка на DIN-рейку	56×39,5×72
55.34 (FINDER, «Германия»)	6, 12, 24, 48, 60, 110, 120, 230, 240 VAC; 6, 7, 9, 24, 48, 60, 110 VDC	5...10/250; 400 (1,5 А)	4П	Розетка серии 94.04 на DIN-рейку	20,7×27,7×37,2

Таблица 3.2. Технические характеристики трехполюсных электротепловых токовых реле

Тип реле	Номинальный ток, А	Номинальный ток несменных нагревательных элементов	Количество контактов	Номинальное напряжение, В
РТТ-1хх	0,2...25; 10...40; 5...25; 5...40	0,2; 0,25; 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10; 12,5; 16; 20; 25; 34	1П; 1НЗ	660 VAC; 440 VDC
РТТ-2	12,5...40; 50; 63	10; 12,5; 16; 20; 25; 32; 40; 63	1П; 1НЗ	660 VAC; 440 VDC
РТТ5-10-ххх	0,25...10	0,25; 0,32; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,2; 4,0; 5,0; 6,3; 8,5	1П; 1НЗ	660 VAC; 440 VDC

Таблица 3.3. Характеристики кнопок и кнопочных постов

Тип кнопки	Наличие фиксации	Тип контакта	Наличие подсветки	Форма головки	Цвет кнопки	Диаметр отверстия в панели, мм
XB6 DW 3B5B	Нет	1НЗ+1НО	Да	Прямоугольная	Зеленый	16,2 ^{+0,2}
XB6 DF 4B5B	Да	1НЗ+1НО	Да	Прямоугольная	Красный	16,2 ^{+0,2}
XB4 BA 21	Нет	1НО	Нет	Круглая	Черный	22,5
XB4 BW 34B5	Нет	1НЗ+1НО	Да	Круглая	Красный	22,5
XB5 AA 31	Нет	1НО	Нет	Круглая	Зеленый	22,5
XB5 AW 34B5	Нет	1НО+1НЗ	Да	Круглая	Красный	22,5
XB7 EA 31P	Нет	1НО	Нет	Круглая	Зеленый	22,4
XB7 EW 34	Нет	1НО	Да	Круглая	Красный	22,4
XB7 EN 03	Да	1НО	Нет	Круглая	Зеленый	22,4
90001 KR9P35RH13 (кнопка аварийного останова)	Да	1П	Да	Круглая	Красная	31
XB5 AT42 ¹⁾ (кнопка аварийного останова)	Да	1НЗ	Нет	Грибовидная	Красный	Диаметр кнопки 40 мм
Кнопочные посты: XAL D213 (2-кнопочный)	Нет	1НО+1НЗ	Нет	Круглая	1 — зеленый; 1 — красный	—
XAL D324 (3-кнопочный)	Нет	2НО+1НЗ	Нет	Круглая	1 — белый; 1 — красный; 1 — черный	—
XAL D363B (2-кнопочный пост с сигнальн. лампой) <i>Schneider Electric</i> Франция	Нет	1НО+1НЗ	Да	Круглая	1 — зеленый; 1 — красный Лампа — красная	—
800ES-FA3 (конт. блок 800E-3LX10)	Нет	1НО	Нет	Круглая	Зеленый	22,4
800ES-FA4 (конт. блок 800E-3LX01)	Нет	1НЗ	Нет	Круглая	Красный	22,4
800ES-LF3 (конт. блок 800E-3DL0X10)	Нет	1НО	Да	Круглая	Зеленый	22,4
800ES-LF4 (конт. блок 800E-3DL0X10)	Нет	1НЗ	Да	Круглая	Красный	22,4
800ES-MM4 (конт. блок 800E-3LX01) <i>Allen-Bradley, США</i>	Нет	1НЗ	Нет	Грибовидная	Красный	Диаметр кнопки 40 мм

¹⁾ Кнопки аварийного останова могут быть диаметром 35, 41, 57 мм. Тип толкателя — с пружинным возвратом и типа «тяги-толкай».

Таблица 3.4. Технические характеристики переключателей фирм *Schneider Electric* и *Allen-Bradley*

Тип переключателя в сборе	Состав комплекта	Количество и тип положений	Тип контакта	Наличие подсветки	Цвет ручки	Диаметр отверстия в панели, мм
Переключатели фирмы <i>Schneider Electric</i> , Франция						
XB4 BD21	ZB4 BZ101 ZB4 BD2	2 с фиксацией	1НО	Нет	Черная	22,5
XB4 BD33	ZB4 BZ103 ZB4 BD3	3 с фиксацией	2НО	Нет	Черная	22,5
XB7 ED33P	—	3 с фиксацией	2НО	Нет	Черная	22,5
XB4 BG33 (с ключом)	ZB4 BZ103 ZB4 BG3	3 с фиксацией	2НО	Нет	Черная	22,5
K2D 012QLH (2-полюсн.)	—	«0» + 2 (0, 45°, 90°)	№ контактов: 1, 2–3, 4 (45°) 5, 6–7, 8 (90°) 1, 2–5, 6–9, 10 (60°) 3, 4–7, 8–11, 12 (300°)	Нет	Черный	22
K10D002UCH (3-полюсн.)	—	«0» + 2 (0, 60°, 300°)				
Переключатели фирмы <i>Allen-Bradley</i> , США						
800EP-SM32	+800E –3LX11	3 с фиксацией «0»–«+60°»–«–60°»	1НО, 1НЗ	Нет	Черный	22,5
800EP-SM42	+800E –3LX11	4 с фиксацией	1НО, 1НЗ	Нет	Черный	22,5
800EP-LSM43	+800E –3DL0X11	3 с фиксацией «0»–«+60°»–«–60°»	1НО, 1НЗ	Да	Черный	22,5
800EP-LSM43	+800E –3DL0X11	4 с фиксацией	1НО, 1НЗ	Да	Черный	22,5
800EP-KM3R3 (с ключом)	+800E –3LX11	3 с фиксацией «0»–«+60°»–«–60°»	1НО, 1НЗ	Нет	Черный	22,5

Таблица 3.5. Характеристики светосигнальных ламп типа СКЛ ЗАО «Протон-Импульс», г. Орел

Тип СКЛ	Заменяемая арматура	Тип цоколя	Напряжение питания	Диаметр отверстия в панели, мм	Габаритные размеры (D×L), мм
1	2	3	4	5	6
СКЛ-1	СЦ128, СМ28, РН6, РН55, РН60, РН110, АС220	B15d/18	VAC: 110, 127, 220, 380 VDC: 24, 48	—	23,5×88,5
СКЛ-2				—	20,5×55
СКЛ-3		B15s/18	VAC: 220	—	23,5×90
СКЛ-4				—	20,5×57
СКЛ-5	Ж54, Ж110	B22	VAC: 127, 220, 380 VAC, VDC: 24, 48, 110, 220	—	22×55
СКЛ-6	РН6, РН-110, РН-120, РН-127, Ж75	E14		—	20,5×63
СКЛ-7	ИЛК, ИЛЖ, B220, B230	E27		—	28×57
СКЛ-8	A6, A12, A24, АНМ	B9s	VAC: 220 VAC, VDC: 24	—	12×34

1	2	3	4	5	6
СКЛ-9	РН6, РН-110, РН-120, РН-127, Ж75	E14	VAC: 127, 220, 380 VAC, VDC: 24, 48, 110, 220	—	23,2 × 57
СКЛ-10	СЦ128, СМ28, РН6, РН55, РН60, РН110, АС220	B15d/18		—	23,2 × 57
СКЛ-11 (бесцокольная)	АС-220, АЕ, АЕР	—		27 ^{+0,5}	36 × 57
СКЛ-12 (бесцокольная)	АМ, АСЛ, АМЕ	—		27 ^{+0,5}	30 × 57
СКЛ-13	—	E10/13	VAC: 220 VAC, VDC: 24	—	12 × 34
СКЛ-14 (бесцокольная)	АМ, АСЛ, АМЕ	—	VAC: 127, 220, 380 VAC, VDC: 24, 48, 110, 220	22 ^{+0,5}	30 × 62
СКЛ-15 (бесцокольная)	АСКМ	—	VDC: 24	8 ^{+0,5}	13 × 38
СКЛ-16 (бесцокольная)	АС1201, АВР-01	—	VAC: 127 VAC, VDC: 24, 48, 220	14 ^{+0,5}	18,5 × 50
СКЛ-17 (бесцокольная)	—	—	VAC: 220 VDC: 24	8 ^{+0,5}	13 × 38
СКЛ-18 (бесцокольная)	—	—	VAC: 127, 220 VAC, VDC: 24, 48	14 ^{+0,5}	20 × 53

Примечание: СКЛ11, СКЛ14 имеют винтовые контакты, остальные бесцокольные лампы имеют ламельные контакты под пайку. Цокольные лампы СКЛ6, СКЛ7, СКЛ9 и СКЛ13 имеют винтовой цоколь, остальные — типа «байонет».

Таблица 3.6. Характеристики светосигнальных ламп зарубежных фирм

Тип	Цвет светодиода	Напряжение питания	Диаметр отверстия в панели, мм	Габаритные размеры (D×L), мм	Степень защиты
1	2	3	4	5	6
Светодиодные сигнальные лампы <i>Schneider Electric</i> , Франция					
XVL A1 XVL A2 XVL A3	Зеленый, красный, желтый	VAC, VDC: 5,12, 24, 48	8,2 8,2 12,2	12×32 10×34 16×45	IP40, IP65
XB7 EVxx	Белый, зеленый, красный, желтый, синий, оранжевый	VAC, VDC: 24 (B) VAC: 120 (G) VAC: 230, 240	22,4	29×42	IP40
9001 KR35Lxxx	Зеленый, красный, желтый	VAC, VDC: 24, 48, 120	31		IP66

1	2	3	4	5	6
Светодиодные сигнальные блоки <i>Schneider Electric</i> , Франция					
Постоянного свечения: XVBL OB XVBL OG XVBL OM	Белый, зеленый, красный, желтый, синий, оранжевый	24 VDC 120 VAC 230 VAC	Цоколь BA15d	Диаметр 70	IP66
XVBC21 (базовый) XVBC2B XVBC2G XVBC2M	Белый, зеленый, красный, желтый, синий, оранжевый	24 VDC 120 VAC 230 VAC	Цоколь BA15d	Диаметр 70	IP66
Блоки со вспышкой: XVBL1B XVBL1G XVBL1M	Белый, зеленый, красный, желтый, синий, оранжевый	24 VDC 120 VAC 230 VAC	Цоколь BA15d	Диаметр 70	IP66
XVPC21 (базовый) XVPC6B	Белый, зеленый, красный, желтый, синий, оранжевый	24 VAC, VDC	Газоразрядная трубка 0,3 Дж;	Диаметр 50	IP65
XVPC6M		230 VAC	Газоразрядная трубка 0,6 Дж;	Диаметр 50	IP65
Светосигнальные колонны (светодиодные) <i>Schneider Electric</i> , Франция					
2 сигнальных блока + зуммер: XVMB2RGS XVMG2RGS XVMM2RGS	Красный, зеленый постоянного свечения	24 VDC 120 VAC 230 VAC		Диаметр 45	IP42
3 сигнальных блока + зуммер: XVMB2RAGS XVMG2RAGS XVMM2RAGS	Красный, оранжевый, зеленый постоянного свечения	24 VDC 120 VAC 230 VAC	—	Диаметр 45	IP42
4 сигнальных блока + зуммер: XVDB2SGAR	Белый, зеленый, оранжевый, красный	24 VDC	—	Диаметр 70	IP40
5 сигнальных блоков: XVEC2B XVEC2G XVEC2M	Оранжевый, синий, зеленый, красный, прозрачный	24 VDC 120 VAC 230 VAC	—	Диаметр 70	IP54
Светосигнальная колонна фирмы <i>RITTAL</i> , Германия					
СИД ¹⁾ (арт. 2372.100)	Красный, желтый, зеленый	24 VAC, VDC	20	Диаметр 70 (высота 177)	IP65

¹⁾ Модульная сигнальная колонна СИД может включать до 4...5 сигнальных блоков (при одинаковом напряжении питания) и акустический элемент.

Таблица 3.7. Характеристики световых табло ОАО «Завод Электропульт».

Тип	Напряжение питания	Тип лампы накаливания	Тип цоколя	Размер светового поля (Н×Л), мм	Размер отверстия в панели щита, мм
ТСБ	VAC: 60, 127, 220	2×Ц60-8 (Ц60-10, Ц127-10, Ц215-10)	B15d/18	39×92	39×104
TSM	VAC: 60, 127, 220	2×Ц60-8 (Ц60-10, Ц127-10, Ц215-10)	B15d/18	27×38	39×49
ТСКЛ	VAC, VDC: 220 VDC: 6, 12, 24, 48, 60	КМ	—	28×28	31×41
TCC	VDC: 110	2xPH110-8	—	28×93	39×104

Таблица 3.8. Характеристики автоматических выключателей

Тип	Число полюсов	Номинальный ток, А	Номинальное напряжение, В	Ток отключения, кА	Число циклов	Габаритные размеры (В×Ш×Г), мм
1	2	3	4	5	6	7
Отечественные автоматические выключатели (ОАО «Электроприбор», Курск)						
АП50Б-2М	2	1,6; 2,5; 4; 6,3; 10; 16; 25; 40; 50; 63	500 VAC 220 VDC	0,3...6,0; 0,5...40	50000	138,5×81×89
АП50Б-3М	3		500VAC			138,5×103×89
АП-63	1	0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	380 VAC 110 VDC	3,5; 2,5	30000	138×28×84
ВА13-29	2; 3	0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63	660 VAC 440 VDC	12; 10	30000	157×88×122 (3P)
ВА21-29	1; 2; 3	0,6...63; 0,6...63; 80; 100	380 VAC 240 VDC 380 VAC	6; 10; 4; 6	30000	147×35×125 (1P) 147×88×121 (3P)
ВМ-40 (модульный)	1; 2; 3	2; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40	230/400 VAC 48 VDC 230 VAC 90 VDC 400 VAC	4,5	10000	80×18×74; 80×35,6×74; 80×53,2×74
АЕ 2040	3	16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63	660 VAC	4	20000	207×75×120
АЕ 2050	3	80; 100	380 VAC	6	20000	
Автоматические выключатели фирмы ABB, Германия						
Серия S230R: S231R S232R S233R S234R	1 2 3 4	6; 10; 16; 20; 25; 32; 40	230/400 VAC	4,5	10000	4 модуля
Серия S250: S251 S252 S253 S254	1 2 3 4	0,5; 1; 1,6; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63	230/400 VAC	6	10000	4 модуля

1	2	3	4	5	6	7
Серия S280: S281 S282 S283	1 2 3	80; 100	230/400 VAC	6	10000	1...3 модуля
Серия S500: S500	3	6; 8; 10; 13; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63	230/400 VAC	25	10000	3 модуля
Серия SACE Tmax: TmaxT1 1P TmaxT1	1 3; 4	160	230/240 VAC 125 VDC 690 VAC	25 4	8000	130×25,4×70(1P) 130×76×70
Серия SACE Isomax ¹⁾	3; 4	125	500 VAC 250 VDC	8	8000	120×78×70
Автоматические выключатели фирмы <i>Schneider Electric</i> , Франция						
C60a	1, 2, 3, 4;	2; 4; 6; 10; 16; 20; 25; 32; 40	230/400 VAC	4,5;	20000	1...3 модуля
C60N	—	0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63	240/415 VAC	1P : 10 (230VAC) 1P : 3 (400VAC)	10000	—
C60H	—	0,5; 0,75; 1; 2; 3; 4; 6; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63	440 VAC	2, 3, 4P : 20 (230VAC) 10 (400VAC)	10000	—
C60L	—	0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63	440 VAC	10	10000	—
C120N	—	63; 80; 100; 125	125 VDC (1P) 250 VDC (2P)	1P: 25 2, 3, 4: 50	5000	3 модуля
C120H	1, 2	10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125	—	1P : 3; 2, 3, 4P : 6	10000	—
C32H-DC	—	1; 2; 3; 6; 10; 16; 20; 25; 32; 40 (DC)	—	1P : 4,5; 2, 3, 4: 10	—	—
Дифференциальные автоматические выключатели фирмы <i>Schneider Electric</i> , Франция						
Серия ELETTROSTOP: DS 941/951 DS 650/670 F 500K F 360 ABB, Германия	1; 2 2	6...40 0,5...63 0,4...45 16...80	230/240 VAC 230/400 VAC 230/400/690 VAC 230/400 VAC	3; 6; 7,5; 25; 1,5	10000/ 20000	Ток утечки 30...300 мА
DPN N Vigī	1; 2; 3; 4	6; 10; 16; 20; 25; 32; 40	230 VAC	—	20000	Ток утечки 30...300 мА
ID AD 63 Schneider Electric, Франция	2; 4 2	25; 40; 63; 80; 100 16; 25; 40	240 VAC 230 VAC	— 4,5	20000 20000	

¹⁾ Серия SACE IsomaxS (S1...S8) рассчитана на токи от 160 до 3200 А.

Таблица 3.9. Технические характеристики промышленных компьютеров

Тип, фирма	Процессор	Число слотов рас- ширения		Операт. память, Мб	HDD Гбайт	Коммуникации	Дисплей (TFT ЖК)	Клавиату- ра (число клавиш)	Потреб. мощ- ность, Вт	Габариты (Ш×В×Г) мм
		ISA	PCI							
Рабочие станции										
AWS-8248V (Advantech)	Celeron 400 МГц	9	4	—	—	Ethernet 10/100 Base-T; 3×RS-232; 1×RS-485	15"	60	300	482×356×229
AWS-9124 (Advantech)		4× (ISA/ PCI)		256	—		12,1"		200	342×280×205
WS-855A (ICOS)	—	10		256	80	1×USB; 1×PS/2	15"	60	300	482×354×265
Front Station 5244 (Ниешанц-Автоматика)	Pentium 4 2,4 ГГц	4	4	256	80	Ethernet 10/100 Base- T; 2×RS-232; 1×USB 2.0; 1×LPT	15"	60	300	483×354×265
WS-615 (ICP Electronics)	—	7× (ISA/PCI)		—	—	1×RS-232, 1×RS-485, PS/2, 1×LPT	15"	51+24	250	483×266×265
Промышленные панельные компьютеры (ППК)										
PPC-154T (Advantech)	Pentium 4 3,06 ГГц	—	1	2 Гбайт	—	Ethernet 10/100 Base-T; PS/2; 2×RS-232; 4×USB 2.0; 1×LPT	15"	—	180	420×323×105
PPC-174T (Advantech)		—	2	2 Гбайт	—	PS/2; 3×RS-232; 4×USB 2.0; 1×LPT	17"	—	180	446×382×127
IPPC-9120/9150 (Advantech)	Pentium III 850 МГц	1	1	256	—	Ethernet 10/100 Base-T; 3×RS-232; 1×RS-485; 2×USB 2.0; 1×LPT	15"	—	70	402×302×127
TPC-1570 (Advantech)	Celeron M 1 ГГц	1 (PC 104+)		256... 512	—	Ethernet 10/100 Base-T; 2×RS-232; 1×RS-485; 2×USB 2.0; 1×LPT; PS/2	15"	—	24 VDC	383×307×55

ROBO-5000-5163T (ICOS)	Pentium III 1 ГГц	—	1	1 Гбайт	40	3×RS-232; 1×RS-485; 2×USB 2.0; 1×LPT;	15"	—	150	410×309×103
ROBO-5000-5163T (ICOS)	Celeron 2 ГГц	—	1	2 Гбайт	40	Ethernet 10/100 Base-T; 3×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT;	17"	—	200	452×356×103
PC 670-15» (Siemens)	Celeron 300 МГц	1×ISA/ PCI, 1×PCI, 1×PCMCIA		256	8	Ethernet 10/100 Base-T; 2×USB 2.0; Profibus DP	15"	94	300	483×355×130
RACK PC										
ROBO-2000-4075 (ICOS)	Pentium 4 2,8 ГГц	—	3 3× PCI—x	1024	120	4×RS-232; 4×USB 2.0	—	—	525	482×177×450
ROBO-2000-4775 (ICOS)	Pentium 4 3,2 ГГц	5	8	2 Гбайт	160		—	—	400	
RACK-307 (ICP Electronics)	—	10×ISA/PCI		—	—	PS/2	7" (моно)	—	250	430×177×465
RACK-300A (ICP Electronics)	—	9×BP—145/ PCI		—	—	PS/2	—	—	200	430×177×430
IPC-510-SYS1-4 (Advantech)	Pentium 4 2,8 ГГц	—	4	512	80	Ethernet 10/100 Base-T; 1×RS-232; 8×USB 2.0; 1×LPT; 2×PS/2	—	—	300	482×177×450
IPC-510-SYS2-1 (Advantech)	Celeron 2,53 ГГц	7	4	512	80	Ethernet 10/100 Base-T; 2×RS-232; 6×USB 2.0; 1×LPT; 1×PS/2	—	—	250	
FRONT RACK 4544 (Ниешанц-Автоматика)	Celeron D 2,53 ГГц	—	3	256	40	Ethernet 10/100 Base-T; 1×RS-232; 4×USB 2.0; 1×LPT	—	—	310	431×176×480

Управление цифровых образовательных технологий

Тип, фирма	Процессор	Число слотов рас- ширения		Операт. память, Мбайт	HDD Гбайт	Коммуникации	Дисплей (TFT ЖК)	Клавиату- ра (число клавиш)	Потреб. мощ- ность, Вт	Габариты (Ш×В×Г) мм
		ISA	PCI							
ARK-3389 (Advantech)	Pentium M 1,4 ГГц	—	—	256	—	Ethernet 10/100 Base-T; 1×RS-232; 1×RS-485 1×USB 2.0; 1×PS/2	—	—	46 (12...24 VDC)	264,5×69×137
UNO-2176 (Advantech)	Celeron M 1 ГГц, PentiumM 1,4 ГГц	PCMCIA, PC-104		512	—	2×Ethernet 10/100 BaseT, 2×RS-232/422/485, 2×USB	—	—	24	255×152×59
Simatic BOX PC620 (Siemens)	Pentium III 700 МГц	2-3	2-3	64...768	20	Ethernet 10/100 Base-T; 1×USB 2.0; Profibus DP	—	—	200	88×254×266
PC7 rugged (SBS Technologies)	Celeron 556 МГц	3× PC/104+		64...512	20 Гбай- т; Флэш—2	2×Ethernet 10/100 Base-TX; 2×RS-232 2×RS-422/485;	—	—	40 (10...30 VDC)	220×83× 125
AMC-cPCI 3000 (SBS Technologies)	Проц. Модуль RL4 PowerPC 500 МГц	OC: V×Works 2		128	Флэш— 64 Мбайт	1×Ethernet 10/100 Base-T; 4×RS-232 /422/485;	—	—	65 (16...40 VDC)	273×89× 325
Tower PC										
Simatic PC R145 PIII Tower (Siemens)	Pentium III 600 МГц	3-4	5-6	64...768	20	Ethernet 10/100 Base-T; Profibus DP	—	—	300	170×350×445
Front Desk Wall 1244 (Ниешанц- Автоматика)	Celeron D 2,4 ГГц	2	4	256	40	Ethernet 10/100 Base-T; 2×RS-232; 8×USB 2.0; 1×LPT	—	—	300	192×253×432

Переносные ПК («mobile»)										
PWS-1409/TP (Advantech)	—	4	4	Определяется пользователем			14,1"	108	300	400×320×200
ROBO-4000-5074M (ICOS)	Pentium 4 2,8 ГГц	3	4	256... 2 Гбайт	40	Ethernet 10/100 Base-T; 4×RS-232; 6×USB 2.0; 1×LPT	15"	108	400	400×356×260
ROBO-4000-POLAR (ICOS)	Celeron 2,4 ГГц	—	6	256... 1 Гбайт	40	2×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT	15"	108	350	400×201×230
FRONT- Portable 4244 (Ниешанц-Автоматика)	Celeron D 2,4 ГГц	3	4	256	80	Ethernet 10/100 Base-T; 2×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT	12"	108	300	400×291×210
Mobile Forse Getac M220 (MiTAC Technology Corp.)	Pentium M 1,6 МГц	—	2	256... 2 Гбайт	80	Ethernet 10/100 Base-T; 1×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT; 1×PS/2; GSM	14,1"	87	40 (12...32 VDC); 200 (100... 240 VAC)	328×272×42
Промышленные планшетные компьютеры										
ГРАНАТ (НПО «Техника-Сервис»)	Pentium M 2,2 ГГц	—	—	512... 1 Гбайт	20... 120	1×RS-232; 1×USB 2.0; 2×PCMCIA; 1×LAN	8,4" XGA	8 функц. клавиш	Внешний: 100... 240 VAC	270×197× 46
Промышленные карманные компьютеры										
КУЛОН (НПО «Техника-Сервис»)	×Scale P×A255 400 МГц	—	—	128	—	2×RS-232; 1PCMCIA; 1×USB 2.0	4" VGA	4 функц. клавиши	Аккумуля. 7,4В, 1800 мАч	90×150×33

Управление цифровых образовательных технологий

ROBO-5000-5163T (ICOS)	Pentium III 1 ГГц	—	1	1 Гбайт	40	3×RS-232;1×RS-485; 2×USB 2.0; 1×LPT;	15"	—	150	410×309×103
ROBO-5000-5163T (ICOS)	Celeron 2 ГГц	—	1	2 Гбайт	40	Ethernet 10/100 Base-T; 3×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT;	17"	—	200	452×356×103
PC 670-15» (Siemens)	Celeron 300 МГц	1×ISA/ PCI, 1×PCI, 1×PCMCIA		256	8	Ethernet 10/100 Base-T; 2×USB 2.0; Profibus DP	15"	94	300	483×355×130
RACK PC										
ROBO-2000-4075 (ICOS)	Pentium 4 2,8 ГГц	—	3 3× PCI—x	1024	120	4×RS-232: 4×USB 2.0	—	—	525	482×177×450
ROBO-2000-4775 (ICOS)	Pentium 4 3,2 ГГц	5	8	2 Гбайт	160		—	—	400	
RACK-307 (ICP Electronics)	—	10×ISA/PCI		—	—	PS/2	7" (моно)	—	250	430×177×465
RACK-300A (ICP Electronics)	—	9×BP—145/ PCI		—	—	PS/2	—	—	200	430×177×430
IPC-510-SYS1-4 (Advantech)	Pentium 4 2,8 ГГц	—	4	512	80	Ethernet 10/100 Base-T; 1×RS-232;8×USB 2.0; 1×LPT; 2×PS/2	—	—	300	482×177×450
IPC-510-SYS2-1 (Advantech)	Celeron 2,53 ГГц	7	4	512	80	Ethernet 10/100 Base-T; 2×RS-232;6×USB 2.0; 1×LPT; 1×PS/2	—	—	250	
FRONT RACK 4544 (Ниешанц-Автоматика)	Celeron D 2,53 ГГц	—	3	256	40	Ethernet 10/100 Base-T; 1×RS-232; 4×USB 2.0; 1×LPT	—	—	310	431×176×480

Тип, фирма	Процессор	Число слотов рас- ширения		Операт. память, Мбайт	HDD Гбайт	Коммуникации	Дисплей (TFT ЖК)	Клавиату- ра (число клавиш)	Потреб. мощ- ность, Вт	Габариты (Ш×В×Г) мм
		ISA	PCI							
ARK-3389 (Advantech)	Pentium M 1,4 ГГц	—	—	256	—	Ethernet 10/100 Base-T; 1×RS-232; 1×RS-485 1×USB 2.0; 1×PS/2	—	—	46 (12...24 VDC)	264,5×69×137
UNO-2176 (Advantech)	Celeron M 1 ГГц, PentiumM 1,4 ГГц	PCMCIA, PC-104		512	—	2×Ethernet 10/100 BaseT, 2×RS-232/422/485, 2×USB	—	—	24	255×152×59
Simatic BOX PC620 (Siemens)	Pentium III 700 МГц	2-3	2-3	64...768	20	Ethernet 10/100 Base-T; 1×USB 2.0; Profibus DP	—	—	200	88×254×266
PC7 rugged (SBS Technologies)	Celeron 556 МГц	3× PC/104+		64...512	20 Гбай- т; Флэш—2	2×Ethernet 10/100 Base-TX; 2×RS-232 2×RS-422/485;	—	—	40 (10...30 VDC)	220×83× 125
AMC-cPCI 3000 (SBS Technologies)	Проц. Модуль RL4 PowerPC 500 МГц	OC: V×Works 2		128	Флэш— 64 Мбайт	1×Ethernet 10/100 Base-T; 4×RS-232 /422/485;	—	—	65 (16...40 VDC)	273×89× 325
Tower PC										
Simatic PC R145 PIII Tower (Siemens)	Pentium III 600 МГц	3-4	5-6	64...768	20	Ethernet 10/100 Base-T; Profibus DP	—	—	300	170×350×445
Front Desk Wall 1244 (Ниешанц- Автоматика)	Celeron D 2,4 ГГц	2	4	256	40	Ethernet 10/100 Base-T; 2×RS-232; 8×USB 2.0; 1×LPT	—	—	300	192×253×432

Переносные ПК («mobile»)										
PWS-1409/TP (Advantech)	—	4	4	Определяется пользователем			14,1"	108	300	400×320×200
ROBO-4000-5074M (ICOS)	Pentium 4 2,8 ГГц	3	4	256... 2 Гбайт	40	Ethernet 10/100 Base-T; 4×RS-232;6×USB 2.0; 1×LPT	15"	108	400	400×356×260
ROBO-4000-POLAR (ICOS)	Celeron 2,4 ГГц	—	6	256... 1 Гбайт	40	2×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT	15"	108	350	400×201×230
FRONT- Portable 4244 (Ниепанц-Автоматика)	Celeron D 2,4 ГГц	3	4	256	80	Ethernet 10/100 Base-T; 2×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT	12"	108	300	400×291×210
Mobile Forse Getac M220 (MiTAC Technology Corp.)	Pentium M 1,6 МГц	—	2	256... 2 Гбайт	80	Ethernet 10/100 Base-T; 1×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT; 1×PS/2; GSM	14,1"	87	40 (12...32 VDC); 200 (100... 240 VAC)	328×272×42
Промышленные планшетные компьютеры										
ГРАНАТ (НПО «Техника-Сервис»)	Pentium M 2,2 ГГц	—	—	512... 1 Гбайт	20... 120	1×RS-232; 1×USB 2/0; 2×PCMCIA; 1×LAN	8,4" XGA	8 функц. клавиш	Внешний: 100... 240 VAC	270×197× 46
Промышленные карманные компьютеры										
КУЛИОН (НПО «Техника-Сервис»)	×Scale P×A255 400 МГц	—	—	128	—	2×RS-232; 1PCMCIA; 1×USB 2.0	4" VGA	4 функц. клавиши	Аккумуля. 7,4В, 1800 мАч	90×150×33

Управление цифровых образовательных технологий

Переносные ПК («mobile»)										
PWS-1409/TP (Advantech)	—	4	4	Определяется пользователем			14,1"	108	300	400×320×200
ROBO-4000-5074M (ICOS)	Pentium 4 2,8 ГГц	3	4	256... 2 Гбайт	40	Ethernet 10/100 Base-T; 4×RS-232;6×USB 2.0; 1×LPT	15"	108	400	400×356×260
ROBO-4000-POLAR (ICOS)	Celeron 2,4 ГГц	—	6	256... 1 Гбайт	40	2×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT	15"	108	350	400×201×230
FRONT- Portable 4244 (Нидерланд- Автоматика)	Celeron D 2,4 ГГц	3	4	256	80	Ethernet 10/100 Base-T; 2×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT	12"	108	300	400×291×210
Mobile Forse Getac M220 (MiTAC Technology Corp.)	Pentium M 1,6 МГц	—	2	256... 2 Гбайт	80	Ethernet 10/100 Base-T; 1×RS-232; 2×USB 2.0; 1×LPT; 1×PS/2; GSM	14,1"	87	40 (12...32 VDC); 200 (100... 240 VAC)	328×272×42
Промышленные планшетные компьютеры										
ГРАНАТ (НПО «Техника-Сервис»)	Pentium M 2,2 ГГц	—	—	512... 1 Гбайт	20... 120	1×RS-232; 1×USB 2/0; 2×PCMCIA; 1×LAN	8,4" XGA	8 функц. клавиш	Внешний: 100... 240 VAC	270×197× 46
Промышленные карманные компьютеры										
КУЛОН (НПО «Техника-Сервис»)	×Scale P×A255 400 МГц	—	—	128	—	2×RS-232; 1PCMCIA; 1×USB 2.0	4" VGA	4 функц. клавиши	Аккумуля. 7,4В, 1800 мАч	90×150×33

Управление цифровых образовательных технологий

Таблица 3.10. Технические характеристики панелей оператора

Модель	Тип панели	Число строк символов	Число клавиш	ПЦП, ОС, объем памяти	Размер экрана	Интерфейс	Питание	Габариты	Пакет ПО
Simatic TD 200 (Siemens)	Текстовая клавишная	2×20	10	—	—	RS-485	24 VDC, 100 mA	148×76	Step7 Micro/Win
Simatic TP 070 (Siemens)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 66 МГц, Wind. CE 128 кбайт	5,7"	RS-485	24 VDC, 240 mA	221×156	Step7 Micro/Win
Simatic OP 17 (Siemens)	Текстовая клавишная	4×20	22-системные; 24-функц-е	RMOS, 256 кбайт	—	RS-232/ RS-485 (MPI, ProfibusDP)	24 VDC, 250 mA	240×204	Simatic ProTool/ Pro v5.2
Simatic TP 170B (Siemens)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 66 МГц, Wind. CE 768 кбайт	5,7"	RS-232/ RS-485 (MPI, ProfibusDP)	24 VDC, 250 mA	240×252	ProTool/ Pro v5.2
Simatic OP 170B (Siemens)	Графическая клавишная	—	35-системные; 24-программируемые	RISC, 66 МГц, Wind. CE 768 кбайт	5,7"	RS-232/ RS-485 (MPI, ProfibusDP)	24 VDC, 250 mA	240×252	ProTool/ Pro
Simatic TP 270-10 (Siemens)	Графическая сенсорная	—	—	RISC 64 разр., 66 МГц, Wind. CE 2 Мбайт	10,4" цветной	RS-232/ RS-485, USB, та Ethernet TCP/IP, MPI, Profibus	24 VDC, 900 mA	335×275	ProTool v6.0
Simatic OP 270-10 (Siemens)	Графическая клавишная	—	38-системные; 36-программируемые	RISC 64 разр., 66 МГц, Wind. CE, 2 Мбайт	10,4" цветной	RS-232/ RS-485, USB, Kappa Ethernet TCP/IP, MPI, Profibus	24 VDC, 900 mA	483×310	ProTool v6.0
Simatic MP370 (Siemens)	МФ графическая клавишная	—	38-системные, 36-программируемые	RISC 64-разр., Wind. CE, 12 Мбайт	12,1" цветной	RS-232/RS-422/RS-485; RS-232, MPI/Profibus Ethernet	24 VDC, 1150 mA	483×310	ProTool v5.1 SP3
XBT P (Schneider Electric)	Текстовая клавишная	2×20 или 4×40	12-функц-е; 10-сервис-е	80386, Magelis, 8 Мбайт	—	RS-232/ RS-485, (ASi, Modbus)	24 VDC, 400 mA	253×152	XBT L 1003
XBT F01 (Schneider Electric)	Графическая клавишная	—	10-функц-е; 12-сервисные; 8-прогр-е	80386, Magelis, 8 Мбайт	5,7"	RS-232/ RS-485, (ASi, Modbus, EthernetTCP/IP)	24 VDC, 1400 mA	220×265	XBT L 1003

XBT F03 (Schneider Electric)	Графическая сенсорная	—	—	Pentium, Magelis, 32 Мбайт	10,4" цветной	RS-232/ RS-485, EthernetTCP/IP	24 VDC, 1400 mA	296×222	XBT L 1003
GT1155 (Mitsubishi Electric)	Графическая сенсорная	—	—	4 Мбайт	5,7"	RS-232/ RS-485	24 VDC, 400 mA	164×135	GT Works 2
MAC E700 (Mitsubishi Electric)	Графическая клавишная	—	16-функцион. 6 touchkey	400 кбайт–8 Мбайт	Цветной 640×480	RS-232/ RS-485 (ProfibusDP)	24 VDC,	214×232	E Desig-ner
Dayapanel (GE Fanuc)	Текстовая клавишная	8×40	10	100 страниц	—	RS-232/ RS-485, (Profibus, Genius)	24 VDC,	208×188	Cimplici-ty
QuickPanel (GE Fanuc)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 100 МГц, 4 Мбайт	12,1" цветной	EthernetTCP/IP	24 VDC	317×243	Cimplici-ty
H-K30m-S (Beijer Electronics)	Текстовая клавишная	2×20 или 4×40	16 (10-программируемые)	RISC, 4 Мбайт	3"	RS-232/ RS-422/ RS-485	24 VDC	173×105	Information Designer
Cimrex 90D (Beijer Electronics)	Графическая, текстовая	—	22-функциональные	RISC, 1,6 Мбайт	10,4" цветной	RS-232, RS-422	24 VDC	367×274	Information Designer
Exter T150 (Beijer Electronics)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 416 МГц, 64 Мбайт	15" цветной	RS-232, RS-485 /422, Ethernet	24 VDC	356×279	Information Designer
HMI 1206 (BrainChild)	Графическая сенсорная	—	—	SHARP-ARM9 200 МГц, 32 Мбайт	12,1" цветной	RS-232/RS-485, Ethernet	24 VDC	312×246	HMI Studio
PWS 3260-TFT (Hitech)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 206 МГц, 4 Мбайт	10,4" цветной	RS-232, RS-422, RS-485	24 VDC, 800 mA	286×211	ADP
TP04G (Delta Electronics)	Текстовая клавишная	4×16, 8×16, 8×25	10-функциональные	16-разр. ПЦП, 256 кбайт	3"	RS-232, RS-485	24 VDC, 250 mA	147×97	TPEdit
DOP-A75CSTD (Delta Electronics)	Графическая сенсорная	—	4-пользовательские	RISC, 202 МГц, RealTime OS, 32 Мбайт	7,5" цветной	RS-232, USB, RS-232/RS-485	24 VDC, 400 mA	243×178	SCredit
EZ-420 (DirectLogic)	Текстовая клавишная	4×20	5	—	—	RS-485 (Modbus RTU)	24 VDC	—	EZ-Textedit

Управление цифровых образовательных технологий

Модель	Тип панели	Число строк символов	Число клавиш	ПЦП, ОС, объем памяти	Размер экрана	Интерфейс	Питание	Габариты	Пакет ПО
EZ-S8C-F (Direct Logic)	Графическая сенсорная	—	192 Touch Screen	Motorola, 40 МГц, 512 кбайт–1 Мбайт	8,2" цветной	RS-232, RS-232/RS-422/RS-485	24 VDC, 700 mA	216×268	EZ-Touchedit
Blue 300 (Maple Systems)	Графическая клавишная	—	5-функциональные 5-пользовательские	256 кбайт	3"	RS-232, RS-485 (Modbus)	24 VDC, 140 mA	147×97	EZware-5000
Gold Series, мод. 215A (Maple Systems)	Графическая сенсорная	—	—	Intel Celeron 2,0 ГГц, Wind. XP, 256 кбайт, /40 Гбайт	15"	4xCOM 2xUSB 2.0, Ethernet 10/100/1000	100-240 VAC	300×400×100	WebStudio, v.6.1
V04 (ЗАО Текон, Россия)	Текстовая клавишная	4×16, 8×21	29	16-разр. ПЦП, 14,7 МГц, 128 кбайт	3"	RS-232, RS-485 (T4000, CAN)	24 VDC, 200 mA	180×105	Настройка с клавиатуры или по протоколу T4000
Мобильные панели оператора									
Simatic Mobile Panel 170 (Siemens)	Графическая клавишная + сенсорная	—	14-программируемые	RISC, 66 МГц, Wind. CE, 768 кбайт	5,7"	RS-232, RS-422/RS-485, (MPI/ ProfibusDP)	24 VDC, 300 mA (через соединит. коробку)	Дiam. 245×58	Simatic ProTool/Lite, Simatic ProTool/ Pro v6.0
GP2301 HL (Digital/Pro-face)	Графическая клавишная + сенсорная	—	12-программир., 16-сенсорные	1 Мбайт	5,7"	RS-232/ RS-422, Modbus+, Profibus	24 VDC, 500 mA	253×185×75	GP-PRO/ PBIII
MT812IT (Weitek)	Графическая сенсорная	—	—	RISC 200 МГц, 64 Мбайт, флэш 32 Мбайт	12,1"	RS-232, 2×RS-232/RS-485, Ethernet 10/100 BaseT, 3×USB 2.0	24 VDC	204×150×50	Easy Builder

Таблица 3.11. Технические характеристики блоков питания ICP Electronics

Модель	Тип	Мощность, Вт	Входное напряжение, В	Ток нагрузки, А	Рабочая температура, °С	Габариты, мм
ACE-C232	AT (дублирован)	2×230	110/220 VAC	При +5 В: 20 При +12 В: 10 При -5 В: 0,5 При -12 В: 0,5	0...+50	150×140×86
ACE-828A	ATX	280	90...130 VAC; 180...260 VAC	При +5 В: 25 При +12 В: 10 При -5 В: 0,5 При -12 В: 0,5	-20...+70	150×140×86
ACE-925C	AT	250	24 VDC (19...30 VDC)	При +5 В: 25 При +12 В: 6 При -5 В: 1,0 При -12 В: 2,0	-20...+70	150×140×86

Таблица 3.12. Характеристики источников бесперебойного питания

Модель, фирма	Мощность, кВА	Время автономной работы, мин. (нагрузка, ВА)	Входное-выходное напряжение, В	Интерфейс	Габариты (Ш×В×Г), мм	Тип ИБП
1	2	3	4	5	6	7
Powerware 5115	0,5 0,7 1,0 1,4	5 (500) 13 (500) 15 (500) 28 (500)	220/230/240	—	150×185×268 (для 0,5 кВА)	Line-Interactive *
Powerware 9305	7,5 10,0 15,0	44 30 18	3×380	2×RS-232	400×710×750	On-line
Powerware 9315 Powerware (Великобритания)	200 400	8...35 7...21	3×380	RS-232, RS-485	1654×1867×800 1880×1867×800	On-line
Dialog Active Rack DAR 300 Dialog Power Centre II 12DPC 200 Riello UPS Manufacturing (Италия)	3 200	12 10...30	230 380/400/415	RS-232, USB RS-232/ RS-422 «СК»	482,6×133×490 (19" исп.) 1500×1800×900	Модульный On-line
HF Top Line Meta System (Италия)	4	7...22	230	RS-232, «СК»	560×480×270	On-line
Primewave	10	10	220/230/240	RS-232, «СК»	430×1200×800	On-line
Conceptpower Ne Wave (Швейцария)	20	10	230/3×380	RS-232, «СК»	483×400×675	On-line

Управление цифровых образовательных технологий

XBT F03 (Schneider Electric)	Графическая сенсорная	—	—	Pentium, Magelis, 32 Мбайт	10,4" цветной	RS-232/ RS-485, EthernetTCP/IP	24 VDC, 1400 mA	296×222	XBT L 1003
GT1155 (Mitsubishi Electric)	Графическая сенсорная	—	—	4 Мбайт	5,7"	RS-232/ RS-485	24 VDC, 400 mA	164×135	GT Works 2
MAC E700 (Mitsubishi Electric)	Графическая клавишная	—	16-функцион. 6 touchkey	400 кбайт–8 Мбайт	Цветной 640×480	RS-232/ RS-485 (Profi-busDP)	24 VDC,	214×232	E Desig-ner
Dayapanel (GE Fanuc)	Текстовая клавишная	8×40	10	100 страниц	—	RS-232/ RS-485, (Profi-bus, Genius)	24 VDC,	208×188	Cimplici-ty
QuickPanel (GE Fanuc)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 100 МГц, 4 Мбайт	12,1" цветной	EthernetTCP/IP	24 VDC	317×243	Cimplici-ty
H-K30m-S (Beijer Electronics)	Текстовая клавишная	2×20 или 4×40	16 (10-программируемые)	RISC, 4 Мбайт	3"	RS-232/ RS-422/ RS-485	24 VDC	173×105	Information Designer
Cimrex 90D (Beijer Electronics)	Графическая, текстовая	—	22-функциональные	RISC, 1,6 Мбайт	10,4" цветной	RS-232, RS-422	24 VDC	367×274	Information Designer
Exter T150 (Beijer Electronics)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 416 МГц, 64 Мбайт	15" цветной	RS-232, RS-485 /422, Ethernet	24 VDC	356×279	Information Designer
HMI 1206 (BrainChild)	Графическая сенсорная	—	—	SHARP-ARM9 200 МГц, 32 Мбайт	12,1" цветной	RS-232/RS-485, Ethernet	24 VDC	312×246	HMI Studio
PWS 3260-TFT (Hittech)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 206 МГц, 4 Мбайт	10,4" цветной	RS-232, RS-422, RS-485	24 VDC, 800 mA	286×211	ADP
TP04G (Delta Electronics)	Текстовая клавишная	4×16, 8×16, 8×25	10-функциональные	16-разр. ППЦ, 256 кбайт	3"	RS-232, RS-485	24 VDC, 250 mA	147×97	TPEdit
DOP-A75CSTD (Delta Electronics)	Графическая сенсорная	—	4-пользовательские	RISC, 202 МГц, RealTime OS, 32 Мбайт	7,5" цветной	RS-232, USB, RS-232/RS-485	24 VDC, 400 mA	243×178	SCredit
EZ-420 (DirectLogic)	Текстовая клавишная	4×20	5	—	—	RS-485 (Modbus RTU)	24 VDC	—	EZ-Textedit

Модель	Тип панели	Число строк символов	Число клавиш	ППЦ, ОС, объем памяти	Размер экрана	Интерфейс	Питание	Габариты	Пакет ПО
EZ-S8C-F (Direct Logic)	Графическая сенсорная	—	192 Touch Screen	Motorola, 40 МГц, 512 кбайт–1 Мбайт	8,2" цветной	RS-232, RS-232/RS-422/RS-485	24 VDC, 700 mA	216×268	EZ-Touchedit
Blue 300 (Maple Systems)	Графическая клавишная	—	5-функц-ые 5-пользовательские;	256 кбайт	3"	RS-232, RS-485 (Modbus)	24 VDC, 140 mA	147×97	EZware-5000
Gold Series, мод. 215A (Maple Systems)	Графическая сенсорная	—	—	Intel Celeron 2,0 ГГц, Wind. XP, 256 кбайт, /40 Гайт	15"	4xCOM 2xUSB 2.0, Ethernet 10/100/1000	100-240 VAC	300×400×100	WebStudio, v.6.1
V04 (ЗАО Текон, Россия)	Текстовая клавишная	4×16, 8×21	29	16-разр. ППЦ, 14,7 МГц, 128 кбайт	3"	RS-232, RS-485 (T4000, CAN)	24 VDC, 200 mA	180×105	Настройка с клавиатуры или по протоколу T4000
Мобильные панели оператора									
Simatic Mobile Panel 170 (Siemens)	Графическая клавишная + сенсорная	—	14-программируемые	RISC, 66 МГц, Wind. CE, 768 кбайт	5,7"	RS-232, RS-422/RS-485, (MPI/ ProfibusDP)	24 VDC, 300 mA (через соединит. коробку)	Диам. 245×58	Simatic ProTool/Lite, Simatic ProTool/ Pro v6.0
GP2301 HL (Digital/Pro-face)	Графическая клавишная + сенсорная	—	12-программир., 16-сенсорные	1 Мбайт	5,7"	RS-232/ RS-422, Modbus+, Profibus	24 VDC, 500 mA	253×185×75	GP-PRO/ PBIII
MT812IT (Weitek)	Графическая сенсорная	—	—	RISC 200 МГц, 64 Мбайт, флэш 32 Мбайт	12,1"	RS-232, 2×RS-232/RS-485, Ethernet 10/100 BaseT, 3×USB 2.0	24 VDC	204×150×50	Easy Builder

Управление цифровых образовательных технологий

XBT F03 (Schneider Electric)	Графическая сенсорная	—	—	Pentium, Magelis, 32 Мбайт	10,4" цветной	RS-232/ RS-485, EthernetTCP/IP	24 VDC, 1400 mA	296×222	XBT L 1003
GT1155 (Mitsubishi Electric)	Графическая сенсорная	—	—	4 Мбайт	5,7"	RS-232/ RS-485	24 VDC, 400 mA	164×135	GT Works 2
MAC E700 (Mitsubishi Electric)	Графическая клавишная	—	16-функцион. 6 touchkey	400 кбайт–8 Мбайт	Цветной 640×480	RS-232/ RS-485 (Profi-busDP)	24 VDC,	214×232	E Desig-ner
Dayapanel (GE Fanuc)	Текстовая клавишная	8×40	10	100 страниц	—	RS-232/ RS-485, (Profi-bus, Genius)	24 VDC,	208×188	Cimplici-ty
QuickPanel (GE Fanuc)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 100 МГц, 4 Мбайт	12,1" цветной	EthernetTCP/IP	24 VDC	317×243	Cimplici-ty
H-K30m-S (Beijer Electronics)	Текстовая клавишная	2×20 или 4×40	16 (10-программируемые)	RISC, 4 Мбайт	3"	RS-232/ RS-422/ RS-485	24 VDC	173×105	Information Designer
Cimrex 90D (Beijer Electronics)	Графическая, текстовая	—	22-функциональные	RISC, 1,6 Мбайт	10,4" цветной	RS-232, RS-422	24 VDC	367×274	Information Designer
Exter T150 (Beijer Electronics)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 416 МГц, 64 Мбайт	15" цветной	RS-232, RS-485 /422, Ethernet	24 VDC	356×279	Information Designer
HMI 1206 (BrainChild)	Графическая сенсорная	—	—	SHARP-ARM9 200 МГц, 32 Мбайт	12,1" цветной	RS-232/RS-485, Ethernet	24 VDC	312×246	HMI Studio
PWS 3260-TFT (Hiitech)	Графическая сенсорная	—	—	RISC, 206 МГц, 4 Мбайт	10,4" цветной	RS-232, RS-422, RS-485	24 VDC, 800 mA	286×211	ADP
TP04G (Delta Electronics)	Текстовая клавишная	4×16, 8×16, 8×25	10-функциональные	16-разр. ППЦ, 256 кбайт	3"	RS-232, RS-485	24 VDC, 250 mA	147×97	TPEdit
DOP-A75CSTD (Delta Electronics)	Графическая сенсорная	—	4-пользовательские	RISC, 202 МГц, RealTime OS, 32 Мбайт	7,5" цветной	RS-232, USB, RS-232/RS-485	24 VDC, 400 mA	243×178	SCredit
EZ-420 (DirectLogic)	Текстовая клавишная	4×20	5	—	—	RS-485 (Modbus RTU)	24 VDC	—	EZ-Textedit

Модель	Тип панели	Число строк символов	Число клавиш	ППЦ, ОС, объем памяти	Размер экрана	Интерфейс	Питание	Габариты	Пакет ПО
EZ-S8C-F (Direct Logic)	Графическая сенсорная	—	192 Touch Screen	Motorola, 40 МГц, 512 кбайт–1 Мбайт	8,2" цветной	RS-232, RS-232/RS-422/RS-485	24 VDC, 700 mA	216×268	EZ-Touchedit
Blue 300 (Maple Systems)	Графическая клавишная	—	5-функц-ые 5-пользовательские	256 кбайт	3"	RS-232, RS-485 (Modbus)	24 VDC, 140 mA	147×97	EZware-5000
Gold Series, мод. 215A (Maple Systems)	Графическая сенсорная	—	—	Intel Celeron 2,0 ГГц, Wind. XP, 256 кбайт, /40 Гбайт	15"	4xCOM 2xUSB 2.0, Ethernet 10/100/1000	100-240 VAC	300×400××100	WebStudio, v.6.1
V04 (ЗАО Текон, Россия)	Текстовая клавишная	4×16, 8×21	29	16-разр. ППЦ, 14,7 МГц, 128 кбайт	3"	RS-232, RS-485 (T4000, CAN)	24 VDC, 200 mA	180×105	Настройка с клавиатуры или по протоколу T4000
Мобильные панели оператора									
Simatic Mobile Panel 170 (Siemens)	Графическая клавишная + сенсорная	—	14-программируемые	RISC, 66 МГц, Wind. CE, 768 кбайт	5,7"	RS-232, RS-422/RS-485, (MPI/ ProfibusDP)	24 VDC, 300 mA (через соединит. коробку)	Дiam. 245×58	Simatic ProTool/Lite, Simatic ProTool/ Pro v6.0
GP2301 HL (Digital/Pro-face)	Графическая клавишная + сенсорная	—	12-программир., 16-сенсорные	1 Мбайт	5,7"	RS-232/ RS-422, Modbus+, Profibus	24 VDC, 500 mA	253×185××75	GP-PRO/ PBIII
MT812IT (Weitek)	Графическая сенсорная	—	—	RISC 200 МГц, 64 Мбайт, флэш 32 Мбайт	12,1"	RS-232, 2×RS-232/RS-485, Ethernet 10/100 BaseT, 3×USB 2.0	24 VDC	204×150××50	Easy Builder

Таблица 3.11. Технические характеристики блоков питания ICP Electronics

Модель	Тип	Мощность, Вт	Входное напряжение, В	Ток нагрузки, А	Рабочая температура, °С	Габариты, мм
ACE-C232	AT (дублирован)	2×230	110/220 VAC	При +5 В: 20 При +12 В: 10 При -5 В: 0,5 При -12 В: 0,5	0...+50	150×140×86
ACE-828A	ATX	280	90...130 VAC; 180...260 VAC	При +5 В: 25 При +12 В: 10 При -5 В: 0,5 При -12 В: 0,5	-20...+70	150×140×86
ACE-925C	AT	250	24 VDC (19...30 VDC)	При +5 В: 25 При +12 В: 6 При -5 В: 1,0 При -12 В: 2,0	-20...+70	150×140×86

Таблица 3.12. Характеристики источников бесперебойного питания

Модель, фирма	Мощность, кВА	Время автономной работы, мин. (нагрузка, ВА)	Входное-выходное напряжение, В	Интерфейс	Габариты (Ш×В×Г), мм	Тип ИБП
1	2	3	4	5	6	7
Powerware 5115	0,5 0,7 1,0 1,4	5 (500) 13 (500) 15 (500) 28 (500)	220/230/240	—	150×185×268 (для 0,5 кВА)	Line-Interactive *
Powerware 9305	7,5 10,0 15,0	44 30 18	3×380	2×RS-232	400×710×750	On-line
Powerware 9315 Powerware (Великобритания)	200 400	8...35 7...21	3×380	RS-232, RS-485	1654×1867×800 1880×1867×800	On-line
Dialog Active Rack DAR 300 Dialog Power Centre II 12DPC 200 Riello UPS Manufacturing (Италия)	3 200	12 10...30	230 380/400/415	RS-232, USB RS-232/ RS-422 «СК»	482,6×133×490 (19" исп.) 1500×1800×900	Модульный On-line
HF Top Line Meta System (Италия)	4	7...22	230	RS-232, «СК»	560×480×270	On-line
Primewave	10	10	220/230/240	RS-232, «СК»	430×1200×800	On-line
Conceptpower Ne Wave (Швейцария)	20	10	230/3×380	RS-232, «СК»	483×400×675	On-line

1	2	3	4	5	6	7
MASTERYS-BC312 Socomec Sicon UPS (Франция–Италия)	12	12	230/3х400	RS-232	444×700×795	On-line
UPStation GXT Liebert (США)	6 10	7 (100%) 10 (100%)	230	RS-232	558×260×800 640×340×965	On-line
7857.403 RITTAL (Германия)	2	10 (100%), 22 (50%)	220/230/240 ±3%	RS-232	482,×89×410	On-line
DC UPS 24 В/7 А-ч (Siemens)	0,16	2	24 VDC	RS-232	168×156×112	On-line

* ИБП со стабилизатором напряжения на входе. Инвертор формирует выходное напряжение только при работе батарей. В нормальном режиме питание нагрузки осуществляется от сети.

Таблица 3.13. Разрешение TFT ЖК-мониторов

Размер по диагонали	Разрешение, пиксель	Размер по диагонали	Разрешение, пиксель
5,7" (моно)	320×240	12", 12,1"	800×600
6,0"	640×480	13,3"	1024×768
6,4"	640×480	14,1"	1024×768
10,0"	800×600	15"	1024×768
10,4"	800×600	17"	1280×1024

Таблица 3.14. Технические характеристики микропроцессорных регуляторов

Тип, изготовитель	Число каналов	Программ. задатчик	Авто—настройка	Входные сигналы	Выходные сигналы	Интерфейс	Число индикаторов	
							Текущие	Заданные
UP350	1	10 сегментов	Да	4...20 мА — 1, дискретные — 2	4...20 мА — 1, релейные — 2	—	4	4
UP550/750	2	99 сегментов	Да	4...20 мА — 1, дискретные — 7	4...20 мА — 1, релейные — 2	—	5	Дисплей
US1000 Yokogawa (Япония)	2	—	Да	4...20 мА — 1, универсал — 2; цифровые: 2...7	4...20 мА — 1, 0...10 В — 1, цифровые: 3...7	RS-485	5	5
MT-96 FOTEK (Тайвань)	1	—	Да	Термопары: J, K; TC: Pt100; 4...20 мА, 0...10 В	Термопары: R, J, K, T, E, B, N, L; TC: Pt100	RS-485	4	4
731C Foxboro, США	1	—	—	Термопары: S, R, J, K, T, E, B, NW, L; TC: Pt100; 4...20 мА, 10 В	4...20 мА — 1, релейные — 4	RS-422/RS-485	4	4
DTA 9696 Delta Electronics Inc. (Тайвань)	1	—	—	Термопары: S, R, J, K, T, E, B, N, L; TC: Pt100	4...20 мА — 1, релейные — 2, рп — 1	RS-485	4	4
TROVIS 6494, SAMSON (Германия)	2	—	Да	4...20 мА, 0...10 В, Pt100, Pt1000, Ni100, Ni1000 дискретные — 1	4...20 мА — 1, релейные — 2, рп — 1	—	4	4
IMAGO-500 JUMO (Германия)	8	50 программ	Да	0...50 мВ, 0...1 В, 0...10 В, 4...20 мА, дискретные — 2	4...20 мА — 1, релейные — 24	RS-422/RS-485, Profibus DP	5"– дисплей (100×134 мм)	
UDC 2000 Honeywell (США)	2	12 сегментов	Да	Термопары: S, R, J, K, T, E, B, NW; TC: Pt100; 4...20 мА, 1...5 В	4...20 мА, 1...5 В, релейные — 2	—	4	6
TKM 21 АО «Текон», Россия	2	—	Да	Термопара, TC: 0...5, 0/4...20 мА, дискретные — 4	0...5, 0/4...20 мА, релейные — 4	RS-485	4	4
Термодат-15М1	2...4	30 программ по 15 шагов каждая	—	Термопары: S, R, J, K, T, E, B, NW, L; TC: Pt100; 0...50 мВ	рп — 4, релейный — 1	RS-232/RS-485	4; ЖК-дисплей (2 строки)	
Термодат – 19Е2 «Системы контроля» (Россия)	4	4 программы по 20 участков каждая	Да	Термопары: S, R, J, K, T, E, B, NW, L; TC: Pt100; 0...50 мВ; 0...20 мА	4...20 мА, релейный, рп, симистор	RS-485	ЖК-дисплей (320×240 точек)	

Тип, изготовитель	Число каналов	Программ. задатчик	Авто—настройка	Входные сигналы	Выходные сигналы	Интерфейс	Число индикаторов	
							Текущие	Заданные
Метакон 613 «КонтрАвт» (Россия)	1	10 сегментов	Да	Термопары: S, J, K, B, N, L, A; 0...50 мВ, 0/4...20 мА, дискретные — 2	рпр — 8	RS-485	4	—
Минитерм 400 «МЗТА» (Россия)	1	10 сегментов	Да	Термопары: S, K, L; 0...50 мВ, 0...10 В, 0...5 мА, 0/4...20 мА, дискретные — 2	0...10 В, 0...5 мА, 0/4...20 мА, релейный — 1, рпр — 2	RS-232	4	4
TRM202	2	—	—	Термопары: J, K, B, N, LR, S, T, A; ТС: ТСП, TCM; 0...5, 0/4...20 мА; 0...1 В; -50...+50 мВ	Дискретный — 1; 4...20 мА	RS-485 (про- токол OBEH)	4	4
TRM138	8	—	—	Термопары: J, K, B, N, LR, S, T, A; ТС: ТСП, TCM; 0...5, 0/4...20 мА; 0...1 В; 0...50 мВ	Дискретные — 8 или 4...20 мА — 8	RS-485 (про- токол OBEH)	—	—
TRM101	2	—	Да	Термопары: J, K, B, N, LR, S, T, A; ТС: ТСП, TCM; 0...5, 0/4...20 мА; 0...1 В; -50...+50 мВ	Дискретный — 1; 4...20 мА или 0...10 В	RS-485 (про- токол OBEH)	4	4
TRM151 «ОБЕН» (Россия)	2	12 программ по 10 шагов каждая	Да	Термопары: L, K, J, N, R, S, B, A-1,2,3; ТС: TCM, ТСП 0/4...20 мА; СК	СК, рпр, 4...20 мА, 0...10 VDC, симисторные оптопары	RS-485 (про- токол OBEH)	4	4
МИК-22	2	—	—	Термопары: K, L ТС: ТСП, TCM; 0...5, 0/4...20 мА; 0...10 В, Дискретные — 2	0...5, 0/4...20 мА; 0...10 В. Дискретные — 4	RS-485	4	4
МТР-44 «МИКРОЛ» (Россия)	8	4 программы по 15 шагов каждая	—	ТС: ТСП, TCM; 0...5, 0/4...20 мА; 0...10 В. Дискретные — 2	Дискретные — 8	RS-485	4	—
ТП-402 ВАРТА (Россия)	1	—	—	Термопары: R, K, B, L, A	Симисторный — 1; тиристорный — 1	—	4	—

* Минитерм 400: напряжение питания 24 VDC.

Таблица 3.15. Барьеры искрозащиты с гальванической развязкой Elcon Instruments

Тип модуля	Число каналов	Входной сигнал в безопасной зоне	Выходной сигнал в опасной зоне	Питание	Общие характеристики
μD411	1	«СК»	Релейный выход	24 VDC, 25 мА	Рабочая температура 0...60 °С; изоляция 2500 В (для серии 400)
μD412	2	«СК»	Релейный выход	24 VDC, 25 мА	
μD431/432	½	«СК»	Релейный выход, 2А	24 VDC, 15 мА	
μD441/442	1/2	«СК»	2 оптотранзистора	24 VDC, 20 мА	Подключение «под винт»; габариты: 16,4×112×92 мм
μD471/472	1/2	20...30 VDC	2 оптотранзистора (40 мА при 24 VDC, 10 мА при 12 VDC), нагрузка 300 Ом	20...30 VDC	

Таблица 3.16. Функциональные модули искробезопасной системы IS-RPI

Тип модуля	Функция	Число каналов	Общие характеристики
RSD-BI-Ex16	Двоичный вход	16	HART-совместимость; искробезопасное питание в о взрывобезопасном корпусе; «горячая» замена модулей
RSD-BO-Ex4	Двоичный вход	4	
RSD-CI-Ex8	Аналоговый вход	8	
RSD-CI-Ex8.H	Аналоговый вход с протоколом HART	8	
RSD-CO-Ex8	Аналоговый вход	8	
RSD-CO-Ex8.H	Аналоговый выход с протоколом HART	8	Возможность передачи сигналов из взрывоопасной зоны оптоволоконными линиями связи
RSD-TI-Ex8	Аналоговый температурный преоб- разователь (термопары и термометры сопротивления)	8	
RSD-CT1-Ex2	Счетчик	2	

Лекция

по теме 4.4.1. Технические средства автоматизации конструирования, моделирования и проектирования

ВОПРОСЫ

1. Компьютер как основное средство автоматизации конструирования, моделирования и проектирования.
2. Устройства вывода информации из компьютера информации, используемые в САПР.
3. Устройства ввода информации в компьютер, используемые в САПР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стехин А.П. Основы конструирования, моделирования и проектирования систем управления производственными процессами. Учебное пособие: – Донецк, 2008.

1. Компьютер как основное средство автоматизации конструирования, моделирования и проектирования

Системы автоматизированного проектирования (САПР) позволяют осуществлять черчение, конструирование и моделирование различных устройств и механизмов с помощью компьютера.

Поэтому основным техническим средством при автоматизации конструирования является современный персональный компьютер с установленным специализированным программным обеспечением - пакетом прикладных программ САПР.

Обычно персональные компьютеры IBM PC состоят из трех частей: системного блока;

клавиатуры, позволяющей вводить символы в компьютер;

монитора (или дисплея) - для изображения текстовой и графической информации.

Компьютеры выпускаются и в портативном варианте - в "блокнотном" (ноутбук) или "наколенном" (лап топ). Здесь системный блок, монитор и клавиатура заключены в один корпус: системный блок спрятан под клавиатурой, а монитор сделан как крышка к клавиатуре.

Промышленные компьютеры.

В отличие от офисных персональных компьютеров промышленные персональные компьютеры разработаны для работы в жестких условиях эксплуатации:

наличие пыли, экстремальных механических и климатических воздействий, а также интенсивного электромагнитного излучения.

Наиболее известные производители промышленных компьютеров - фирмы IBM, Texas Micro, Siemens, Octagon Systems, Advantech и др.

Промышленные компьютеры обычно снабжены высокоскоростными охлаждающими вентиляторами и воздушными фильтрами, которые обеспечивают принудительную приточно-вытяжную вентиляцию внутри шасси. Постоянный приток воздуха создает избыточное давление внутри корпуса. Подобная система вентиляции предотвращает попадание в корпус пыли и обеспечивает его охлаждение. Эти меры обеспечивают надежную работу компьютера в широком диапазоне окружающих температур. Промышленные компьютеры Advantech работают в диапазоне температур 0 - 50 °C, а Octagon Systems - в диапазоне от -40 до +85 °C.

Большинство промышленных компьютеров поставляются с фиксирующими приспособлениями для плат и ударозащищенными отсеками для дисковых накопителей. Прижимные планки надежно фиксируют платы расширения в слотах шины ISA/PCI. Виброударостойкие отсеки для НЖМД и НГМД повышают их срок службы в тяжелых промышленных условиях. Часто вместо обычного НЖМД используются диски на базе флэш-памяти.

Электромагнитное излучение (ЭМИ) является общей проблемой для промышленности. Почти все промышленные компьютеры изготовлены из высококачественной стали со специальным покрытием для защиты от ЭМИ. Источники питания также невосприимчивы к выбросам напряжения в сети, перенапряжениям и колебаниям напряжения, обеспечивая стабильность выходного напряжения. Для улучшения надежности применяются дублированные источники питания с "горячей" заменой.

Сочетание пассивных объединительных плат и промышленных процессорных плат обеспечивает совершенную конфигурацию для промышленной автоматизации, основанной на IBM PC совместимых компьютерах. Эта архитектура обеспечивает гибкость и упрощает модернизацию и эксплуатацию изделия.

Пассивные объединительные платы обеспечивают возможность установки плат ISA и PCI в различных сочетаниях. Например, фирма Advantech предоставляет широкий ряд пассивных объединительных плат с числом гнезд расширения от 3 до 20. Эти платы характеризуются поддержкой одной или нескольких систем в пределах одного конструктива.

Все фирмы, выпускающие промышленные компьютеры, предлагают широкий набор плат расширения и периферийных устройств.

Промышленные процессорные платы, как правило, имеют сторожевой таймер, который непрерывно следит за работой системы. В случае непредвиденной остановки функционирования системы сторожевой таймер генерирует аппаратный сигнал сброса. Промышленные процессорные платы являются 100% совместимыми с системными платами общего назначения. Их цельная конструкция включает множество расположенных на плате дополнительных устройств и контроллеров, таких как твердотельные диски, интерфейсы VGA/ЖКИ, SCSI, Ethernet, дополнительные последовательные порты (до 6-ти) и т.д.

Отказоустойчивым промышленным компьютером является компьютер, снабженный системой обнаружения неисправности шасси и выдачи сигнала тревоги. Контролируется исправность источника питания, вентиляторов и температура внутри блока. При возникновении неисправности блок предупреждает пользователя о необходимости текущего ремонта путем подачи звукового или светового сигнала. Как правило, вычислительная система будет по-прежнему работать некоторое время, несмотря на отказ.

Как правило, промышленные компьютеры очень надежны. Например, процессорные платы фирмы Octagon Systems имеют среднее время наработки на отказ от 10 до 26 лет, а периферийные платы - свыше 100 лет.

Периферийные платы отличаются большим разнообразием. Например, фирма Advantech предлагает платы ввода-вывода цифровых и аналоговых сигналов для шин ISA и PCI с количеством дискретных входов-выходов - до 192, аналоговых (ЦАП, АЦП) - до 32, в том числе с гальванической развязкой от источников (приемников) сигналов, платы расширения интерфейсов RS-232/422/485/токовая петля с количеством каналов до 8-ми, платы счетчиков-таймеров, квадратурных преобразователей, 3-х и 4-х координатного управления шаговыми двигателями и т.д.

Это позволяет вводить в компьютер информацию от датчиков любого типа и управлять различными исполнительными механизмами.

В системном блоке располагаются все основные узлы компьютера:

- электронные схемы, управляющие работой компьютера (микропроцессор, оперативная память, контроллеры устройств и т.д.);

Управление цифровых образовательных технологий

- блок питания, который преобразует электропитание сети в постоянный ток низкого напряжения, подаваемый на электронные схемы компьютера; накопители (дисководы) для гибких магнитных дисков (НГМД) (дискет); накопитель на жестком магнитном диске (НЖМД) - "винчестер"; другие устройства.

К системному блоку IBM PC можно подключать различные устройства ввода-вывода информации, расширяя тем самым его функциональные возможности.

Многие устройства располагаются вне системного блока и подсоединяются к нему через разъемы, обычно находящиеся на задней стенке блока. Такие устройства обычно называются внешними. Кроме монитора и клавиатуры это:

принтер - для вывода на печать текстовой и графической информации;

мышь или трекбол - устройство, облегчающее ввод информации в компьютер;

джойстик - манипулятор в виде укрепленной на шарнире ручки с кнопкой;

другие устройства.

Некоторые устройства могут встраиваться внутрь системного блока и поэтому называются внутренними, например:

модем или факс-модем - для обмена информацией с другими компьютерами через телефонную сеть (факс-модем может также получать и передавать факсы);

дисковод для компакт-дисков;

звуковая карта - для записи и воспроизведения звуков (музыка, голос и т.д.).

Для управления работой устройств в IBM PC-совместимых компьютерах используются специальные электронные схемы - контроллеры. Различные устройства используют разные способы подключения к контроллерам.

Самым главным элементом в компьютере является микропроцессор - интегральная микросхема, выполняющая все вычисления и обработку информации.

В IBM PC используются микропроцессоры фирмы Intel, а также совместимые с ними микропроцессоры других фирм (AMD, Cyrix, IBM и др.). Одинаковые модели могут иметь разную тактовую частоту - чем выше тактовая частота, тем выше производительность и цена микропроцессора. Например, процессоры семейства Pentium производства Intel выпускаются с тактовой частотой свыше 4 ГГц.

На рынке доминирующее положение занимают два производителя - Intel и AMD, компьютеры в большинстве случаев комплектуются процессорами Duron, Sempron, Athlon фирмы AMD или Celeron, Pentium-IV фирмы Intel.

Электронная начинка IBM PC, как правило, выполняется из нескольких модулей - электронных плат. Каждая плата представляет собой кусок пластика (стеклотекстолит), на котором укреплены электронные компоненты (микросхемы, конденсаторы и т.д.) и различные разъемы.

Самой большой электронной платой является системная, или материнская, плата. На ней обычно располагаются основной микропроцессор, оперативная память, кэш-память, шины, BIOS и интегрированные контроллеры.

Неинтегрированные контроллеры выполняются в виде отдельных электронных плат и вставляются в специальные разъемы (слоты) на материнской плате. При вставке в слот контроллер подсоединяется к шине магистрали передачи данных между контроллерами и оперативной памятью. В современных компьютерах обычно имеется две шины: ISA - для контроллеров низкоскоростных устройств, и PCI - для контроллеров высокоскоростных устройств. В последнее время в материнских платах появился специальный слот AGP - для видеоадаптера.

Наряду с самим компьютером важную роль при автоматизации конструирования играют различные устройства ввода-вывода графической и текстовой информации.

2. Устройства вывода информации из компьютера, используемые в САПР

Принтеры.

Матричные принтеры обеспечивают значительно худшее качество печати, чем другие типы, сильно шумят при работе, но широко применяются, так как недороги и стоимость отпечатанной страницы у них самая низкая. Принцип действия: печатающая головка содержит вертикальный ряд тонких металлических стержней (иголок), головка движется вдоль печатаемой строки, а стержни в нужный момент ударяют по бумаге через красящую ленту.

Струйные принтеры - изображение формируется микрокаплями специальных чернил, выбрасываемых на бумагу через сопла в печатающей головке. В отличие от матричных принтеров, струйные работают с гораздо меньшим шумом, обеспечивают лучшее качество печати и самую дешевую цветную печать приемлемого качества.

Лазерные принтеры обеспечивают наилучшее качество печати. Используется принцип ксерографии: изображение переносится на бумагу со специального барабана, к которому электрически притягиваются частички краски (тонера). Отличие от обычного ксерокса состоит в том, что печатающий барабан электризуется с помощью лазера по командам компьютера. Обеспечивают самую высокую среди

всех принтеров скорость печати, работают практически бесшумно и не требуют специальной бумаги.

Плоттеры - устройства для вывода чертежей, графиков, диаграмм и т.д. с использованием пишущего узла типа "перо". Отличаются по формату используемой бумаги и количеству перьев. Различают планшетные плоттеры (бумага неподвижна, перо перемещается по двум осям) и плоттеры, использующие перемещение бумаги по одной оси и перемещение пера - по другой. Современные плоттеры снабжены восемью перьями различных типов и могут быть использованы для черчения как на бумаге, так и на кальке или пленке. Стандартом в области плоттеров является фирма "Hewlett Packard" и графический язык HPGL - стандарт для промышленности.

3. Устройства ввода информации в компьютер, используемые в САПР

Дигитайзеры. С их помощью осуществляется ввод координат в компьютер. Практически являются той же мышью, но с визирной сеткой для точного передвижения манипулятора по желаемой траектории. Используются для оцифровки кривых, например при вводе изображения карт.

Кодирующие (графические) планшеты ("Art Pad" Электронное "перо" художника (конструктора): вводит в компьютер движения карандаша по планшету, в том числе учитывается, с какой силой осуществляется нажим на перо. "Карандаш" не имеет механической связи с поверхностью планшета.

Сканеры. Устройства для ввода графических изображений в компьютер. Могут быть ручными, планшетными или предназначаться для ввода изображений со слайдов. Различаются по максимально разрешимому количеству линий, по числу передаваемых уровней цвета, по возможности ввода цветных иллюстраций.

Цифровые фотокамеры. Выполняют ту же функцию, что и сканеры, но в "безбумажном" варианте. Отснятое изображение сохраняется в памяти устройства, а затем через последовательный порт (обычно USB) вводится в компьютер.

Лекция

по теме 4.4.2. Программные средства автоматизации конструирования, моделирования и проектирования

ВОПРОСЫ

1. Пакеты прикладных программ САПР.
2. Инструментальная среда разработки приложений сбора данных и управления Genie.
3. Назначение, возможности и структура инструментальной среды "Delphi".
4. SCADA-системы. Краткая характеристика SCADA-систем RTWin, TRAGE MODE, GENESIS32.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стехин А.П. Основы конструирования, моделирования и проектирования систем управления производственными процессами. Учебное пособие: – Донецк, 2008.

1. Пакеты прикладных программ САПР

САПР - признанная область применения вычислительной техники. Компьютер может предоставить конструкторам и технологам полный набор возможностей САПР и, освободив их от рутинной работы, дать возможность заниматься творчеством, что резко повышает производительность труда.

Приближение САПР к конструктору позволило резко повысить производительность самих САПР, распространение которых сдерживалось трудностью алгоритмизации конструкторских задач. Действительно, невозможно к каждому конструктору "приставить" программиста. Это противоречие может быть устранено только широким распространением прикладных программных средств, "общающихся" с конструктором на "естественном" языке. Следует отметить, что это справедливо не только для компьютерной графики. Практически все современное программное обеспечение ориентируется на пользователя, дружелюбно общаясь с ним понятным ему способом и предоставляя ему полную свободу действий. Такое "общение" человека с компьютером возможно только в интерактивном (диалоговом) режиме, когда пользователь тут же на экране видит результат своих действий. САПР также ориентированы на работу в интерактивном режиме, предоставляя про-

ектировщику оперативный доступ к графической информации, простой и эффективный язык управления ее обработкой с практически неограниченными возможностями контроля результатов. В первую очередь это относится к графическому диалогу, поскольку именно графика (чертежи, схемы, диаграммы и т.п.) как наиболее эффективный способ представления информации, занимает привилегированное положение в САПР. Таким образом удается автоматизировать самую трудоемкую часть работы - по оценкам специалистов конструкторских бюро, в процессе традиционного проектирования на разработку и оформление чертежей приходится около 70% от общих трудозатрат конструкторской работы (15% - на организацию и ведение архивов, и 15% - собственно на проектирование, включающее в себя разработку конструкции, расчеты, согласование со смежными областями и т.д.).

Многие современные программные системы, ориентированные на проектирование промышленных изделий, имеют достаточно большой арсенал возможностей интерактивной графики, обеспечивая возможность создания и редактирования двумерных изображений, состоящих из проекций изделия, штриховки, размеров и т.д., а также формирования реалистичных трехмерных изображений проектируемых изделий, построенных из исходных данных чертежа с удалением невидимых линий, с учетом различных способов освещения, задания параметров структуры поверхностей и т.п. При этом САПР предоставляют принципиально недостижимые ранее возможности. Фактически конструктор попадает в новую среду - среду компьютерной графики. И качество пакета САПР едва ли не в первую очередь определяется тем, насколько труден для конструктора переход к новой технологии при использовании того или иного пакета.

В настоящее время существует огромное количество САПР различной сложности и назначения. Очевидно, что пользователь будет выбирать систему, согласовывая необходимость графических возможностей со стоимостью системы и технических средств, которые обладают требуемыми возможностями. Например, стоимость АРМ ("workstation") Apollo или SAN, обладающих всеми мыслимыми на сегодняшний день возможностями, существенно выше стоимости любого обычного ПК - это просто другой класс машин. Для большинства чертежно-конструкторских работ требуются более скромные, однако все же достаточно широкие возможности, и ряд систем способен их удовлетворить.

Среди систем малого и среднего класса в мире наиболее популярна система AutoCad фирмы AutoDesk, а также системы Pcad, OrCAD (разработка и моделиро-

вание электронных устройств, в основном - печатных плат), ArchiCAD (архитектура), «Базис», «Компас», «SolidWorks» (механика), каждая из которых имеет свои преимущества и недостатки и предпочтительную область применения.

Фирма AutoDesk является одним из признанных лидеров в области разработки САПР, а созданный ею пакет AutoCad - одним из лучших. Это сложная и разветвленная по своей структуре система, которая в то же время легко управляется при помощи простых и ясных команд. Эта система дает пользователю ПК возможности, ранее доступные только на больших и дорогих вычислительных системах. AutoCad обладает эффективной системой ведения диалога с пользователем при помощи нескольких меню. Использование слоев также предоставляет дополнительные удобства для проектировщика, позволяя при наложении слоев с нарисованными на них изображениями отдельных деталей контролировать их совместимость при общей компоновке, а также держать "про запас" любое число различных вариантов деталей и, включая либо выключая слои, выборочно вводить их в общую компоновку. Законченные чертежи можно хранить в виде комплекта слайдов с возможностью их автоматического просмотра, причем доступность большого количества цветов делает работу с такой системой эстетически приятной.

AutoCad - универсальный графический пакет, предназначенный для любого специалиста, работающего с технической графикой. Фирма AutoDesk, ориентируясь на самый широкий круг пользователей, заложила в пакет богатые возможности адаптации к любым предметным областям. Именно поэтому AutoCad завоевал широкую популярность и продолжает сохранять свои позиции на мировом рынке.

Кроме автоматизации собственно чертежно-графических работ, AutoCad с его расширениями (AutoShade, AutoFlix, 3D-STUDIO и др.) предоставляет следующие возможности:

- графическое моделирование, т.е. использование компьютера в САПР в качестве мощного вычислительного средства, позволяющего без особых навыков программирования работать со сложными пространственными моделями; создание и ведение информационной базы данных (архива) чертежей; создание библиотеки стандартных элементов чертежей, относящихся к какой-то предметной области, с тем чтобы строить новые чертежи из уже созданных ранее элементов;
- параметризация чертежей - построение деталей и чертежей с новыми размерами на основе один раз нарисованного чертежа (модели);
- создание демонстрационных иллюстраций и мультфильмов.

Фирма AutoDesk на протяжении нескольких лет совершенствует свою систему - в настоящее время существует несколько версий, отличающихся своими функциональными возможностями. Все они совместимы "снизу вверх", т.е. чертежи, созданные на ранних версиях, обрабатываются на более поздних. Наиболее широко сейчас используются версии с 10-й по 14-ю. Последняя версия AutoCAD 2000.

КОМПАС 5 представляет собой современный программный продукт, функционирующий под управлением операционной системы Windows 95/98/NT.

Система имеет настраиваемый оконный интерфейс, соответствующий стандартам Windows, и управляется с помощью команд текстового меню, панелей кнопок, контекстно-зависимых (динамических) меню. Оформление экрана, состав кнопочных панелей и любые параметры системы могут быть настроены непосредственно во время сеанса работы. Пользователь может формировать собственные кнопочные панели, в том числе подключая функции прикладных библиотек в качестве команд.

Поддерживается одновременная работа с несколькими документами, а также отображение каждого документа в нескольких окнах. Реализованы различные режимы резервного копирования загруженных документов.

Печать разработанных документов может выполняться на любых устройствах (принтерах или плоттерах), поддерживаемых Windows. Реалистичное изображение документов в режиме предварительного просмотра позволяет компоновать на поле вывода и распечатать одновременно несколько документов. Обеспечена гибкая настройка всех параметров печати. В состав системы входит утилита для разработки собственных драйверов перьевых устройств вывода (плоттеров).

КОМПАС 5 поддерживает технологию OLE, что позволяет вставить документы КОМПАС в любой документ, являющийся OLE-контейнером (например, в документ MS Word). Созданный таким образом OLE-объект в дальнейшем можно просматривать при помощи КОМПАС-Viewer или редактировать средствами КОМПАС. Если при вставке OLE-объекта сохранена связь с источником, то все вносимые в источник изменения будут отражаться в документе-контейнере.

Основными компонентами КОМПАС 5 являются КОМПАС-ГРАФИК - редактор конструкторской документации и КОМПАС-3D - система трехмерного твердотельного моделирования.

Графический редактор позволяет разрабатывать выпускать различные документы — эскизы, чертежи, схемы, плакаты и т.д. В системе предусмотрены два

вида графических документов — чертежи и фрагменты. Чертеж обладает рамкой и основной надписью, в нем можно создавать до 255 видов (проекций, разрезов, сечений), имеющих разный масштаб изображения. На листе чертежа могут быть размещены спецификация, технические требования, знак неуказанной шероховатости. Фрагмент содержит изображение в натуральную величину без элементов оформления (рамки, технических требований и т.п.).

Любой вид чертежа или фрагмент может содержать до 255 слоев, каждый из которых можно делать текущим или недоступным для редактирования или невидимым.

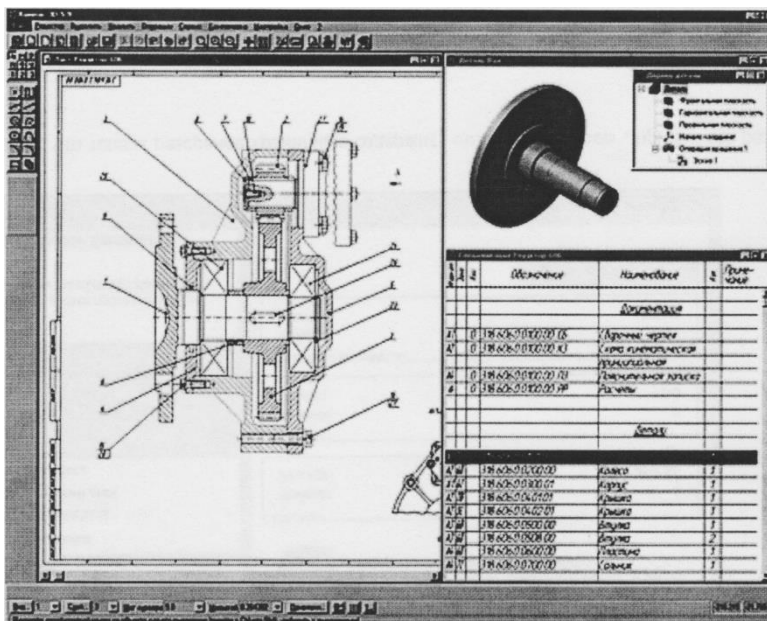


Рис.8.1. Экранная форма КОМПАС.

КОМПАС-ГРАФИК позволяет работать со всеми типами графических примитивов, необходимыми для выполнения любого построения. К ним относятся точки, прямые, отрезки, окружности, эллипсы, дуги окружностей и эллипсов, многоугольники, ломаные линии, кривые NURBS (в том числе кривые Безье). Разнообразные способы и режимы построения этих примитивов (например, команды создания фасок, скруглений, эквидистант, построения отрезков и окружностей, касательных к объектам и т.п.) избавляют пользователя от необходимости производить сложные вспомогательные построения. Для ускорения построений можно использовать локальные системы координат, разномасштабную сетку и механизм объектных привязок.

Одной из самых сильных сторон КОМПАС-ГРАФИК по-прежнему является полная поддержка ЕСКД. Поддерживаются стандартные (соответствующие ЕСКД) и пользовательские стили линий и штриховок. Реализованы все типы линейных,

угловых, радиальных и диаметральных размеров (включая наклонные размеры, размеры высоты и размеры дуги). Автоматически выполняются простановка допусков и подбор квалитета по заданным предельным отклонениям. Среди объектов оформления — все типы шероховатостей, линий-выносок, обозначения баз, допусков формы и расположения поверхностей, линии разреза и сечения, стрелки направления взгляда, штриховки, тексты, таблицы.

В графический документ КОМПАС-ГРАФИК может быть вставлено растровое изображение формата BMP, PCX, DCX, JPEG, TIFF. При вставке растрового объекта возможно задание его масштаба и угла поворота.

Текстовый редактор КОМПАС-ГРАФИК позволяет выпускать различные текстовые документы — расчетно-пояснительные записки, технические условия, инструкции и т.д. Текстовый документ является отдельным типом документа КОМПАС.

Модуль проектирования спецификаций КОМПАС-ГРАФИК позволяет выпускать разнообразные спецификации, ведомости и прочие табличные документы. Спецификация является отдельным типом документа КОМПАС-ГРАФИК.

Многие функциональные возможности модуля разработки спецификаций КОМПАС-ГРАФИК заимствованы из логики и технологии разработки "бумажных" спецификаций.

При заполнении документа на экране пользователь видит стандартную таблицу спецификации и может вводить данные в ее графы.

Приложения КОМПАС: средства разработки приложений КОМПАС-МАСТЕР, машиностроительная библиотека, интегрированные системы проектирования тел вращения КОМПАС-SHAFT Plus и цилиндрических пружин КОМПАС-SPRING, библиотеки элементов гидравлических и пневматических схем, станочных приспособлений, электрических и кинематических схем, архитектурно-строительная библиотека, инструментальные средства ведения типовых проектов, система проектирования металлоконструкций, пакеты библиотек «Элементы инженерных коммуникаций», «Элементы химических производств», «Электроснабжение», «Автоматизация технологических процессов», «Коммутационные устройства», библиотека трубопроводной арматуры, библиотека «Строительные конструкции. Профили», справочник конструкционных материалов, электронный справочник по подшипникам качения.

2. Инструментальная среда разработки приложений сбора данных и управления Genie

Управление цифровых образовательных технологий

Genie является инструментальной средой разработки приложений сбора, обработки и графического представления данных и управления, которая содержит множество встроенных функциональных блоков и графических элементов отображения, позволяющих существенно сократить затраты на разработку программного обеспечения для систем промышленной автоматизации. Разработка приложения заключается в выборе соответствующих функциональных блоков, установлении логических связей между ними, создании графического интерфейса оператора и настройке форм отчетов.

Разработана фирмой Advantech, специализирующейся на выпуске промышленных компьютеров и других средств автоматизации и сбора данных. Разработкой этой системы фирма "замкнула" цикл, то есть поставляет и технические средства, и программное обеспечение, необходимое для создания промышленных информационно-управляющих систем. В качестве примера рассматривается учебная версия - Genie для Windows v3.04.

Требования к аппаратно-программной платформе - весьма умеренные.

Функциональные возможности: центр обработки данных с открытой архитектурой; программирование на языке сценариев, совместимом с Visual Basic для приложений (VBA); использование мультизадачное™ при реализации алгоритмов сбора данных и управления; объектно-ориентированная графика; стандартный интерфейс пользователя, принятый в Windows; разработка приложений с использованием функциональных блоков; настраиваемый редактор отчетов; отображение, управление и обработка данных в реальном масштабе времени; построение графиков контролируемых параметров в реальном масштабе времени; управление доступом к системной информации и органам управления; обработка событий/тревог; связь с другими приложениями Windows посредством механизма DDE; интерфейс прикладного программирования посредством OLE Automation; библиотеки динамической компоновки, создаваемые пользователем; возможность организации сетевого взаимодействия; поддержка протоколов DeviceNet и CANOpen.

Основные области применения: системы сбора данных и диспетчерского управления; автоматизация производственных участков; создание АРМов технолога; автоматизация лабораторных измерений; измерительные комплексы; системы и комплексы автоматизации испытаний.

Пакет имеет встроенную среду разработки программных сценариев, совместимую с Microsoft VB и VBA, обеспечивающую разработчика системы мощным

набором инструментов, который называется редактором сценариев (Script Designer). Редактор сценариев содержит множество функций VBA, а также методов сбора и обработки данных, которые позволяют реализовывать прикладные алгоритмы практически любого уровня сложности. В VBA реализована и постоянно расширяется поддержка многих функций ОС Windows: механизмы динамического обмена данными (DDE) и связывания и внедрения объектов (OLE Automation); функции открытого взаимодействия баз данных (ODBC).

Открытость архитектуры Genie гарантирует пользователю возможность интеграции пакета с корпоративной системой, внедренной или внедряемой на предприятии.

Для уменьшения времени разработки программного обеспечения при сохранении его соответствия показателям назначения и обеспечении легкости последующего сопровождения и модернизации в Genie имеются специальные графические средства разработки и представления данных, которые называются редактор задач (Task Designer) и редактор форм отображения (Display Designer). В редакторе задач используется информационно-поточная модель программирования, которая значительно удобнее для восприятия и алгоритмической интерпретации, чем традиционная линейная архитектура текстовых языков программирования. При разработке приложения пользователем создается блок-схема стратегии без фиксации внимания на различных логических и синтаксических соглашениях, характерных для стандартного программирования. Объекты (пиктограммы функциональных блоков) выбираются из панели инструментов редактора задач и соединяются между собой для передачи данных от одного блока к другому. При необходимости создания графического интерфейса оператора редактор форм отображения обеспечивает возможность разработки удобных для восприятия экранных форм отображения в кратчайшие сроки посредством входящих в пакет стандартных элементов отображения. Кроме того, указанный графический интерфейс оператора может быть усовершенствован с помощью специальных инструментов рисования и элементов отображения, определяемых пользователем. Библиотеки встроенных функциональных блоков и элементов отображения включают в себя наиболее часто используемые в промышленной автоматизации функции сбора, обработки и графического представления данных. HI

Редактор задач пакета Genie позволяет редактировать множество задач одновременно. Каждая задача отображается в своем окне и имеет свои собственные

параметры: период сканирования, методы запуска/останова и др. Genie 3.04 поддерживает до 8 задач.

Редактор отчетов пакета Genie предоставляет конфигурируемую среду разработки, в которой пользователи могут определять требуемое содержание отчета, представляющего необходимые данные в определенные моменты времени с последующей автоматической печатью в заданное время. Интерфейсы, предоставляемые редактором отчетов, могут также использоваться для выбора и печати отчетов вручную.

Редактор отчетов обеспечивает выполнение пяти основных функций: сбор данных, конфигурирование формата отчета, составление расписания отчета, генерацию отчета событий и генерацию отчета тревог.

Подсистема регистрации событий пакета Genie позволяет осуществлять непрерывный контроль состояния технологического процесса и системы сбора данных, а также заблаговременно предупреждать возможные отклонения в ходе технологического процесса и функционирования аппаратно-программных средств системы. Гибкие возможности конфигурирования пороговых и предельных значений параметров позволяют реализовать множественные условия, по которым идентифицируются аварийные и предаварийные ситуации. Аварийные значения могут быть отображены, зарегистрированы, сохранены в архиве с добавлением метки времени, а также подтверждены оператором в реальном масштабе времени. Кроме того, протокол аварийных событий может быть отображен на экране монитора или выведен на печатающее устройство для получения твердой копии.

В настоящее время фирмой Advantech разработана более совершенная версия GenieDAQ 4.11.

3. Назначение, возможности и структура инструментальной среды

"Delphi"

Delphi представляет собой систему быстрой разработки приложений, пригодную для создания прототипов и законченных приложений Windows, которые можно сравнить (или они даже превосходят их по скорости и эффективности) с программами, написанными на C, C++, Borland Pascal 7.0 или Visual Basic, а также с программами, созданными другими средствами.

В основе Delphi лежит язык программирования Object Pascal фирмы Borland, но для создания простейших приложений совершенно необязательно быть про-

граммистом на Pascal. По мере разработки приложения Delphi визуальным способом автоматически создает соответствующие Pascal-операторы для будущей программы.

Приложение Delphi состоит из одной или нескольких форм, в которые разработчик помещает визуальные компоненты, и имеет возможность модифицировать свойства компонентов и самих форм, а также создавать Pascal-процедуры, обрабатывающие различные события, происходящие в системе.

При запуске созданного приложения Delphi компилирует и компоует исходный код и другие модули для создания исполняемого файла с расширением .exe. Это единственный файл, являющийся результатом разработки, который разработчику необходимо предоставить пользователю созданной программы.

В интегрированную среду разработки Delphi (можно назвать интерфейсом разработчика) входит несколько основных компонентов.

Панель инструментов, как, например, и в текстовом редакторе Word, содержит кнопки (пиктограммы), работающие по принципу "укажи и щелкни" и выполняющие некоторые команды меню.

Главное меню - стандартное меню в стиле Windows.

Форма - во многих приложениях - визуальное изображение главного окна разрабатываемой программы. Форма может представлять и другие окна, например диалоговое окно или дочернее окно в программах с многодокументальным интерфейсом. Простые программы имеют только одну форму, а более сложные приложения могут обладать множеством таких форм. Точечная сетка помогает выравнивать помещаемые на форму компоненты. В скомпилированном приложении сетка не появляется.

Палитра компонентов представляет собой каталог визуальных и прикладных объектов, которые могут быть включены в создаваемые формы (например, интерфейс пользователя) и приложения. Чтобы поместить необходимые компоненты в создаваемую форму, необходимо просто перенести их с палитры компонентов. Компонент, помещенный один раз, становится истинным объектом, готовым для выполнения любой намеченной инструкции.

Закладки страниц палитры. Поскольку различных компонентов в рассматриваемой системе разработки великое множество, все их пиктограммы отобразить на экране одновременно не представляется возможным. Поэтому они разделены на группы, или страницы. При активном состоянии одной из закладок, в области рас-

положения пиктограмм палитры компонентов появляются пиктограммы, соответствующие определенной странице или классу компонентов. В Delphi существует восемь категорий компонентов (и соответственно - восемь закладок): стандартная страница (Standard) содержит наиболее часто употребляемые компоненты, которые фигурируют во всех программах Windows. Эти компоненты обычно имеют однозначную связь со стандартными объектами Windows; дополнительная страница (Additional) содержит несколько более специфический набор компонентов, которые при работе с базовыми приложениями Windows могут и не встретиться;

доступ к данным (Data Access) содержит компоненты, позволяющие присоединить и запросить данные;

управление данными (Data Controls) - на этой странице расположена та часть интерфейса пользователя, которая связана с данными. Имеются компоненты, которые позволяют представлять данные любым способом, принятым в Windows; диалоги (Dialogs) - на этой странице можно найти описание диалоговых панелей для выполнения таких задач общего характера, как открытие файла, установка принтера, поиск текста и т.д.;

системная (System) - содержит визуальные и не визуальные компоненты для таймера, дисководов, компоненты доступа к файлам, а также компоненты OLE и DDE; страница стандарта VBX (Visual Basic eXtensions). VBX - это компоненты, которые следуют определенному фирмой Microsoft формату для использования в Visual Basic. Формат VBX стал стандартом и поддерживается многими средами разработки, включая Delphi. Все относящееся к VBX может быть импортировано в Delphi; образцы (Samples) - ассортимент компонентов, которые поставляются для демонстрации того, как компоненты VBX могут быть добавлены к палитре.

Окно Object Inspector отображает свойства (или события) одного или нескольких выбранных компонентов (или форм). Несмотря на кажущуюся простоту, это окно - одно из самых важных средств программирования Delphi.

Окно редактирования модуля содержит текст программы на языке Pascal, связанный с каждой формой в приложении. Delphi автоматически создает этот программный код, в который можно добавить операторы, выполняемые при выборе команды меню или щелчке по кнопке.

Закладки страниц Properties и Events (свойства и события). Предназначены для перехода от свойств формы к событиям или наоборот, и располагаются в нижней части окна Object Inspector. Свойство представляет атрибут компонента, например

размер кнопки или шрифт метки. Событие обозначает различные действия, такие как нажатие кнопки или щелчок мышью.

Первым этапом при создании пользовательских приложений в среде Delphi обычно является разработка пользовательского интерфейса (для информационно-управляющих систем - интерфейса оператора). С помощью визуальных компонентов Delphi можно создать самые разные панели инструментов, строки состояния, индикаторы и т.д.

При разработке самого приложения обычно возникает необходимость создания нестандартных графических форм. В Delphi с помощью определенных свойств (например, Canvas) имеется возможность нарисовать любую фигуру, какую только можно себе вообразить.

Delphi имеет средства для разработки многодокументных интерфейсов (MDI), приложений, связанных с передачей данных, а также средства, поддерживающие динамический обмен данными (DDE), связывание и внедрение объектов (OLE), и, кроме того, позволяет создавать программное обеспечение для практически всех типов баз данных.

В настоящее время существует несколько версий Delphi, отличающиеся в основном набором компонентов. Разработкой отдельных компонентов для Delphi занимаются многие разработчики ПО. В результате доступны (Internet или CD) тысячи готовых компонентов, которые могут быть использованы в конкретной разработке. Начиная со второй версии Delphi может работать только под Windows 95 и выше.

4. SCADA-системы. Краткая характеристика SCADA-систем RTWin, TRAGE MODE, GENESIS32.

В большинстве случаев АСУ ТП являются системами организационнотехническими, что означает наличие функций, выполняемых человеком (оператором, диспетчером).

Несколько десятков лет назад эти функции заключались в основном в наблюдении за контрольно-измерительными приборами и непосредственном ручном управлении технологическим процессом.

После того как компьютеризация достигла производственного сектора, на рабочих столах операторов стали появляться компьютеры, где взаимодействие между оператором и технологическим процессом осуществляется с помощью программного обеспечения, получившего общее название SCADA.

"SCADA-система" (Supervisory Control And Data Acquisition System) - система сбора данных и оперативного диспетчерского управления. В названии присутствуют две основные функции, возлагаемые на SCADA-систему: сбор данных о контролируемом технологическом процессе;

управление технологическим процессом, реализуемое ответственными лицами на основе собранных данных и правил (критериев), выполнение которых обеспечивает наибольшую эффективность и безопасность технологического процесса.

Если попытаться коротко охарактеризовать основные функции, то можно сказать, что SCADA-система собирает информацию о технологическом процессе, обеспечивает интерфейс с оператором, сохраняет историю процесса и осуществляет автоматическое управление процессом в том объеме, в котором это необходимо и возможно.

Необходимо различать программное обеспечение SCADA, функционирующее в составе АСУ ТП конкретного объекта, и набор инструментальных программных средств, предназначенный для разработки такого программного обеспечения.

SCADA-системы позволяют значительно ускорить процесс создания ПО верхнего уровня АСУ ТП, не требуя при этом от разработчика знаний современных процедурных языков программирования общего назначения. Не секрет, что в тонкостях автоматизируемого технологического процесса разбирается только технолог или другой представитель технологического персонала, как правило, не обладающий навыками программирования. SCADA-система должна быть доступной не только для разработчика, но и для конечного пользователя создаваемой АСУ ТП, поскольку облик системы определяется и может подвергаться изменениям как разработчиком, так и пользователем.

Помимо доступности, SCADA-системе должна быть присуща максимальная открытость - наличие универсальных и общепринятых механизмов обмена данными с аппаратурой ввода-вывода.

Умеренная цена и эффективное использование вложенных средств - стоимость системы, затраты на освоение и стоимость работ по созданию, сопровождению и развитию АСУ ТП должны быть минимальными. При прочих равных условиях данное требование является наиболее существенным при выборе SCADA-системы.

Краткая характеристика SCADA-систем RTWin, TRACE MODE, GENESIS32.

RTWin представляет собой мощный и гибкий инструмент для проектирования систем контроля и управления (СКУ) технологическими процессами, предоставляющий разработчику все возможности для создания мощной распределенной и масштабируемой СКУ, функционирующей в реальном масштабе времени. RTWin разработан как универсальная система, которая может найти применение в различных областях промышленности. Как интегрированный пакет, обеспечивающий полный цикл разработки и функционирования СКУ, RTWin состоит из: среды разработки, включающей редакторы ресурсов для проектирования СКУ; среды исполнения, включающей администраторы соответствующих ресурсов и обеспечивающей функционирование СКУ.

RTWin в полной мере использует все преимущества QNX - эффективной и надежной сетевой операционной системы (ОС). В качестве среды визуализации используется графический интерфейс Photon microGUI. RTWin - единственный пакет данного класса, для QNX, разработанный в России.

TRACE MODE 5 для Windows NT (разработчик - фирма AdAstra, г.Москва) представляет собой SCADA-систему нового поколения, имеющую следующие основные особенности: обеспечение единых инструментальных средств (единой линии программирования) как для разработки операторских станций, так и для программирования контроллеров; разработка распределенной АСУ ТП как единого проекта; технология автопостроения проекта.

Разработанные в инструментальной системе TRACE MODE 5 язык функциональных блоков (Техно FBD) и язык инструкций (Техно IL) включают набор из более чем 150 элементарных и библиотечных функций. Среди встроенных алгоритмов ПИД, ШИМ-преобразование, динамическая балансировка, алгоритмы массового обслуживания, блоки моделирования объектов, произвольно программируемые алгоритмы, арифметические, алгебраические, логические, тригонометрические, статистические функции, а также функции расчета технико-экономических показателей и т.д. Добавлен ряд функциональных блоков, ориентированных на контроль и управление типовыми технологическими объектами (клапан, задвижка, привод и т.д.). Кроме того проектировщик имеет возможность наращивать библиотеки языков своими собственными функциями, учитывающими особенности задач, решаемых в его проектах.

Суть автопостроения заключается в автоматическом генерировании баз каналов операторских станций и контроллеров, входящих в проект АСУ ТП, на основе

информации о числе точек ввода/вывода, номенклатуре используемых контроллеров и устройств сопряжения, наличии и характере связей между ПК и контроллерами. Благодаря автопостроению разработка АСУ ТП сводится к следующим несложным процедурам:

- размещение в рабочем поле редактора базы каналов TRACE MODE 5 значков (объектов) контроллеров и операторских ПК;
- указание наличия информационного обмена между узлами;
- запуск автопостроения проекта;
- задание математической обработки данных и алгоритмов управления.

Разработка графического интерфейса операторских станций осуществляется в объектно-ориентированном редакторе представления данных. Среди графических элементов, которые могут быть размещены на экранах графических баз, можно выделить три типа:

- статические элементы (неизменяемые элементы мнемосхем);
- динамические формы отображения и управления (кнопки, тренды, гistogramмы, анимация и т.д.);
- графические объекты.

Графические объекты могут включать в себя неограниченное количество статических элементов рисования и динамических форм отображения. Они вставляются в экраны в виде одного элемента.

GENESIS32 - комплект инструментальных средств фирмы ICONICS для создания программного обеспечения верхнего уровня АСУ ТП, который основан на новейшем открытом стандарте взаимодействия аппаратуры и программных средств разных производителей OPC (OLE for Process Control). OPC (механизм связывания и внедрения объектов для сбора данных и управления в системах промышленной автоматизации) является наиболее общим способом организации взаимодействия между различными источниками и приемниками данных, такими как устройства, базы данных и системы визуализации информации о контролируемом объекте. OPC обеспечивает интерфейс между приложениями-клиентами и серверами путем реализации стандартного механизма связи между источниками данных (серверами) и получателями данных (клиентами). Иными словами, OPC является аналогом технологии Plug-n-Play для программного обеспечения в сфере промышленной автоматизации. Стандарт OPC основан на решениях, предлагаемых компанией Microsoft в рамках операционной системы Windows.

GENESIS32 включает в себя следующие приложения, являющиеся клиентами OPC: GraphWorX32, TrendWorX32, AlarmWorX32, а также содержит среду разработки сценарных процедур VBA Scripting. Кроме того, в состав пакета входит сервер системного администрирования Security Config и сервер фоновой архивации данных Persistent Trending.

GraphWorX32 является инструментальным средством, предназначенным для визуализации контролируемых технологических процессов и оперативного диспетчерского управления на верхнем уровне АСУ ТП. Основные характеристики:

- многопоточное 32-разрядное приложение; возможность обмена данными с любыми серверами OPC;
- мощные инструменты для создания экранных форм и динамических элементов отображения;
- возможность встраивания элементов управления ActiveX и объектов OLE;
- средства разработки шаблонов экранных форм, содержащих наиболее часто используемые слои графических объектов;
- возможность встраивания в HTML-страницы и серверы OLE (MS Word, MS Excel и др.);
- возможность просмотра браузерами Интернет;
- обширная библиотека элементов отображения, ориентированных на построение мнемосхем промышленных объектов;
- возможность встраивания графиков и журналов событий и тревог;
- средства импорта графических метафайлов (WMF) и растровых изображений (BMP).

TrendWorX32 является многооконным приложением, которое предназначено для выполнения следующих функций:

- представление контролируемых параметров в виде графиков (трендов) различных типов в реальном масштабе времени;
- архивирование значений контролируемых параметров;
- вычисление статистических характеристик выборок значений контролируемых параметров;
- извлечение значений контролируемых параметров из архивов и представление в виде графиков различных типов;
- вывод графиков на печатающее устройство.

Поддерживаются следующие виды трендов:

Управление цифровых образовательных технологий

- ✚ зависимость параметра от времени (с использованием единиц времени по горизонтальной или вертикальной осям);
- ✚ гистограмма параметра;
- ✚ логарифмическая зависимость параметра от времени; зависимость одного параметра от другого.

AlarmWorX32 является мультимедийным приложением, которое предназначено для выполнения следующих функций:

- ❖ голосовое оповещение персонала об обнаруженных аварийных ситуациях; рассылка электронных извещений об аварийных событиях посредством пейджинговой связи и электронной почты;
- ❖ оповещение персонала путем автоматического дозвона по коммутируемым каналам связи с передачей сообщений об аварийных событиях и приемом подтверждений восприятия от ответственных лиц;
- ❖ персональное планирование оповещений для привлечения к мероприятиям по устранению аварийных ситуаций;
- ❖ анализ аварийных событий и действий ответственного персонала; и т.д.

ЛЕКЦИЯ

по теме 4.5.1-2. Характеристика технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ)

ВОПРОСЫ

1. Общая характеристика технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ).
2. Основные этапы технологии АСМ.
3. Содержание и организация выполнения первого этапа постановки задачи АСМ и расчетов.
4. Содержание и организация выполнения второго этапа постановки задачи АСМ и расчетов.
5. Содержание и организация выполнения третьего этапа применения результатов АСМ и расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и расчет надежности и безопасности АСУ ТП и оборудования на стадии проектирования. СПб., 2003.

1. Общая характеристика технологии автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ)

Существующие технологии моделирования и расчета надежности и безопасности структурно-сложных систем характеризуются следующими тремя основными этапами:

- постановки задачи, главное место в которой занимает разработка структурных схем надежности и/или сценариев возникновения аварийных ситуаций;
- построения расчетных математических моделей (логических, аналитических или статистических) для количественной оценки свойств надежности и безопасности систем;
- выполнения расчетов показателей надежности и безопасности систем и использование полученных результатов для выработки и обоснования исследовательских, проектных, эксплуатационных и других управленческих решений.

Постоянно возрастающие структурная сложность и размерность современных АСУТП сделали практически невозможным выполнение второго этапа средствами традиционных ("ручных") технологий построения математических моделей их надежности и безопасности. Решить данную проблему предусмотрено на основе технологий, в которых автоматизированы процессы построения сложных и высоко-размерных математических моделей надежности и безопасности АСУТП.

Существующие отечественные и зарубежные технологии и программные комплексы автоматизированного моделирования различаются способами представления исходных структурных схем, предметными областями (классами анализируемых объектов), методами и программными комплексами автоматизированного моделирования, а также составом вычисляемых показателей надежности и безопасности исследуемых систем. В настоящее время наибольшее распространение получили технологии автоматизированного моделирования, в основе которых лежат способы построения структурных схем надежности и сценариев возникновения аварий в виде деревьев отказов, деревьев событий, схем последовательно-параллельного соединения элементов, графов связности и схем функциональной целостности. Теоретической основой указанных технологий выступают различные модификации так называемых логико-вероятностных методов исследования

надежности структурно-сложных систем. По специализации, уровню теоретической разработки, качеству программной реализации, а также составу и точности вычисления показателей, разные технологии автоматизированного моделирования могут существенно отличаться друг от друга и в различной степени удовлетворять целям, задачам и особенностям проектных расчетов надежности и безопасности АСУТП различных типов и назначения.

Рассматриваемая в настоящих Методических рекомендациях технология автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета показателей надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования характеризуется следующими основными положениями:

- В технологии АСМ используется универсальный графический аппарат построения структурных моделей на этапе постановки задач оценки надежности и безопасности АСУТП - схемы функциональной целостности (СФЦ). С помощью СФЦ могут представляться практически все известные структурные схемы надежности и безопасности систем, используемые в других технологиях автоматизированного моделирования (деревья отказов, деревья событий, последовательно-параллельные соединения, графы связности и др.). Вместе с тем аппарат СФЦ позволяет строить принципиально новые классы немонотонных и комбинаторно-последовательных структурных моделей надежности и безопасности современных АСУТП.
- Теоретической основой технологии АСМ является общий логико-вероятностный метод (ОЛВМ) системного анализа. В сравнении с другими структурными методами моделирования надежности и безопасности систем, ОЛВМ впервые реализует все возможности основного аппарата моделирования - алгебры логики в базисе функционально полного набора операций "И", "ИЛИ" и "НЕ". Это позволяет с помощью ОЛВМ решать задачи оценки надежности и безопасности, которые решаются методами других технологий автоматизированного моделирования, а также учитывать в формируемых моделях ряд новых системных особенностей современных АСУТП.
- В ОЛВМ полностью алгоритмизированы и реализованы в программных комплексах автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ) наиболее сложные и громоздкие процессы построения математических моделей и выполнения расчетов показателей надежности и безопасности АСУТП. Это позволяет, во-первых, оценивать надежность и безопасность АСУТП большой размерности и высокой структурной сложности, и, во-

вторых, осуществить практическое внедрение технологии автоматизированного структурно-логического моделирования в деятельность Предприятий.

- Универсальность и полнота разработки ОЛВМ обеспечивают возможность дальнейшего развития технологии и ПК АСМ, а также их адаптацию к особенностям задач моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП различных Предприятий.

2. Основные этапы технологии АСМ

На первом этапе постановки задачи осуществляется:

- составление перечней главных функций F проектируемой АСУТП и возможных аварийных ситуаций $АС$, вероятностных и других системных показателей надежности и безопасности, которые должны быть определены в процессе моделирования и расчетов;
- построение формализованных структурных моделей (схем, сценариев) надежности и безопасности проектируемой АСУТП и определение критериев реализации главных функций (F) и возникновения аварийных ситуаций ($АС$).
- определение вероятностных и других параметров надежности элементов АСУТП и событий (нежелательных, инициирующих и др.), определяющих условия возникновения аварийных ситуаций.

По составу, содержанию и форме представления исходные данные, определяемые на первом этапе, должны позволять использовать соответствующие программные комплексы на следующих этапах автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП.

На втором этапе автоматизированного моделирования и расчетов выполняется:

- ввод исходных данных (схем функциональной целостности, критериев функционирования, параметров элементов и др.) в ПК АСМ;
- автоматическое построение математических моделей (логических, аналитических, статистических, марковских или др.) и расчеты на их основе показателей надежности и безопасности проектируемой АСУТП.

На третьем этапе применения результатов осуществляется выработка и обоснование проектных (управленческих) решений путем:

- использования вычисленных вероятностных показателей надежности и безопасности проектируемой АСУТП;
- детерминированного анализа отказоустойчивости и безопасности АСУТП на основе логических моделей реализации функций и возникновения аварийных ситуаций;
- решения задач параметрической и структурной оптимизации проектируемых АСУТП.

Содержание и организация выполнения указанных этапов технологии автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета показателей надежности и безопасности АСУТП описаны далее.

3. Содержание и организация выполнения первого этапа постановки задачи АСМ и расчетов

Для эффективного применения технологии автоматизированного структурно-логического моделирования на Предприятиях необходимо обеспечить методическую подготовку и организацию эффективной совместной работы специалистов по проектированию АСУТП, в интересах которых производится оценка надежности и безопасности (Заказчика), и специалистов по применению технологии и программных комплексов автоматизированного структурно-логического моделирования (Исполнителя).

Начальный этап и основную, содержательную часть постановки задачи выполняет Заказчик, или привлеченная им для участия в работе специализированная организация (специалисты). На этом этапе выполняется подготовка исходных данных, перечисленных в п. 6.1.1. При этом первичное представление структурных моделей АСУТП по функциям F и заданным аварийным ситуациям АС может осуществляться в любой из следующих общепринятых форм:

- структурно-функциональных схем с дополнительными описаниями логических условий работы элементов, реализации функций и возникновения аварийных ситуаций в АСУТП;
- деревьев отказов;
- деревьев событий;
- схем последовательно-параллельного соединения элементов;
- графов связности;
- схем функциональной целостности, которые непосредственно используются в технологии и ПК АСМ.

Значения исходных вероятностных $p_i = p_i(t)$, $q_i = 1 - p_i$ и других параметров элементов $i = 1, 2, \dots, N$ определяются в соответствии с ГОСТ 27.301-95. При этом источниками этих исходных данных могут быть:

- стандарты и технические условия на составные части и комплектующие элементы АСУТП;
- справочники и базы данных по надежности элементов и частотам нежелательных, иницирующих и др. исходных событий аварий АСУТП;
- данные о надежности объектов-аналогов элементов, входящих в состав АСУТП;
- другие источники, включая результаты обработки статистических данных эксплуатации, автономное моделирование и расчет надежности элементов и подсистем, а также экспертные оценки специалистов.

Завершающий этап постановки задачи выполняет Исполнитель. Он осуществляет формализацию исходных данных и подготовку их к вводу в ПК АСМ. В том случае, если структурные схемы АСУТП представлены Заказчиком не непосредственно в форме СФЦ, то Исполнитель преобразует их в графы $G(X, Y)$ схем функциональной целостности и согласует с Заказчиком. Для каждой выходной функции из множества F и аварийной ситуации из множества АС формулируются соответствующие логические критерии функционирования $Y_F(\{y_i\})$ и $Y_{AC}(\{y_i\})$.

Изобразительные средства и методика построения СФЦ изложены в Приложении 1 [1]. Примеры формализованной постановки задачи автоматизированного структурно-логического моделирования фрагментов АСУТП приведены в Приложении 4 [1].

Работы по первому этапу постановки задачи автоматизированного моделирования и расчетов могут выполняться Заказчиком, Исполнителем или совместно.

4. Содержание и организация выполнения второго этапа автоматизированного моделирования и расчетов

Подготовленные на первом этапе формализованные исходные данные (СФЦ, ЛКФ и параметры элементов) для каждой выходной функции F и заданной аварийной ситуации АС Исполнитель вводит в ПК АСМ. В Приложении 2 [1] описан состав модулей типового программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования надежности и безопасности АСУТП.

На основе введенного в ПК АСМ графа $G(X, Y)$ СФЦ проектируемой АСУТП для каждого заданного ЛКФ $Y_F(\{y_i\}), Y_{AC}(\{y_i\})$ осуществляется автоматическое построение логических функций работоспособности $Y_F(\{x_i\})$ и $Y_{AC}(\{x_i\})$. Автоматическое построение ФРС осуществляется в ПК АСМ универсальным программным модулем логического моделирования. Он позволяет получать все возможные виды логических ФРС, например, кратчайшие пути успешного функционирования, минимальные сечения отказов, минимальные пропускные и отсечные сочетания, а также их немонотонные комбинации.

Полученные логические ФРС $Y_F(\{x_i\})$ и $Y_{AC}(\{x_i\})$ с помощью программных комплексов аналитического моделирования автоматически преобразуются в соответствующие многочлены расчетных вероятностных функции $P_F(\{p_i, q_i, t\})$ и $P_{AC}(\{p_i, q_i, t\})$. Многочлены ВФ являются аналитическими законами распределения времени безотказной работы, которые соответствуют СФЦ и заданным логическим критериям функционирования АСУТП.

С помощью полученных логических и вероятностных математических моделей в ПК АСМ выполняются расчеты требуемых показателей надежности и безопасности проектируемых АСУТП. В Приложении 3 описаны ряд методов расчета типовых показателей надежности АСУТП, которые реализованы в базовых образцах ПК АСМ. В Приложении 4 приведены два примера расчета вероятностных показателей и детерминированного анализа надежности и безопасности фрагментов АСУТП.

Состав методов и методики расчета, вероятностных и других показателей надежности и безопасности, могут изменяться в процессе развития теории и адаптации технологии и программных комплексов автоматизированного структурно-логического моделирования АСУТП к особенностям различных Предприятий.

5. Содержание и организация выполнения третьего этапа применения результатов автоматизированного моделирования и расчетов

Для выработки и принятия проектных решений на основе результатов автоматизированного моделирования, на Предприятиях используются типовые или специально разрабатываемые методы, компьютерные программы и методики, позволяющие реализовать цели и решать задачи расчета надежности и безопасности

АСУТП. В этих методах должны учитываться особенности проектируемых на Предприятиях АСУТП и объектов управления.

Одним из типовых приемов использования результатов автоматизированного моделирования и расчетов является нормативный анализ. Он осуществляется путем сравнения показателей достигнутого уровня надежности и безопасности проектируемой АСУТП с требованиями, указанными в нормативных документах, технических заданиях или программах обеспечения надежности. По результатам нормативного анализа принимаются соответствующие проектные и другие решения.

Использование результатов автоматизированного моделирования в процессе проектирования должно осуществляться на основе объективной оценки роли (значимости, положительных и отрицательных вкладов) отдельных или групп элементов в обеспечение надежности и безопасности АСУТП в целом. На этой основе вырабатываются оптимальные, по технико-экономическим показателям, проектные решения, направленные на увеличение надежности, безопасности, эффективности и снижение риска функционирования разрабатываемых АСУТП. Пример использования результатов автоматизированного моделирования и расчетов для увеличения надежности и безопасности фрагмента АСУТП приведен в Приложении 4.

Рекомендуется планировать работы, направленные на совершенствование и адаптацию технологии и ПК АСМ к особенностям различных Предприятий, разработку методов, компьютерных программ и методик применения результатов моделирования и оценки надежности и безопасности для выработки и обоснования проектных (управленческих) решений.

ЛЕКЦИЯ

по теме 4.5.3. Анализ схем и методы расчета показателей надежности и безопасности АСУТП

ВОПРОСЫ

1. Аппарат схем функциональной целостности.
2. Состав модулей типового программного комплекса АСМ.
3. Методы расчета типовых вероятностных показателей надежности и безопасности АСУТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и расчет надежности и безопасности АСУ ТП и оборудования на стадии проектирования. СПб., 2003.

1. Аппарат схем функциональной целостности

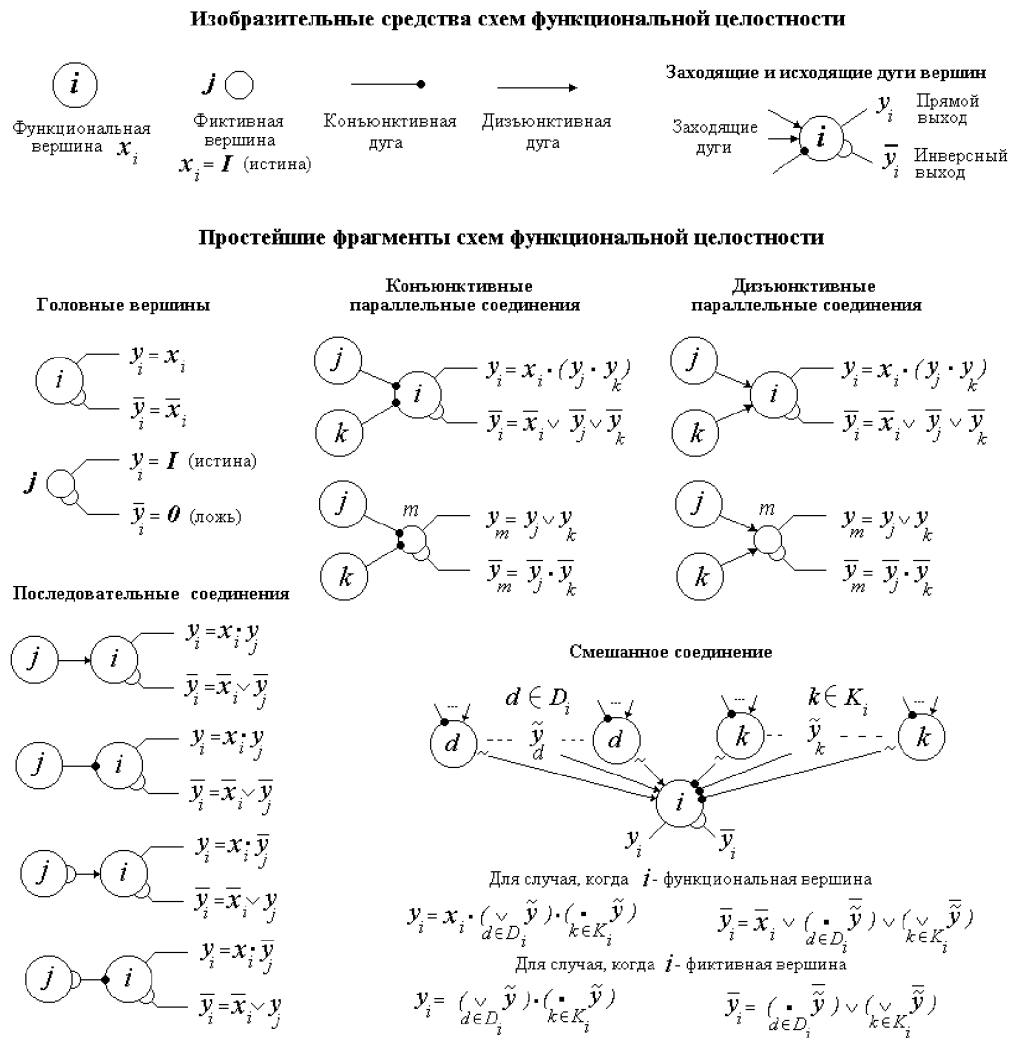


Рис.1. Изобразительные средства и типовые фрагменты СФЦ

Разработка СФЦ для автоматизированного моделирования и расчета надежности и безопасности АСУ ТП является основой формализованной постановки задач в технологии АСМ. Теоретической базой методики разработки СФЦ и задания ЛКФ выступает общий логико-вероятностный метод системного анализа. Граф схемы функциональной целостности $G(X, Y)$ представляет собой универсальное средство структурного представления состава элементов системы ($x_i \in X$) и логических условий ($y_i \in Y$) реализации ими своих функций в системе. С помощью логических критериев функционирования $Y_F(\{y_i\})$ и $Y_{AC}(\{y_i\})$ задаются условия реализации выходных функций (F) и возникновения аварийных ситуаций (AC) в проектируемой АСУ ТП.

Общая методика построения СФЦ включает в себя следующие основные этапы.

1) Подготовительный этап:

На основе предоставленных Заказчиком перечня элементов, форм представления и описания структурных схем АСУТП определяется состав функциональных вершин $i = 1, 2, \dots, N$, которыми представляются в СФЦ элементы, входящие в структурные части (подсистемы) проектируемой АСУТП;

На основе перечней и описаний функций F и аварийных ситуаций АС проектируемой АСУТП выделяются те ее структурные части (фрагменты и подсистемы), для которых должны быть построены частные СФЦ фрагментов и подсистем проектируемой АСУТП.

2) Разработка частных СФЦ фрагментов и подсистем АСУТП:

Для каждого элемента i фрагмента или подсистемы определяются его выходная функция y_i , и логические условия ее реализации функциями $y_j, y_k, \dots$ других элементов данной структурной части АСУТП;

Логические условия реализации выходных функций представляются графическими средствами СФЦ (см. рис.1) на входах и выходах функциональных и фиктивных вершин, входящих в состав разрабатываемых частных СФЦ фрагментов и подсистем проектируемой АСУТП.

3) Разработка общих СФЦ надежности и безопасности АСУТП и определение ЛКФ:

Сложные и высокоразмерные АСУТП могут представляться несколькими частными СФЦ надежности и безопасности отдельных и групп выходных функций F и аварийных ситуаций АС проектируемой АСУТП.

При необходимости, разработанные СФЦ структурных фрагментов могут объединяться в общие СФЦ реализации всех выходных функций F и СФЦ возникновения аварийных ситуаций АС в проектируемой АСУТП;

Для каждой функции F и аварийной ситуации АС определяются (задаются) логические критерии функционирования $Y_F(\{y_i\})$ и $Y_{AC}(\{y_i\})$. В технологии АСМ эти критерии могут определять, как условия реализации, так и условия не реализации функций F и аварийных ситуаций АС, а также любые немонотонные комбинации этих условий.

4) Анализ результатов построения СФЦ:

- в случае согласования результатов структурного моделирования Заказчиком и Исполнителем, процедура построения СФЦ завершается;

- в противном случае выполняется итерационная корректировка предыдущих этапов до успешного построения СФЦ надежности и/или безопасности проектируемой АСУТП.

2. Состав модулей типового программного комплекса АСМ

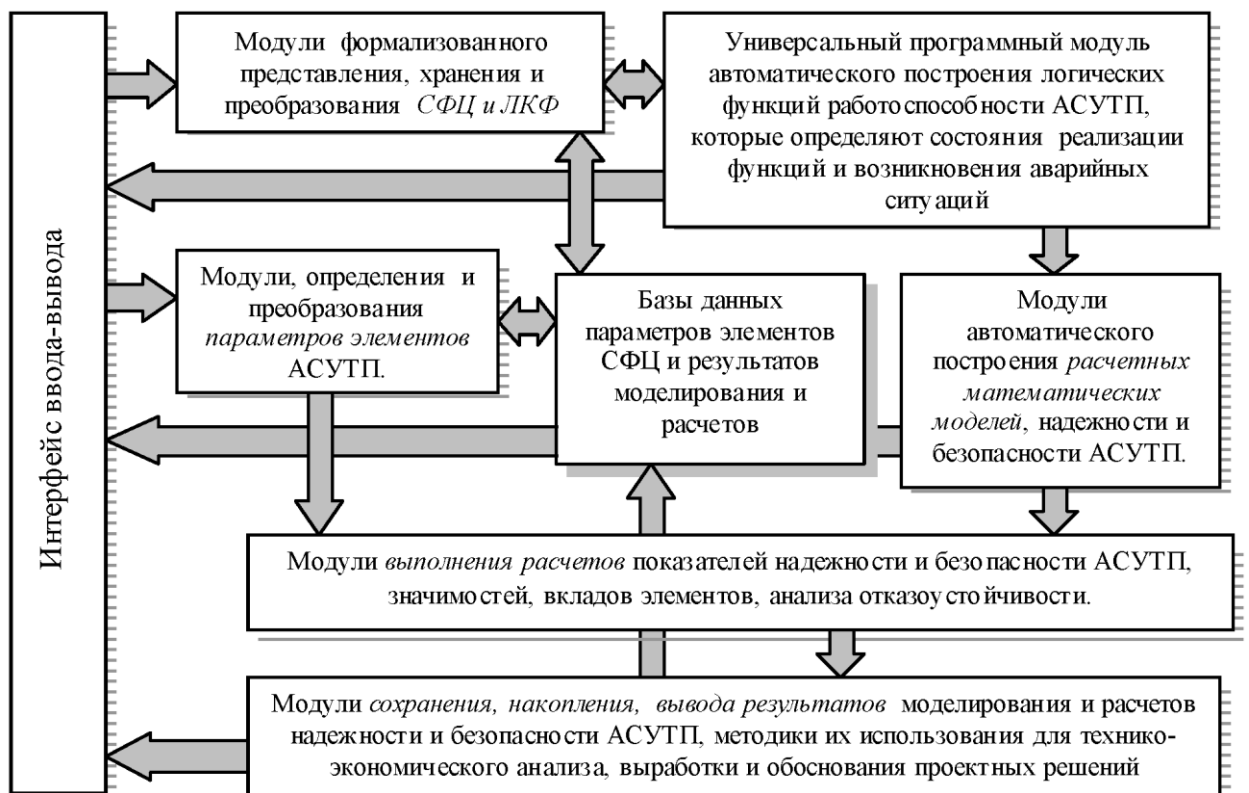


Рис.2. Структура и состав модулей типового ПК АСМ

1. Программные комплексы АСМ, используемые для моделирования и расчета надежности и безопасности АСУТП, по составу определяемых показателей и

точности их вычислений должны соответствовать требованиям государственных и отраслевых нормативных и технических документов на создание АСУТП.

2. Схема, приведенная на рис.2, представляет базовый образец программного комплекса, реализующего технологию автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета показателей надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования, который должен обладать следующими функциональными возможностями:

- выполнять автоматизированное моделирование и расчет показателей надежности и безопасности фрагментов, подсистем и АСУТП в целом, условия реализации функций и возникновения аварийных ситуаций в которых представлены графами схем функциональной целостности и логическими критериями функционирования;
- автоматически строить логические и вероятностные модели для АСУТП большой размерности и высокой структурной сложности;
- автоматически вычислять показатели надежности и безопасности АСУТП;
- обеспечивать возможность применения результатов моделирования и расчетов для выработки и технико-экономического обоснования проектных решений в области надежности и безопасности АСУТП на стадии проектирования.

3. Интерфейс ввода-вывода ПК АСМ должен обеспечивать удобный (как правило, графический) ввод исходных данных (СФЦ, ЛКФ, параметров элементов и режимов работы ПК АСМ) и вывод результатов моделирования и расчетов показателей надежности и безопасности АСУТП.

4. Модули формализованного представления, хранения и преобразования СФЦ и ЛКФ предназначены для обеспечения эффективной обработки в ПК АСМ структурных моделей надежности и безопасности АСУТП большой размерности и высокой структурной сложности. В частности, они должны обеспечивать реализацию процессов декомпозиции и агрегирования громоздких процедур автоматического построения логических ФРС.

5. Универсальная программа (программный модуль) построения логических функций работоспособности является центральным звеном ПК АСМ. Она должна позволять автоматически формировать различные виды логических ФРС: монотонных (в базисе операций "И", "ИЛИ") и немонотонных (в базисе операций "И", "ИЛИ", "НЕ"), КПУФ, МСО, минимальных пропускных и отсечных сочетаний, а также любые их комбинации. В логических ФРС должны учитываться особенности различных

АСУТП. Например, разные начальные состояния системы, наличие группы несовместных событий, отказы по общей причине, многофункциональность элементов, наличие элементов с числом состояний больше двух, способность АСУТП функционировать в различных состояниях с разной эффективностью или различной степенью риска, и др.

6. Модули определения и преобразования параметров элементов должны осуществлять оперативную подготовку исходных данных для выполнения расчетов показателей надежности и безопасности АСУТП.

7. Базы данных, входящие в состав или связанные с ПК АСМ, должны обеспечивать выдачу, хранение и обновление параметров элементов, типовых фрагментов и ранее подготовленных СФЦ, а также результатов автоматизированного моделирования и расчетов надежности и безопасности АСУТП.

8. Программные модули автоматического построения расчетных математических моделей в зависимости от специализации ПК АСМ должны выполнять:

- формирование аналитических моделей в виде многочленов расчетных вероятностных и других функций (реализуется в базовом образце ПК АСМ);
- формирование статистических моделей оценки показателей надежности и безопасности АСУТП;
- формирование марковских моделей для динамического анализа надежности и безопасности АСУТП;
- формирование различных сетевых моделей функционирования АСУТП, позволяющих учесть, например, последовательности отказов элементов, влияние ненадежных переключателей и процессов развития возможных аварийных ситуаций.

9. Модули выполнения расчетов предназначены для количественной оценки различных единичных и комплексных показателей надежности и безопасности АСУТП, относящихся к объектам I и II вида (по классификации ГОСТ 27.301). Одновременно с расчетом общесистемных показателей в ПК АСМ должны определяться характеристики роли отдельных элементов (значимостей и вкладов). Это обеспечит возможность дальнейшей автоматизации процессов решения специальных задач технико-экономического обоснования, оптимизации, распределения ресурсов, целевого планирования и управления разработкой АСУТП на стадии проектирования.

10. Модули сохранения, накопления и вывода результатов предназначены для обеспечения удобной и эффективной работы лиц, принимающих проектные решения, и реализации различных методик технико-экономического обоснования проектируемых АСУТП.

11. Структура и программная реализация комплексов АСМ должны обеспечивать возможность их дальнейшего совершенствования, развития а адаптацию к особенностям решения задач оценки надежности и безопасности АСУТП различных Предприятий.

3. Методы расчета типовых вероятностных показателей надежности и безопасности АСУТП

1. Вероятности $P_F(t)$ безотказной работы (или отказа) и $P_{AC}(t)$ возникновения (или не возникновения) аварийных ситуаций для невосстанавливаемых АСУТП рассчитываются путем подстановки в соответствующие многочлены $P_F(\{p_i, q_i, t\})$ и $P_{AC}(\{p_i, q_i, t\})$ числовых значений вероятностей безотказной работы и/или отказа элементов $p_i = p_i(t)$, $q_i = 1 - p_i$. При экспоненциальном законе распределения наработки до отказа, указанные вероятностные параметры элементов вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} p_i &= p_i(t) = e^{-\frac{t}{T_{oi}}}, \\ q_i &= q_i(t) = 1 - p_i(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где i - номер элемента, T_{oi} - средняя наработка элемента до отказа, t - заданная наработка.

Допускается использование других законов распределений или заданных (предварительно вычисленных) статических вероятностей p_i , $q_i = 1 - p_i$ элементарных событий моделей надежности и безопасности АСУТП.

2. Средняя наработка до отказа T_{OF} или аварии T_{OAC} невосстанавливаемой АСУТП определяются на основе следующей расчетной процедуры:

$$T_{OF/OAC} = \int_0^{\infty} P_{F/AC}(t) dt = \sum_{j=1}^M (zn_j) \frac{1}{\sum_{i \in K_j} \frac{1}{T_{oi}}} \quad (2)$$

где M - число одночленов в многочлене ВФ, (zn_j) - знак j -го одночлена ВФ, а K_j - множество номеров элементов, параметры $p_i(t)$ которых вошли в состав j -го одночлена вероятностной функции.

3. Коэффициент готовности $P_{F/AC}(t) = P_{F/AC} = K\Gamma_{F/AC}$ восстанавливаемой АСУТП рассчитывается путем подстановки в многочлены $P_F(\{p_i, q_i, t\})$ или $P_{AC}(\{p_i, q_i, t\})$ числовых значений коэффициентов готовности $K\Gamma_i$ и коэффициентов неготовности $1 - K\Gamma_i$ элементов:

$$p_i = K\Gamma_i = \frac{T_{oi}}{T_{oi} + T_{vi}}; \quad q_i = 1 - K\Gamma_i, \quad (3)$$

где T_{gi} - среднее время восстановления элемента.

4. В технологии АСМ предусмотрены расчеты трех видов показателей роли отдельных элементов в обеспечении надежности или безопасности АСУТП:

$$\text{Значимость элемента: } \xi_i = \left(P_{F/AC}(t) \Big|_{p_i(t)=1} \right) - \left(P_{F/AC}(t) \Big|_{p_i(t)=0} \right) \quad (4)$$

$$\text{Положительный вклад элемента: } B_i^+ = \left(P_{F/AC}(t) \Big|_{p_i(t)=1} \right) - P_{F/AC}(t) \quad (5)$$

$$\text{Отрицательный вклад элемента: } B_i^- = - \left(P_{F/AC}(t) - \left(P_{F/AC}(t) \Big|_{p_i(t)=0} \right) \right) \quad (6)$$

Здесь $P_{F/AC}(t) \Big|_{p_i(t)=1}$ - значение вероятностной характеристики надежности или безопасности АСУТП при абсолютной надежности элемента i , а $P_{F/AC}(t) \Big|_{p_i(t)=0}$ - значение той же характеристики АСУТП при достоверном отказе элемента i на рассматриваемом интервале t времени функционирования. Согласно (4) величина значимости ξ_i равна абсолютному изменению значения системной характеристики $P_{F/AC}(t)$, которое произойдет, если значение собственного параметра надежности элемента $p_i = p_i(t)$ изменить от 0 до 1 включительно (при фиксированных значениях заданных параметров всех других элементов системы). Диапазон значений значимости в общем случае составляет $[-1, 0, +1]$. При этом $\xi_i < 0$ означает, что увеличение надежности элемента уменьшает надежность всей системы (вредный, опасный элемент). Отрицательные значимости элементов характерны для немонокотных логико-вероятностных моделей АСУТП. Нулевые значимости $\xi_i = 0$ имеют элементы, которые не участвуют в реализации функции F или аварийной ситуации АС (несущественные элементы). Положительные значимости $\xi_i > 0$ определяют то максимально возможное увеличение характеристики $P_{F/AC}(t)$ АСУТП, которое она может получить, если изменить надежность $p_i = p_i(t)$ только одного элемента i от нуля до единицы включительно. Все элементы монотонных систем могут иметь только положительные или нулевые значения характеристик их значимости. Величина B_i^+ положительного вклада (5) равна абсолютному изменению надежности $P_{F/AC}(t)$ АСУТП, которое произойдет, если собственную характеристику $p_i = p_i(t)$ надежности одного элемента i увеличить от ее текущего значения $p_i = p_i(t)$ до единицы. Величина B_i^- отрицательного вклада (6) равна абсолютному изменению надежности $P_F(t)$ АСУТП, которое произойдет, если собственную характеристику надежности одного элемента i уменьшить от ее текущего значения p_i до

нуля. Показатели роли элементов позволяют выработать и обосновать проектные решения по обеспечению надежности и безопасности проектируемых АСУТП.

5. Для восстанавливаемых АСУТП расчет средней наработки T_{OB} на отказ или аварийную ситуацию и среднего времени восстановления T_B осуществляется на основе формул:

$$T_{OB} = K\Gamma_{F/AC} \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^H \xi_i \frac{1}{T_{oi}} K\Gamma_i} \right) \quad (7)$$

$$T_B = (1 - K\Gamma_{F/AC}) \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^H \xi_i \frac{1}{T_{oi}} K\Gamma_i} \right) \quad (8)$$

6. На основе оценок (7) и (8) определяется приближенное значение еще одной важной характеристики надежности восстанавливаемой АСУТП – вероятности $P_{BF}(t)$ ее безотказной работы в течение заданного времени t . Расчет этого показателя основывается на гипотезе о том, что распределение протяженности суммарного времени безотказной работы и последующего времени восстановления системы близко к экспоненциальному закону и может характеризоваться эквивалентной интенсивностью

$$\lambda_{\Theta} = \frac{1}{T_{OB} + T_B} \quad (9)$$

Тогда вероятности безотказной работы и отказа, в течение времени t функционирования восстанавливаемой АСУТП любой структуры, составят

$$P_{BF/BAC}(t) = e^{-\lambda_{\Theta} t} = e^{-\frac{t}{T_{OB} + T_B}}; \quad Q_{BF/BAC}(t) = 1 - P_{BF/BAC}(t). \quad (10)$$

ЛЕКЦИЯ

По теме «ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРИБОРОВ И СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ»

ВОПРОСЫ

1. Общие сведения о государственной системе промышленных приборов и средствах автоматизации.
2. Агрегатные комплексы технических средств автоматизации.
3. Интерфейсы и сигналы связи.
4. Средства получения информации.
5. Средства обработки информации и формирования сигналов управления.
6. Исполнительные устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курсовое и дипломное проектирование по автоматизации производственных процессов: Учеб. пособие для вузов / Под ред. И.К. Петрова. – М.: ВШ, 1986.
2. Смирнов Ю.А. Технические средства автоматизации. ЭУП. 2011.

1. Общие сведения о государственной системе промышленных приборов

Построение любой системы автоматизации – простой или сложной – основывается на использовании комплекса технических средств (ТС) автоматизации, к которым относятся в первую очередь измерительные преобразователи (датчики) различных физических и других величин — параметров; автоматические управляющие устройства, в том числе автоматические регуляторы, логические и программные устройства, управляющие вычислительные машины, в том числе микропроцессорные и др.; исполнительные устройства (механизмы и регулирующие органы). Кроме того, в системах применяется ряд вспомогательных устройств, к которым относятся устройства для передачи сигналов, различные реле, таймеры, устройства для отображения, регистрации и представления информации и т. п. Каждый из элементов технических средств характеризуется соответствующим

входными и выходным и сигналами и устройствами, с помощью которых осуществляется их объединение в единое целое, предназначенное для выполнения возлагаемых на данную систему функций.

Таким образом, технические средства автоматизации — это полная совокупность технических средств (комплекс технических средств), достаточная для функционирования любых систем автоматизации, начиная от простейших локальных систем автоматического регулирования отдельных технологических параметров и до автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и автоматизированных систем управления производством (АСУП).

Принципиальная особенность требований к техническим средствам автоматизации или, как говорят, к техническому обеспечению, обусловлена тем, что приборы и устройства в составе систем используются не индивидуально и независимо, а непрерывно и тесно взаимодействуют друг с другом, причем каждый прибор или устройство в этом взаимодействующем комплексе выполняет часть общего алгоритма управления.

Отечественная приборостроительная промышленность практически полностью обеспечивает потребности в серийно выпускаемых технических средствах для построения (синтеза) разрабатываемых систем автоматизации любых уровней для различных отраслей народного хозяйства.

Современные системы автоматизации любых уровней должны строиться, как правило, на базе серийно выпускаемых средств автоматизации и вычислительной техники. В качестве локальных средств сбора и накопления первичной информации, приборов для представления ее наблюдателю, регулирующих и исполнительных устройств следует использовать приборы и средства автоматизации Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП), в качестве средств централизованного сбора, передачи и переработки информации следует использовать средства агрегатных комплексов (АК). *ГСП представляет собой эксплуатационно, информационно, энергетически, метрологически и конструктивно организованную совокупность изделий, предназначенных для использования в промышленности в качестве технических средств АСУ ТП, информационно-измерительных систем (ИИС), а также для контроля, измерения и регулирования отдельных параметров.*

В состав ГСП входит несколько тысяч наименований изделий, позволяющих строить эффективные АСУ установками, агрегатами и производствами различной функциональной сложности — от простейших систем автоматического контроля и

стабилизации отдельных параметров технологического процесса до сложных многоуровневых систем управления, реализующих оптимизационные задачи управления, косвенные измерения, многосвязное регулирование, многоступенчатые защиты и логические операции при пуске и останове объектов. Выбор оптимального состава ТС в каждом конкретном случае – это сложная задача, которую можно решить на основе четкого представления обо всей номенклатуре выпускаемых ТС, их основных характеристик, особенностях, возможных способах совместного использования и рациональных областях применения.

Возможность совместного использования изделий ГСП в комплектных системах и устройствах обеспечивается путем выполнения основных требований совместимости технических средств. Под совместимостью технических средств понимается совокупность их свойств, обеспечивающих возможность совместного использования этих средств, в заранее предусмотренных сочетаниях, для построения комплексных устройств и систем без необходимости применения дополнительных приспособлений и устройств. При этом с учетом взаимного влияния технических средств должны обеспечиваться заданные характеристики комплексных устройств и систем. ГСП состоит из ряда обособленных и достаточно устойчивых групп (семейств, комплексов, рядов) изделий.

На рис. 2.1 показана иерархическая структурная схема ГСП, в соответствии с которой все изделия делятся на пять групп, расположенных на четырех уровнях.

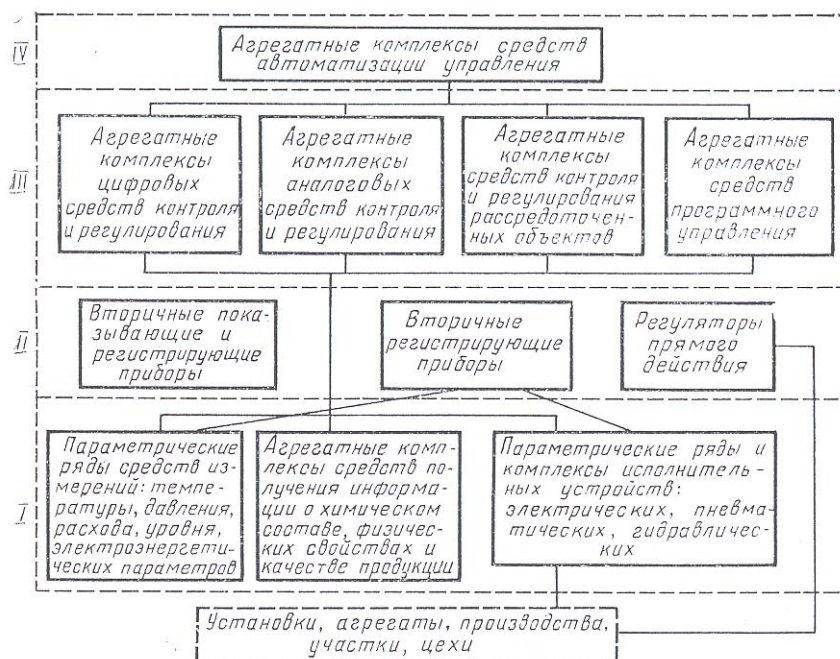


Рис. 2.1. Иерархическая структурная схема ГСП

На первом уровне находятся средства получения информации и средства воздействия на процесс, которые непосредственно взаимодействуют с объектами управления. Они обеспечивают информацией все вышерасположенные на схеме средства и передают управляющие воздействия от любого из них на управляемый объект. Измерение параметров, не связанное со сложными инструментальными методиками, осуществляется с помощью изделий, входящих в параметрические ряды. Для реализации измерений, требующих сложных инструментальных методик, предназначены изделия, входящие в АК.

На втором уровне расположены средства контроля и регулирования, предназначенные для построения автоматических систем контроля и регулирования простых объектов или автономного контроля и регулирования отдельных параметров сложных объектов. Эти изделия, как правило, выпускаются в составе параметрических рядов и унифицированных систем, создаваемых на основе базовой модели.

На третьем уровне находятся устройства централизованного контроля и регулирования. Они могут использоваться как самостоятельно, так и в составе систем, на верхних уровнях которых имеются управляющие вычислительные комплексы, данные технические средства предназначены для построения АСУ ТП объектов, имеющих до нескольких сотен контролируемых и регулируемых параметров. Они позволяют реализовать взаимосвязанное и оптимальное регулирование, косвенные измерения, многоступенчатые защиты и логические операции при пуске и останове объекта, а также при перестройке алгоритма управления.

На верхнем, четвертом уровне, расположены средства автоматизации управления, предназначенные для построения управляющих вычислительных комплексов, которые позволяют осуществлять сложные алгоритмы управления объектом, в том числе супервизорное и непосредственное цифровое управление, решение оптимизационных задач, задач оперативного управления и планово-экономических и учетно-статистических задач.

По конструктивно-технологическому признаку изделия ГСП подразделяются на ряд взаимосвязанных классификационных подразделений (рис. 2.2).

Основным классификационным подразделением промышленных приборов и средств автоматизации является тип изделия, включающий совокупность изделий одинакового функционального назначения и принципа действия, сходных по конструктивному исполнению и имеющих одинаковую номенклатуру главных пара-

метров. При этом под главными параметрами понимаются параметры, определяющие основное функциональное назначение изделия. Например, для средств получения информации главными параметрами являются измеряемая физическая величина и выходной сигнал.

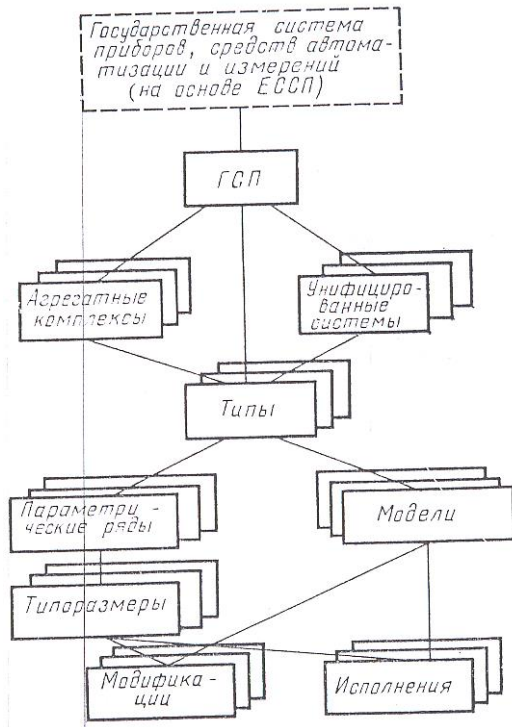


Рис. 2.2. Классификационные подразделения ГСП по конструкторско-технологическому исполнению

В состав типа входит несколько типоразмеров и моделей изделия.

Типоразмер включает в себя изделия одного типа, имеющие определенное числовое значение главного параметра.

Модель включает в себя изделия одного типа, имеющие определенный частичный набор главных параметров. Модели обычно выделяются в multifunctional изделиях.

Модификация включает в себя совокупность изделий одного типа, имеющих определенные конструктивные особенности или определенное значение не главного параметра.

Наряду с понятием модификации часто применяется понятие исполнение, под которым понимается включающее в себя совокупность изделий одного типа, которые имеют определенные конструктивные особенности, влияющие на их эксплуатационные характеристики. Например, имеются тропические исполнения мно-

гих изделий, которые отличаются повышенной влагостойкостью пропиточных и изоляционных материалов, устойчивостью к разрушающему воздействию тропических живых организмов.

Изделия нескольких типов, предназначенных для измерения различных параметров или выполнения различных функций, но построенных на основе одного принципа действия и имеющие одинаковые конструктивные элементы, объединяются в унифицированные системы.

Изделия унифицированной системы строятся по блочно-модульному принципу на основе унифицированных узлов и модулей, используемых в нескольких или во всех типах изделий системы. Примером является унифицированная система электрических измерительных преобразователей с силовой компенсацией. В состав унифицированной системы входят манометры, напоромеры, тягомеры, вакуумметры, дифманометры, уровнемеры и термометры около 50 типов, построенные на принципе силовой компенсации и использующие унифицированный электросиловой преобразователь и усилитель.

В последнее время в промышленном приборостроении широкое распространение получили принципы агрегатирования в виде создания агрегатных комплексов (АК) изделий, которые представляют собой совокупность типов изделий, взаимосвязанных между собой по функциональному назначению, конструктивному исполнению, главным параметрам и другим техническим данным. АК имеют технико-экономически обоснованную минимальную номенклатуру и создаются на единой конструктивной и технической базе по блочному принципу на основе использования базовых моделей и обеспечивающих решение всех функциональных задач, соответствующих их назначению.

В состав АК входят комплексные системы и установки, а также блоки и устройства, являющиеся эксплуатационно-законченными изделиями. Кроме того, в составе АК имеются субблоки и модули, которые не являются эксплуатационно-законченными изделиями. Они служат сборочными единицами для построения изделия. При построении комплексных систем и установок, кроме того, сборочными единицами являются блоки и устройства. Для построения изделий практически всех АК, а также для проектной компоновки различных изделий при создании АСУ ТП применяются разработанные в составе ГСП унифицированные типовые конструкции (УТК).

По виду энергии, используемой для питания устройств или для передачи сигнала, в ГСП выделяются самостоятельные ветви (группы): электрическая, пневматическая, гидравлическая и ветвь без использования вспомогательной энергии. Ввиду преимуществ электрической энергии, как в смысле питания, так и в смысле передачи сигнала, изделия электрической ветви получили наибольшее распространение. Приборы пневматической ветви характеризуются безопасностью применения в пожаро- и взрывоопасных средах, высокой надежностью в тяжелых условиях работы, особенно при использовании в агрессивной атмосфере. Они используются в соответствующих производствах как для получения информации и воздействия на технологический процесс, так и для формирования сигналов управления. Приборы гидравлической ветви используются исключительно в устройствах воздействия на технологический процесс.

Рационально совместное использование приборов и устройств различных ветвей. Для этого в ГСП имеются преобразователи вида сигнала и другие устройства.

Технические требования к техническим средствам определяются главным образом комплексом стандартов ГСП, который в настоящее время включает в себя около 200 государственных и отраслевых стандартов, основанных на единой методологии и построенных по принципу иерархического подчинения низших стандартов высшим (рис. 2.3).

Основным требованием ко всем средствам ГСП является их совместимость, т. е. возможность работать во взаимосвязи друг с другом в пределах одной АСУ ТП и ИИС. Это требование закреплено в основополагающем ГОСТ 12997—76 «Государственная система приборов и средств автоматизации. Общие технические требования. Методы испытаний».

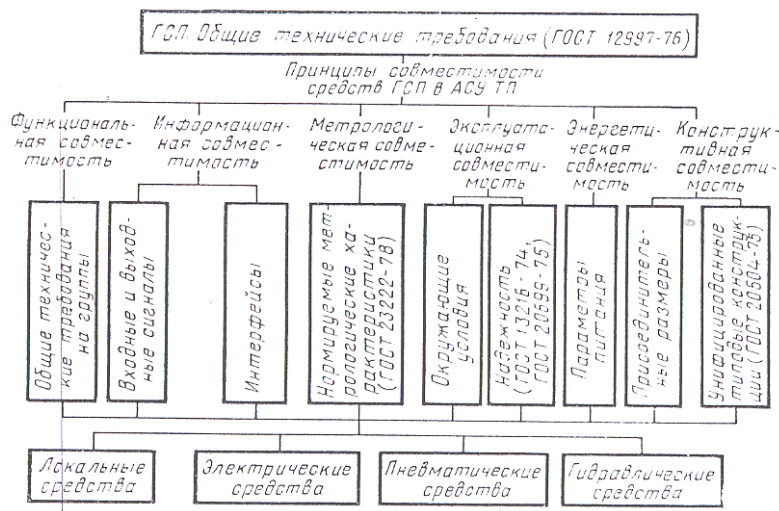


Рис. 2.3. Структура системы стандартов ГСП

Иерархичность системы стандартов ГСП заключается в том, что одному основополагающему ГОСТу подчинено более 60 общесистемных ГОСТов. В свою очередь, общесистемным ГОСТам подчинено около 60 частных стандартов на конкретные виды средств ГСП.

Общесистемные ГОСТы определяют существенную часть наиболее общих свойств, средств ГСП. Ряд конкретных свойств определяется нижним иерархическим уровнем стандартов — частными стандартами, распространяющимися на отдельные виды устройств.

2. Агрегатные комплексы технических средств автоматизации

Современные системы автоматизации являются многофункциональными, решаемые ими задачи и условия применения весьма разнообразны, поэтому широкое использование принципов агрегатирования при создании унифицированных технических средств автоматизации, получившее развитие в ГСП, является необходимым условием достижения высокой эффективности автоматизированных систем при массовом их внедрении в промышленность.

Агрегатный комплекс (АК) технических средств измерения, контроля и регулирования - это совокупность изделий, взаимосвязанных между собой по функциональному назначению или области применения, конструкции, основным пара-

метрам и техническим данным, это также совокупность изделий, имеющая технико-экономически обоснованную номенклатуру и обеспечивающая решение функциональных задач, соответствующих ее назначению.

В составе любого АК помимо основных технических средств имеется ряд вспомогательных устройств и комплекс технической документации (рис. 2.4).

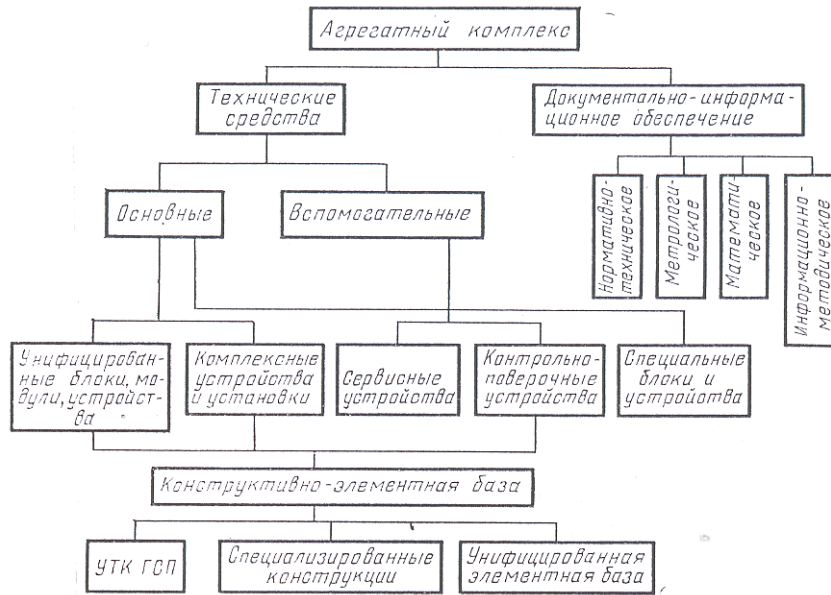


Рис. 2.4. Типовой состав агрегатного комплекса

Технические средства АК разделяются на основные и вспомогательные. Основные ТС используются для построения систем автоматизации либо непосредственно, либо в составе комплексных установок и устройств. В некоторых АК (специализированных АК) унифицированные блоки, модули и устройства не являются эксплуатационно-законченными изделиями и используются только для изготовления комплексных установок и устройств. Вспомогательные ТС предназначены для настройки, поверки, ремонта и временной замены (например, при отладке или проверке АСУ ТП) основных ТС.

В состав документальных средств входят математическое, нормативно-техническое, метрологическое и информационно-методическое обеспечение.

Промышленностью выпускается более 20 АК, объединяющих функциональные устройства получения, сбора, передачи и представления информации, контроля и регулирования процессов, программного управления оборудованием, устройства электроизмерительной, аналитической, вычислительной, испытательной техники и др.

По кругу решаемых задач и универсальности применения АК подразделяются на две группы: широкого применения и специализированные. АК широкого

применения предназначены в основном для решения задач контроля и регулирования, общих для различных АСУ ТП. К ним в первую очередь относятся агрегатный комплекс средств вычислительной техники (АКСВТ), агрегатный комплекс аналоговых электрических средств регулирования (АКЭСР), агрегатный комплекс средств контроля и регулирования дискретными процессами (АСКР-ЭЦ), агрегатный комплекс щитовых электрических средств регулирования («Каскад»), агрегатные комплексы пневмоавтоматики Старт», «Центр», «Цикл») и др.

Специализированные АК предназначены для получения информации, связанной с необходимостью использования сложных физико-химических методов и оборудования. Это агрегатный комплекс средств аналитической техники (АСАТ), агрегатный комплекс средств электроизмерительной техники (АСЭТ) и др.

3. Интерфейсы и сигналы связи

Обмен информацией между различными устройствами, входящими в системы автоматизации различных уровней, осуществляется с помощью интерфейсов и сигналов связи. Понятие «интерфейс», включающее в себя в общем случае и понятие сигнала связи, появилось в связи с широким применением вычислительной техники и кодированных сигналов в системах управления. Интерфейсы обеспечивают передачу информации в обоих направлениях и используются для сопряжения технических средств управляющих вычислительных комплексов (УВК) и других технических средств с кодированными сигналами.

Понятие «сигналы связи» в настоящее время распространяется преимущественно на сопряжение аналоговых устройств или устройств с дискретными выходными сигналами, обеспечивающих передачу информации в одном направлении. К таким устройствам относится большинство средств получения информации и исполнительных механизмов.

Интерфейс представляет собой совокупность единых средств и правил, устанавливающих и реализующих взаимодействие компонентов системы, предназначенной для сбора, переработки и использования информации. С целью обеспечения информационной совместимости ТС интерфейсы унифицируются. В отечественных технических средствах АСУ ТП наибольшее распространение получили интерфейсы 2К, ОШ, ЕИ.

Интерфейс 2К применяется в управляющих вычислительных комплексах М-6000, М-7000, СМ-1, СМ-2 и в МЦК семейства М-40. В нем предусматривается па-

параллельная - синхронная передача информационных слов, содержащих до 16 двоичных разрядов, не регламентируется жесткий порядок обмена информацией в начале и в конце выполнения операции ввода - вывода, допускается двусторонний обмен информацией в одной операции.

Интерфейс типа ОШ используется в УВК М-400, СМ-3, СМ-4. В ОШ асинхронный режим связи позволяет работать с устройствами различного быстродействия и повысить предельную скорость передачи данных по сравнению с синхронным способом, используемым в интерфейсе 2К.

Интерфейсы ЕИ используются в устройствах агрегатных комплексов телемеханической техники (АСТТ), электроизмерительной техники (АСЭТ), средств для локальных систем управления (КТС ЛИУС). Обмен сигналами по интерфейсам ЕИ производится как в асинхронном режиме, так и в синхронном режиме с выдачей из блоков памяти сигнала ответа после выполнения основной операции, для реализации схем интерфейсов применяются стандартные интегральные микросхемы. Конструктивное сопряжение обеспечивается применением для всех интерфейсов стандартизованного разъема. В пределах каждого интерфейса установлен порядок распределения сигналов по контактам разъема. В настоящее время разрабатывается ряд новых интерфейсов на основе международных стандартов и последних достижений техники управления.

Сигналы связи можно рассматривать как простейшую разновидность интерфейса. Они обеспечивают передачу информации в одном направлении (от источника к приемнику) и используются для связи аналоговых устройств управления между собой, для дистанционной передачи результатов измерений от средств получения информации к устройствам контроля и управления, а также для передачи управляющих сигналов на исполнительные механизмы.

Унифицированным сигналом связи называется такой сигнал, у которого вид носителя информации и диапазон его изменения не зависят от вида измеряемой величины и метода измерения и являются одинаковыми для различных датчиков и диапазонов изменения их входных величин. Обычно унифицированные сигналы получаются в результате преобразования и нормирования сигналов первичных измерительных преобразователей с помощью встроенных или внешних нормирующих преобразователей.

Параметры сигналов связи, рекомендуемых для использования в промышленных приборах и средствах автоматизации, регламентируются соответствующими ГОСТами.

Управление цифровых образовательных технологий

При проектировании систем автоматизации широкое распространение получили электрические сигналы связи благодаря их существенным достоинствам, важнейшими из которых являются высокая скорость передачи сигнала, дешевизна и простота прокладки линий связи, большая дистанционность, универсальность и доступность источников энергии.

Пневматические сигналы связи применяются там, где не требуется быстрое действие, но имеются ограничения пожаро- и взрывобезопасности.

Гидравлические унифицированные сигналы применяются в гидравлических следящих системах и устройствах управления гидравлическими исполнительными механизмами.

Из электрических сигналов наибольшее распространение получили унифицированные сигналы постоянного тока и напряжения. Они используются как для дистанционной передачи информации от средств получения информации к устройствам управления и от них к исполнительным устройствам, так и для обмена информацией устройств управления между собой.

В значительно меньшей степени применяются сигналы переменного напряжения частотой 50 Гц (в ферродинамической системе приборов). Частотные сигналы используются главным образом в телемеханической аппаратуре и в комплексе приборов КТС ЛИУС, где применяется сигнал с изменением частоты от 4 до 8 кГц.

Сигнал взаимной индуктивности применяется в измерительных преобразователях теплоэнергетических параметров в связи с тем, что дифтрансформаторный преобразователь прост по конструкции, надежен и устойчив к воздействию окружающей среды.

Импульсные сигналы с дискретным изменением параметра применяются для передачи информации от сигнализирующих измерительных преобразователей, для контроля состояния различных двухпозиционных устройств, а также для передачи командных сигналов типа «включить - выключить». В основном применяется импульсный сигнал постоянного тока с амплитудами 0 и 10 В.

Кодированные сигналы используются преимущественно для обмена информацией между различными цифровыми устройствами обработки информации, входящими в состав управляющих вычислительных комплексов и информационно-измерительных систем.

Наряду с унифицированными сигналами, вид и параметры которых не зависят от измеряемой величины и метода ее измерения, стандартами ГСП допускается использование и так называемых естественных сигналов. Естественным сигналом называется сигнал первичного измерительного преобразователя, причем вид и диапазон изменения сигнала определяются физическими свойствами преобразователя и диапазоном изменения измеряемой величины. Обычно в качестве естественных используются электрические выходные сигналы первичных измерительных преобразователей, которые просто могут быть переданы на некоторое расстояние. Например, сигналы от термоэлектрических преобразователей температуры, термопреобразователей сопротивления, тензодатчиков и др.

Использование унифицированных сигналов связи и интерфейсов является необходимым условием, обеспечивающим информационную совместимость различных технических средств в системах автоматизации. Полная информационная совместимость технических средств достигается путем применения так называемых межсистемных преобразователей сигналов связи и интерфейсов.

4. Средства получения информации

К средствам получения информации о технологическом процессе относятся устройства, непосредственно взаимодействующие с контролируемым объектом или веществом и формирующие выходной сигнал, соответствующий измеряемому параметру. Большое разнообразие средств получения информации определяется, прежде всего, разнообразием параметров технологических процессов, которые необходимо измерять. В настоящее время имеется необходимость в измерении более чем двух тысяч наименований параметров технологических процессов.

Средства получения информации обычно устанавливаются непосредственно на контролируемом объекте. Вид измеряемого параметра, диапазон его изменения, требования к точности, надежности, стоимости, условия монтажа и эксплуатации на конкретном объекте предъявляют жесткие и часто противоречивые требования к конструкции указанных средств. Поэтому для измерения одного и того же параметра существует большое количество средств получения информации различных типов. Так, например, отечественной промышленностью для измерения температуры выпускается около 200 наименований изделий, для измерения давления — более 120 наименований и т. д.

По видам измеряемых параметров средства получения информации разделяются на пять групп:

Управление цифровых образовательных технологий

- средства измерения теплоэнергетических (общетехнических) параметров, к которым относятся температура, давление (в том числе абсолютное, избыточное, вакуумметрическое), перепад давления, уровень, расход, электроэнергетические параметры (напряжение, ток, мощность и другие параметры, характеризующие производство и потребление электроэнергии);
- средства получения информации о химическом составе и свойствах веществ, включая средства для отбора и подготовки пробы;
- средства получения информации о физических свойствах вещества (в том числе о физико-механических, электрофизических, теплофизических) и качестве продукции;
- средства измерения кинематических величин, в том числе средства измерения числа единиц изделий, циклов, а также параметров вибрации и акустического шума;
- средства измерения сил, масс, весоизмерительные и весодозировочные устройства.

По способу представления результатов измерения средства получения информации подразделяются на ряд групп, как показано на рис. 2.5.

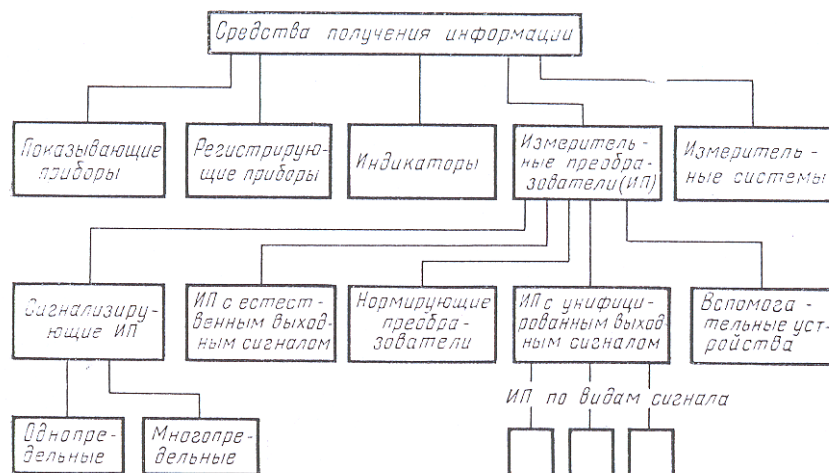


Рис. 2.5. Классификация средств получения информации по способу представления результатов измерений

Индикаторы, показывающие и регистрирующие приборы, не имеющие сигналов связи, непосредственно не предназначены для использования в системах автоматизации. Тем не менее, в ряде случаев их включают в системы для визуального контроля параметров по месту, а также в качестве вспомогательных (особенно при настройке и пуске объектов) и резервных.

Сигнализирующие измерительные преобразователи (ИП), так же как и индикаторы, срабатывают при достижении контролируемым параметром заранее заданного значения, однако в отличие от последних они имеют дискретный выходной сигнал, который может быть передан другому устройству. Чаще всего таким сигналом является замыкание электрических контактов. ИП с естественным или унифицированным сигналом имеют непрерывный или дискретный выходной сигнал, шаг квантования которого сравним с погрешностью измерения. Непрерывные сигналы дают наиболее полную информацию о параметре и могут применяться для реализации всех задач автоматизации. С точки зрения построения систем автоматизации наиболее удобен унифицированный сигнал связи.

Температура, давление и перепад давления жидких и газообразных сред, расход, уровень, параметры электрической энергии, объединяемые под общим названием «теплоэнергетические параметры», являются физическими величинами, которые чаще всего необходимо контролировать и регулировать в технологических процессах непрерывного и непрерывно-дискретного характера. Поэтому методы измерения этих параметров, конструкции соответствующих приборов и ИП хорошо отработаны, а их номенклатура достаточно обширна.

Средства измерений температуры. Методы, используемые для построения промышленных средств измерений температуры, и основные характеристики соответствующих приборов приведены в табл. 2.1. Распределение измерительных преобразователей температуры по видам объектов и принципам измерений приведено в табл. 2.2.

Для измерения контактным способом температуры жидких и газообразных сред, а также поверхностей изделий, технических устройств и установок наибольшее распространение в системах автоматизации получили ИП на основе терморезисторных и термоэлектрических методов. ИП этих видов просты по конструкции, надежны, недороги. Их выходной сигнал имеет небольшую величину и без дополнительных преобразований может передаваться на несколько десятков и даже сотен метров.

Таблица 2.1

Методы измерения температуры, используемые в технических средствах

Наименование вида средств измерений	Величина, характеризующая температуру	Диапазон измерений, °C	Класс точности или погрешность верхний нижний
Терморезистивные	Сопrotивление чувствительного элемента	—260...600	Класс 1,0 Класс 2,0
Термоэлектрические	Термо-ЭДС в спаяе металлов	—200...2500	$\pm 0,2$ мВ для $t < 300^\circ\text{C}$ $0,2 + 0,0006(t - 300)$ мВ для $t > 300^\circ\text{C}$
Манометрические	Давление в замкнутом объеме	—50...600	1,0 4,0
Радияционные	Фото-ЭДС, фотосопrotивление, яркость свечения эталона	20...6000	1,5 4,0
Дилатометрические	Изменение длины твердого тела	—30...100	1,5 4,0
Биметаллические	Деформация пластины из разнородных металлов	—30...50	$\pm 1^\circ\text{C}$ $\pm 2,5^\circ\text{C}$

Таблица 2.2

Распределение измерительных преобразователей температуры по видам объектов и принципам измерений

Объект измерений	Принцип измерения				
	терморезистивный	термоэлектрический	манометрический	дилатометрический	биметаллический
Вакуум	+	+	—	—	—
Газы	+	+	+	—	+
Газообразные и жидкие среды	+	+	+	+	—
Жидкости	+	+	+	+	+
Поверхность твердых тел	+	+	—	—	—
Агрегаты и установки	+	+	+	+	+

Примечание. Знаком «+» отмечено применение преобразователя, знаком «—» — неприменение.

Отечественной промышленностью выпускается около 50 типов термопреобразователей сопротивления (термометров сопротивления) из медной (ТСМ) и платиновой (ТСП) проволоки. С помощью платиновых термопреобразователей измеряют температуру в диапазоне от — 260 до +600° С, с помощью медных — от — 50 до +180°С. Они выпускаются двух модификаций — одинарные и двойные. В двойном в общую арматуру вмонтированы два чувствительных элемента, электрически не связанные между собой. Каждый чувствительный элемент имеет пару зажимов в головке термопреобразователя.

Двойной термопреобразователь сопротивления предназначен для работы с двумя вторичными приборами, параллельная работа которых от одного чувствительного элемента не допускается.

Основные требования, обеспечивающие правильность выбора и нормальную работу термопреобразователя сопротивления: соответствие измеряемой температуры пределам измерения; правильный выбор места установки; соответствие прочности и материала арматуры условиям эксплуатации; правильный выбор длины монтажной части.

Для измерения температуры контактным способом, особенно в области высоких температур, предназначены термоэлектрические преобразователи температуры (термопары). Выпускается более 50 типов термоэлектрических преобразователей для измерения температуры от -200 до 2500°C , причем для высоких температур при кратковременном погружении в измеряемую среду.

В большинстве конструкций промышленных термопреобразователей температуры предусматриваются наружные металлические, керамические, металлокерамические защитные трубки с закрытым концом. Во многих случаях защитный чехол должен предохранять термоэлектроды от вредного воздействия измеряемой среды. Материал защитной трубки-чехла должен выдерживать длительное пребывание при температуре верхнего предела применения данной конструкции термоэлектрического преобразователя.

Термоэлектрические преобразователи изготавливают без чехла, со стальным чехлом (до 600°C), с чехлом из специального жаростойкого сплава (до 1100°C), с фарфоровым чехлом (до 1300°C), с чехлом из оксида алюминия (до 1600°C). По способу крепления преобразователи выпускаются с неподвижным штуцером и с подвижным фланцем, по инерционности они подразделяются с большой (до 3,5 мин), средней (до 1 мин), малой (до 40 с) и ненормированной (более 3,5 мин) инерционностью.

Выпускаются стандартные термоэлектрические преобразователи температуры с термоэлектродами из благородных и неблагородных металлов и сплавов: хромель-алюмелевые (ТХА), хромель-копелевые (ТХК), платинородий-платиновые (ТПП), платинородий-платинородиевые (ТПР), вольфрамовый-вольфрамовые (ТВР).

По диапазону измеряемых температур термоэлектрические термопреобразователи условно делят на устройства для измерения низких, средних и высоких температур.

Низкие температуры вплоть до точки кипения водорода измеряют медь-константовыми термопреобразователями, которые имеют высокую стабильность, и

воспроизводимость результатов во времени, причем они сохраняют свою градуировку лучше, чем термометры, подвергающиеся действию высоких температур, вызывающих физические и химические изменения в термоэлектродах. Для измерения низких температур можно также использовать термопреобразователи, применяемые обычно для измерения более высоких температур, например хромель-алюмелевые, хромель-копелевые.

Для измерения средних температур наиболее подходящими являются термоэлектрические преобразователи градуировок ХИ, ХА, ПП и ПР.

Наиболее надежными в настоящее время являются платинородий-платиновые термометры. Наиболее стабильные термоэлектрические свойства имеют термоэлектрические преобразователи на основе вольфрама, рения и их сплавов. Они надежны при измерении температуры до 2200°C в вакууме, водороде и инертной атмосфере.

Манометрические методы измерения температуры применяются в показывающих и регистрирующих приборах и в измерительных преобразователях с унифицированными выходными сигналами. Манометрические термометры являются механическими приборами прямого измерения, предназначенными для дистанционного измерения температуры газов, паров и жидкостей в стационарных условиях. Манометрические термометры характеризуются возможностью дистанционного измерения температуры без использования дополнительной энергии, простотой конструкции и надежностью в эксплуатации, равномерной шкалой, взрывобезопасностью, нечувствительностью к внешним магнитным полям. Дистанционность измерений определяется длиной капилляра, максимальная величина которой для приборов разных типов составляет 16 ... 40 м.

В зависимости от заполнителя термосистемы в вашей стране изготавливаются газовые, жидкостные и конденсационные манометрические термометры.

Достоинствами газовых термометров являются относительная простота заполнения термосистемы, сравнительно малая температурная погрешность и наибольшая длина соединительного капилляра. Достоинством жидкостных термометров являются малые инерционность и размеры термобаллона, что позволяет устанавливать термобаллон в трубопроводах разного диаметра. Достоинствами конденсационных термометров являются небольшая температурная погрешность при изменении температуры окружающей среды и сравнительно малые размеры термобаллона.

Дилатометрические и биметаллические преобразователи, имеющие простую конструкцию и высокую надежность, применяются в основном в качестве сигнализирующих ИП.

В качестве бесконтактных средств измерений температуры применяются различные устройства, принцип действия которых основан на бесконтактных методах измерения температуры (оптических, ультразвуковых, радиометрических). Наиболее распространены оптические методы измерения температуры (с помощью пирометров). Для них характерны следующие особенности:

отсутствие контакта с измеряемой средой и практически неограниченный верхний предел измерений, что позволяет использовать их в случаях, когда не может быть обеспечена долговременная работоспособность контактных термопреобразователей;

высокое быстродействие;

отсутствие влияния пирометра на температурное поле исследуемого объекта;

возможность измерения температуры подвижных объектов.

Вместе с тем при использовании пирометров могут возникнуть существенные методические погрешности. Дело в том, что излучение теплоты не всегда позволяет судить об истинной температуре измеряемого тела. Чаще всего пирометры излучения дают какую-либо условную температуру – яркостную, цветовую, радиационную и т. д., равную термодинамической температуре лишь для так называемого абсолютно черного тела. Кроме того, на результаты измерений пирометров сильное влияние оказывает промежуточная газовая среда, особенно при наличии в ней пыли и дыма.

В качестве приемников излучения в современных пирометрах используются термоэлектрические, фотовольтаические, болометрические, фоторезистивные, пироэлектрические и другие элементы.

В зависимости от номинального показателя визирования пирометры подразделяются на широко- и узкоугольные. У широкоугольных показатель визирования более $1/16$, а у узкоугольных - $1/16$ и менее.

В зависимости от времени установления показаний пирометры бывают:

- малоинерционные - со временем установления показаний до 0,5 с (на уровне 98% установившегося значения);
- средней инерционности - со временем установления показаний до 2 с;
- большой инерционности - со временем установления показаний более 2с.

Промышленность выпускает несколько типов пирометров излучения и первичных преобразователей для них. Пирометрические преобразователи устанавливаются на объекте с помощью подставок, поворотных головок, установочных фланцев и других вспомогательных устройств. Некоторые виды монтажно-защитной арматуры поставляются потребителю по согласованию с заводом-изготовителем. Для специальных условий монтажа такая арматура должна разрабатываться проектной организацией самостоятельно. Для наводки на объект некоторые пирометрические преобразователи имеют встроенные визирные устройства, другие преобразователи наводятся с помощью визирных устройств, входящих в состав монтажного комплекса.

Средства измерения давления, перепада давления и разрежения. Давление и разрежение жидкостей, газов и паров является важным параметром, характеризующим их физическое состояние, а также ход многих технологических процессов. Измерение давления (разрежения) в ряде случаев является важнейшим показателем подачи и перекачки исходного сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Перепад давления представляет интерес как параметр, характеризующий непосредственно ход некоторых технологических процессов, чаще же всего приборы для его измерения используются как вторичные устройства, предназначенные для определения расхода газообразных и жидких продуктов по методу переменного перепада давления.

Номенклатура измерительных устройств, выпускаемых отечественным приборостроением, практически полностью удовлетворяет потребности различных отраслей в приборах этой группы. Подразделяются они по принципу измерения на две большие группы:

- 1) с упругими чувствительными элементами, или деформационные, в том числе с трубчатой манометрической пружиной, сильфонные и мембранные;
- 2) жидкостные, в том числе с непосредственным отсчетом и поплавковые, кольцевые, колокольные.

Для измерения глубокого вакуума применяются также ионизационные приборы.

Сравнительные характеристики различных типов чувствительных элементов измерительных устройств давления, разрежения и перепада давления приведены в табл. 2.3 и 2.4.

Приборы некоторых типов для измерения давления, перепада давления и разрежения снабжаются вспомогательными устройствами, обеспечивающими их использование в системах автоматического контроля, сигнализации, регулирования и управления. Приборостроением выпускаются приборы без отсчётных устройств с электрическим или пневматическим выходным сигналом; приборы с отсчетным устройством, показывающие и самопишущие без выходных сигналов; приборы с отсчетным устройством и с электрическим или пневматическим сигналом; приборы с отсчетным и сигнализирующим или регулирующим устройством и т. п.

Таблица 2.3

Чувствительные элементы средств измерения давления

Наименование	Величина, характеризующая давление	Диапазон измерений	Класс точности
			верхний нижний
Пружинные	Деформация манометрической пружины	—0,1 ... 1000 МПа	0,6 1,0
Сильфонные	Деформация сильфона	—0,1 ... 60 МПа	0,25 1,5
Мембранные	Деформация мембраны	—0,01 ... 2,5 МПа	1,0 2,5
Ионизационные	Параметры потока заряженных частиц в вакууме	Вакуум ниже 10 Па	—

Таблица 2.4

Чувствительные элементы средств измерений перепада давления

Наименование	Величина, характеризующая перепад давления	Диапазон измерений (верхние пределы)	Допустимое абсолютное давление, МПа	Класс точности
				верхний нижний
Сильфонные	Деформация сильфонов	100 Па ... 160 кПа	40	0,6 2,5
Мембранные: с упругой мембраной	Деформация мембраны	630 Па ... 16 кПа	1	1,0 1,5
с вялой мембраной	Усилие на мембране	100 Па ... 16 кПа	1	1,0 1,5
Поплавковые	Перемещение поплавка	100 Па ... 100 кПа	25	1,0 2,5
Кольцевые	Поворот корпуса весов	63 Па ... 16 кПа	0,1	1,5

Условия эксплуатации большинства приборов, выпускаемых промышленностью, определяются температурой окружающей среды от – 50 до +50 (60)° С, относительная влажность при температуре от – 50 до +35°С — не более 95%, при температуре от 35° до 50 (60)°С — до 80%, для усилителя также до 80%. Самопишущие,

сигнализирующие приборы предназначены для использования при температуре окружающей среды от +5 до +50° С и относительной влажности до 80%. При эксплуатации приборов некоторых типов (специальные, образцовые, сверхвысокого давления и др.) предъявляются требования, несколько отличающиеся от указанных выше. Они приводятся в соответствующих технических данных.

Питание электрических приборов осуществляется от сети переменного тока 220 В, частотой 50 Гц, кроме некоторых специальных приборов и приборов взрывозащищенных типов. Питание пневматических приборов предусмотрено чистым и сухим сжатым воздухом давлением $0,14 \pm 0,02$ МПа.

Для повышения стойкости чувствительных элементов давления и перепада давления к влиянию измеряемой среды используются разделительные сосуды и мембраны, с помощью которых давление от измеряемой среды передается к чувствительному элементу через нейтральную среду. В качестве вторичных преобразователей для упругих чувствительных элементов давления и перепада давления могут использоваться одни и те же передающие, показывающие и регистрирующие измерительные устройства.

По методу преобразования сигнала чувствительного элемента вторичные преобразователи делятся на компенсационные и преобразователи прямого измерения. В качестве выходных сигналов в преобразователях используются электрические и пневматические унифицированные сигналы ГСП.

Измерительные электрические и пневматические преобразователи, основанные на принципе силовой компенсации, обладают высокой точностью (не менее 0,5%), повышенной чувствительностью (порядка 0,05%), возможностью охвата нескольких пределов измерения без замены деталей и узлов (1:10), высокой степенью конструктивной унификации. Благодаря широкому охвату глубокой отрицательной обратной связью большинство функциональных звеньев прибора (индикатор рассогласования, усилительное устройство, рычажный механизм) существенно не влияют на точность преобразования. Однако, вследствие наличия рычажно-передающего механизма ИП с силовой компенсацией, эти преобразователи имеют повышенную чувствительность к вибрации и тряске, большие габаритные размеры и массу, сложную конструкцию. Кроме того, наличие подвижных масс не позволяет существенно повысить их динамические характеристики (время установления выходного сигнала не менее 0,5 с и полоса пропускания частот не более 5 Гц). Номен-

клатура ИП давления и перепада давления с силовой компенсацией довольно обширна. В ее состав входят электрические обычные и взрывозащищенные ИП, а также пневматические, применяемые чаще для особо агрессивных сред.

Принцип действия ИП с магнитной компенсацией основан на преобразовании перемещения упругого чувствительного элемента под действием измеряемого перепада в токовый сигнал с помощью магнитомодуляционного преобразователя с компенсацией магнитных потоков. Измерительные преобразователи, основанные на принципе компенсации магнитных потоков, отличаются сравнительно высокой точностью измерения ($\pm 0,5$ и $\pm 1\%$), малой чувствительностью к вибрации и тряске, простотой конструкции, малыми размерами и массой. ИП с компенсацией магнитных потоков отличаются повышенной надежностью — вероятность безотказной работы в течение 2000 ч не менее 0,97. Недостатками ИП этого вида являются несколько ограниченная точность, повышенные требования к качеству изготовления чувствительных элементов.

При использовании вторичных преобразователей прямого измерения, к которым относятся дифференциально-трансформаторные и полупроводниковые тензометрические, чувствительный элемент преобразует давление или перепад давления в пропорциональное им перемещение, которое измеряется вторичным преобразователем. Дифференциально-трансформаторные преобразователи отличаются простотой конструкции, устойчивостью к механическим воздействиям, надежностью.

Одним из наиболее перспективных является тензометрический метод измерения деформации чувствительного элемента в ИП давления и перепада давления. Суть тензометрического метода измерения заключается в непосредственном преобразовании деформации манометрического элемента или связанного с ним упругого элемента в изменение электрического сопротивления тензорезисторов, закрепленных на одном из указанных элементов. Это изменение сопротивления тензорезисторов преобразуется электрической измерительной схемой в электрический сигнал.

Промышленностью выпускается большое количество приборов для измерения давления и перепадов давлений в широком диапазоне измерений от $-0,1$ до 1000 МПа и выше, предназначенных для использования в различных условиях применения в эксплуатации.

Средства измерения расхода жидкостей, газа, пара и счета единиц продукции. Измерение расхода и объема жидких продуктов, газов и паров широко применяется для товароучётных и отчётных операций, а также для контроля, регулирования и управления ходом технологических процессов. Оптимальное ведение многих технологических процессов основано на смешивании различных компонентов, входящих в состав изготавливаемого целевого продукта, в строго определенных соотношениях, что может быть обеспечено измерением их количества.

Приборы для счета единиц изделий продукции широко используются для оценки производительности оборудования, а также при подсчете суммарного выпуска готовой продукции в виде отдельных единиц.

Для измерения расхода чистых жидкостей, газа и пара по принципу переменного перепада давления широко применяются дифференциальные манометры. Первичным измерительным преобразователем в этих расходомерах являются сужающие устройства, чаще всего нормальные диафрагмы и сопла, устанавливаемые в трубопроводах, по которым протекает измеряемый агент. Эти устройства обеспечивают измерение практически во всем диапазоне расходов, характерном для различных производств.

В табл. 2.5 приведены сведения о расходомерах, применяемых для измерения расхода чистых жидкостей. В основу устройства этих расходомеров положены различные принципы действия.

В настоящее время широко применяются электромагнитные (индукционные) расходомеры жидкостей, в которых отсутствуют подвижные части, что обеспечивает измерение практически без потерь энергии движущегося потока. Электромагнитные расходомеры широко используют для измерения расхода невзрывоопасных электропроводящих жидкостей с электропроводностью не ниже 10^{-3} См/м. Диапазоны измерения расходомеров от 0,32 до 2500 м³/ч для измерения небольших расходов жидкостей и газов (по воде – от 0,0025 м³/ч, по воздуху – от 0,063 м³/ч) могут применяться расходомеры постоянного перепада давлений, называемые *ротаметрами*.

Таблица 2.5

Измерительные преобразователи расхода жидкостей

Характеристика	Диапазоны измерения, м³/ч	Класс точности	Измеряемая среда	Диаметр условного прохода, мм	Условное давление, МПа
Приборы с выходным сигналом:					
0—5 мА	0,32 ... 2500	1,0; 1,6	Электропроводная жидкость	10 ... 1000	4
0—10 мГц	0,05 ... 4	2,5; 5,0	Вязкая жидкость, пар, газ	14 ... 700	4
Приборы, обеспечивающие:					
показание и сигнализацию	0,05 ... 4	1,0; 1,5; 2,0	Вязкая жидкость, вода, воздух	30	1
показание	0,04 ... 300	1,0; 1,5; 2,0; 3,0	Вязкая жидкость, пар, газ	14 ... 700	4

Ротаметры выпускаются в виде указывающих местных приборов или в виде бесшкальных устройств с дистанционной электрической или пневматической системой передачи показаний на расстояние. Ротаметры применяются для измерения расхода однородных чистых или слабозагрязненных жидкостей и газов. Возможно их использование при наличии в измеряемой среде дисперсных включений.

Многие продукты выпускаются в виде единичных изделий, расфасованных или нерасфасованных, подсчет которых должен быть автоматизирован. Часто встречается также необходимость подсчета единиц готовой продукции или полуфабрикатов при передаче их от одного производства к другому. Для счета единиц готовой продукции применяются устройства счета продукции –счётчики, основанные на использовании различных принципов измерения. Широкое распространение получили механические счетчики, в которых в качестве чувствительных элементов применяются подвесные заслонки или лепестки, звездочки, турникеты, а также другие элементы, воздействующие на управляющие электрические или механические контакты один раз в течение рабочего цикла. Находят применение также счётчики фотоэлектрические, в которых воздействие от фиксируемой единицы воспринимается чувствительным элементом – фотоэлектрической головкой; вибрационные, фиксирующие вибрацию станины оборудования при изготовлении изделия; гидравлические, воспринимающие сигналы от блоков гидравлики основного оборудования, и др.

В радиоизотопных приборах счетное устройство представляет собой источник и приемник радиоактивного излучения, срабатывающее при прохождении отсчитываемого изделия между ними. Ёмкость различных счётчиков от 10^3 до 10^6 импульсов, скорость счета от 0,2 до 100 единиц/с. В ряде случаев производительность оборудования фиксируется с помощью счётчиков оборотов.

Средства измерений уровня. Средства измерений уровня по способу измерений делятся на устройства прямого измерения и следящие устройства. В устройствах прямого измерения значение выходного сигнала изменяется в зависимости от уровня измеряемого вещества в соответствии с характеристикой чувствительности элемента. В следящих средствах измерений уровня чувствительный элемент используется в качестве нуля-органа, управляющего следящей системой, которая обеспечивает перемещение чувствительного элемента по высоте объекта измерения. Устройства этого типа обеспечивают высокую точность в широком диапазоне измерений уровня, однако содержат подвижные элементы и обладают рядом связанных с этим недостатков.

Из большого числа методов измерения уровня (табл. 2.6) наибольшее распространение получили механический, гидростатический, акустический, электрический, радиоинтерференционный и радиационный методы. Отечественным приборостроением выпускается большая номенклатура уровнемеров (более 100 типов), обеспечивающих измерение и сигнализацию уровня различных жидких и сыпучих сред в диапазоне от 0 до 16 м с точностью до 1%.

Механические средства измерения уровня отличаются простотой конструкции, широким диапазоном измерения и высокой точностью (в случае применения следящего способа измерения). Из механических средств измерений уровня в номенклатуре выпускаемых изделий наибольший удельный вес приходится на дифманометрические, поплавковые и буйковые.

Таблица 2.6

Методы измерения уровня

Управление цифровых образовательных технологий

Разновидность метода	Диапазон измерения, м	Условия эксплуатации		Контролируемые среды
		температура, °C	давление среды, МПа	
Механический метод				
Поплавковый	0 ... 20	—50 ... 100	0,003 ... 20	Однородные невязкие неналипающие жидкости
Буйковый	0 ... 16	—200 ... 400	32	Однородные невязкие нескристаллизирующиеся и неналипающие жидкости
Контактно-механический Дифманометрический	0 ... 13	≤ 60	1,6	Сыпучая и кусковая однородная среда
	0 ... 10	≤ 200	32	Однородные жидкости, не дающие осадка
Электрический метод				
Кондуктометрический	0 ... 2,5	5 ... 100	Атмосферное	Водные растворы солей и кислот с примесями и механическими загрязнениями
Емкостный	0 ... 20	—40 ... 200	6,4	Электропроводные жидкости, порошки с диэлектрической проницаемостью от 2 до 20
Индукционный	0 ... 5	400	10	Электропроводные невязкие жидкости, в том числе расплавленные металлы
Резонансный	0 ... 30	—100 ... 250	6,4	Электропроводные и диэлектрические жидкости, диэлектрические сыпучие и кусковые материалы
Волновой метод				
Радиоинтерференционный Звуколокационный	0 ... 5	≤ 400	10	Электропроводные жидкости и порошки
	0 ... 3	≤ 100	4	Невспенивающиеся жидкости
Радияционный метод				
Радиоизотопный	0 ... 30	≤ 1000	4	Любые вещества, прозрачность которых по отношению к излучению существенно отличается от прозрачности среды
Рентгеновский	0 ... 30	≤ 1000	4	

Дифманометрические уровнемеры просты по конструкции, но пригодны только для измерения уровня жидкостей. Существенное влияние на их точность оказывает зависимость плотности контролируемой среды от различных факторов. Они не могут применяться для измерения уровня неоднородных жидкостей, в том числе жидкостей, дающих значительный осадок. В качестве дифманометрических уровнемеров могут применяться рассмотренные выше ИП перепада давления с равномерной шкалой.

В поплавковых следящих уровнемерах перемещение поплавка, плавающего на поверхности жидкости, преобразуется в перемещение мерной ленты, которая сматывается с барабана под действием массы поплавка. При обратном перемещении поплавок лента наматывается на барабан под действием пружины. Угол поворота барабана преобразуется в показание счётчика оборотов или в сигнал дистанционной передачи.

Уровнемеры выпускаются на диапазоны измерения 0...12 и 0...20 м. Они позволяют измерять уровень жидкостей в диапазоне температуры от – 50 до 100°C при избыточном давлении до 20 МПа. Погрешность измерения мало зависит от температуры и плотности жидкостей и составляет 1 мм без снятия статического момента трения и 4 мм в случае снятия этого момента.

Буйковые уровнемеры входят в унифицированную систему средств измерения теплоэнергетических параметров с силовой компенсацией. В них усилие, уравновешивающее выталкивающую силу буйка, создается электросиловым или пневмосиловым унифицированным преобразователем. Эти уровнемеры позволяют измерять уровень некристаллизующихся, невязких, однородных и не выпадающих в осадок жидкостей с плотностью 600—2500 кг/м³. Верхние диапазоны измерений уровнемеров – от 0,02 до 16 м. Температура контролируемой среды — от – 200 до 400°C в зависимости от модификации.

В уровнемерах, построенных на радиационных методах измерений, используется явление изменения мощности излучения, проходящего через резервуар от источника к приемнику, при наличии или отсутствии контролируемого вещества. В зависимости от вида используемого излучения они подразделяются на радиоизотопные и рентгеновские. Важным достоинством данных параметров является универсальность по контролируемой среде и отсутствие необходимости нарушать целостность резервуара.

Кондуктометрический и ёмкостный уровнемеры используют зависимость проводимости чувствительного элемента от уровня контролируемой среды. Такие уровнемеры предназначены для контроля жидкостей с определенными электрическими параметрами и имеют ограниченное применение. Более универсальными являются электронные индикаторы уровня, предназначенные для непрерывного дистанционного измерения уровня жидких в сыпучих электровзрывоопасных, вязких, плёнообразующих, кристаллизующихся, выпадающих в осадок жидкостей и сы-

пучих сред с величиной гранул не более 5 мм. Выпускаются модификации, устойчивые к плесневым грибам, морскому туману, влагоустойчивые, выдерживающие вибрационные нагрузки.

Одной из наиболее универсальных систем ИП-уровня является система унифицированных высокочастотных резонансных измерителей и сигнализаторов уровня жидких и сыпучих сред. Сущность резонансного метода состоит в использовании зависимости различных интегральных характеристик электромагнитных систем с распределёнными параметрами (резонансной частоты, выходного импеданса, фазы, числа резонансных импульсов, времени отражения от неоднородностей) от измеряемых величин.

Система включает в себя уровнемеры и сигнализаторы уровня следующего назначения:

- аналоговые и цифровые уровнемеры для жидких электропроводных сред (водных растворов солей, кислот, щелочей, не дистиллированной воды и т. п.);
- аналоговые и цифровые уровнемеры для жидких диэлектрических сред (нефти и нефтепродуктов, масел, спиртов, аммиака, ацетона и т. п.);
- уровнемеры для сыпучих сред;
- сигнализаторы уровня жидких и сыпучих сред.

Работа измерителей и сигнализаторов уровня системы основана на радиоволновом резонансном методе, использующем эффект изменения резонансной частоты высокочастотных колебательных систем с распределёнными электромагнитными параметрами (отрезков длинных линий, плоских спиралей с распределенной межвитковой ёмкостью и т. п.), помещенных в рабочую зону, от контролируемого параметра. Для системы характерны:

- конструктивная простота и высокая надёжность первичных преобразователей;
- повышенная точность измерения;
- расширенные эксплуатационные возможности, обусловленные взрывобезопасностью в агрессивных средах, значительной дистанционностью;
- высокая степень универсальности измерителей и сигнализаторов уровня по отношению к электромагнитным свойствам контролируемых сред.

Каждый измеритель системы состоит из первичного преобразователя, монтируемого на ёмкости или агрегате с рабочей средой, электронного блока, предназначенного для щитового монтажа внутри помещения, и кабеля, соединяющего

первичный преобразователь с электронным блоком. Приборы имеют обыкновенное, виброустойчивое и брызгозащищённое исполнение.

Средства получения информации о составе и свойствах веществ. Средства измерений данной группы характеризуются значительным многообразием измеряемых величин, инструментальных методов и конструктивного исполнения. В подавляющем большинстве они представляют собой сложные измерительные системы, в которые входят различные специальные блоки и устройства (связанные с отбором, подготовкой и перемещением пробы), анализаторы и др.

Многие из измерительных устройств, например средства измерений химического состава по значению электрической проводимости или солесодержания жидких сред, являются универсальными. Такие устройства можно успешно использовать в самых разнообразных промышленных условиях для измерения концентрации различных веществ.

Существенное значение для качества и надёжности измерения состава и свойств в промышленных условиях имеют совершенные устройства пробоотбора и пробоподготовки. Зачастую именно эти устройства определяют ценность и достоверность получаемой информации, а иногда и возможность применения измерительных устройств в конкретных условиях. В первую очередь это относится к измерениям в производственных условиях запыленных газов, кристаллизующихся жидкостей, пульп с большим количеством механических примесей и т. п.

Средства получения информации о химическом составе и свойствах вещества включают в себя средства определения химического состава и свойств газов, жидкостей, твердых веществ, а также вспомогательные устройства и набор технических средств для построения промышленных систем газового анализа (САГА).

Общие сведения о методах, используемых в общепромышленных средствах измерений состава и свойств вещества, приведены ниже. Для измерения состава газовых сред применяют методы механический, термокондуктометрический, термохимический, магнитный, электрохимический, поглощения инфракрасного излучения, фотоколориметрический, сорбционный (хроматографический).

Для измерения состава жидких сред применяют методы кондуктометрический, диэлькометрический, потенциометрический, фотометрический, рефрактометрический, поляриметрический.

Для измерения свойств жидких сред применяют методы механический, гидростатический, радиоизотопный, ультразвуковой.

Для определения состава твёрдых и сыпучих сред применяют методы механический, кондуктометрический, диэлькометрический, магнитный, теплопроводности, ультразвуковой, рентгеновский.

Основные характеристики выпускаемых приборостроением средств измерений состава газа приведены в табл. 2.7, а средств измерений состава жидкостей — в табл. 2.8.

Следует отметить, что группа приборов для анализа состава и свойств веществ, выпускаемых отечественным приборостроением, хотя и многочисленна, однако весьма слабо обеспечивает потребности различных отраслей промышленности в этих измерениях. Особенно это относится к измерениям плот-

Таблица 2.7

Характеристика средств измерений химического состава газов

Определяемое вещество	Диапазон измерения, %	Основная погрешность, %
Водород	0 ... 0,3; 4; 6 0 ... 1; 2; 3; 5; 10	$\pm 4,0$; ± 15 $\pm 2,5$; ± 4 ; ± 10
Кислород	20; 60; 100 0 ... 0,5; 1; 2; 5; 10; 21; 50; 80; 100	$\pm 0,25$; ± 3 ; ± 5 ; ± 10
Диоксид углерода	0 ... 10; 20; 30; 40	$\pm 2,5$
Оксид углерода	0 ... 40; 80; 400 мг/м ³ *	± 5 ; ± 10
Аммиак	0 ... 10	$\pm 0,4$
Углеводороды и их изомеры	0 ... 100	—
Газовая смесь: CO + CO ₂ + CH ₄ (в присутствии O ₂ и H ₂)	0 ... 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2,5; 10; 20; 30; 50; 70; 100	$\pm 2,5$; ± 5
CO + CO ₂ + H ₂ (отходящие газы печей)	CO 0 ... 0,4 CO ₂ 0 ... 0,3 H ₂ 0 ... 20	$\pm 2,5$; ± 5 ; ± 10
CO + CH ₄ (в присутствии O ₂ и H ₂)	0 ... 0,05; 0,1; 0,2; 0,5	± 5 ; ± 10

* Для оксида углерода диапазон измерения приведен в мг/м³.

Таблица 2.8

Характеристики средств измерений химического состава жидкостей

Определяемое вещество	Диапазон измерения	Основная погрешность, %
Электрическая проводимость растворов кислот, щелочей, солей	10^{-2} ; 10^{-4} ; 10^{-6} ; $10^{-8} \dots 1,0 \text{ См/см}$	$\pm 2,5$
Электрическая проводимость конденсата, обессоленной воды	$0 \dots 1$; 10 ; $100 \frac{\text{мкСм}}{\text{см}}$	$\pm 2,0$; ± 5
Концентрация хлора в воде	$0 \dots 3 \text{ мг/л}$	± 4
Концентрация водных суспензий бумажной древесной, целлюлозной массы	$0,7 \dots 4 \%$	± 5
Концентрация частиц в суспензиях	$0 \dots 10^3$; $10^6 \frac{\text{частиц}}{\text{см}^3}$ (дисперсный состав частиц 5 ... 400 мкм)	± 10
Солесодержание воды (по NaCl)	$0 \dots 0,4$; 1 ; 3 ; 5 ; 20 ; 50 ; 100 ; 500 ; 600 ; 1000 ; 2500 ; $10\,000 \text{ мг/л}$	± 1 ; ± 4 ; ± 5 ; ± 6
Водородный показатель	$-1 \dots 1$; $2,5$; 5 ; 10 ; 12 ; 14 pH	± 1 ; ± 2
Сточные воды: цианиды хрома	$0 \dots 250 \text{ мг/л}$	± 1
Состав органических жидкостей (бензин, бензол, ацетоновые смеси, спирты и т. п.)	$0 \dots 3$, 10 , 20 , 50 , 100 мг/л	$\pm 2,5$

ности и вязкости различных веществ, в том числе, в первую очередь, имеющих высокую вязкость. Кроме того, мало выпускается автоматических рефрактометров, поляриметров и других приборов для контроля качества готовых продуктов и промежуточных продуктов по ходу технологических процессов их переработки.

Новые общепромышленные средства измерений состава и свойств создаются преимущественно в составе агрегатного комплекса средств аналитической техники (АСАТ), который по существу представляет собой систему агрегатных комплексов (называемых подкомплексами АСАТ) средств измерений состава и свойств, построенных на основе определённого для каждого подкомплекса метода измерений.

Перечень подкомплексов АСАТ и виды веществ, анализируемых входящими в каждый из них средствами измерений, приведен в табл. 2.9.

Таблица 2.9

Применение средств измерений подкомплексов АСАТ для определения химического состава различных веществ

Анализируемое вещество	Подкомплексы АСАТ									
	Фотометрический	Кондуктометрический	Потенциометрический	Полярографический	Хроматографический	Рентгеновский	Акустический	Диэлектрический	Тепловой	Магнитный
Газ	—	—	—	—	×	×	×	×	×	×
Жидкость	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Сыпучие	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×
Плазма	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×
Твердое тело	—	—	—	—	—	×	×	×	×	×

Примечание. Знаком × отмечены применяемые средства измерений.

Примерный состав блоков каждого из подкомплексов включает в себя следующие устройства: формирования пробы, воздействия, получения информации, сбора и преобразования информации, представления информации, накопления и обработки информации управления, а также вспомогательные устройства.

Устройства формирования пробы обеспечивают отбор образца, подготовку, дозирование и подачу пробы исследуемого вещества, предварительную подготовку (очистку, охлаждение или нагрев, растворение и т. п.) пробы, принудительную подачу и поддержание требуемого расхода предварительно подготовленного исследуемого вещества в элементах измерительного тракта. Устройства воздействия осуществляют генерирование подводимой к пробе энергии (тепловой, магнитной, электрической и т. д.), а также стабилизацию или требуемое изменение во времени этой энергии. К ним относятся различные генераторы, усилители мощности, фокусирующие устройства. В некоторых средствах измерений химического состава, например в рН-метрах, воздействия на пробу осуществлять не требуется, поскольку в них используются активные устройства получения информации. В соответствующих подкомплексах устройства воздействия на пробу отсутствуют.

Устройства получения информации представляют собой первичные измерительные преобразователи, с помощью которых измеряется физическая величина, характеризующая проявление эффекта взаимодействия исследуемого вещества с подводимой энергией воздействия (в пассивных устройствах формирования информации) или с веществом активного устройства получения информации.

Устройства формирования пробы, устройства воздействия и устройства получения информации являются специфическими для средств измерений химического состава и полностью проектируются в составе АСАТ.

Устройства сбора и преобразования информации, включающие в себя нормирующие преобразователи, согласователи, коммутаторы, аналого-цифровые преобразователи и т. п., частично проектируются в составе АСАТ, частично заимствуются из АК широкого применения.

Устройства представления, накопления и обработки информации, включающие в себя показывающие и регистрирующие приборы, индикаторы, запоминающие устройства (ЗУ), графопостроители и т. п., практически полностью заимствуются из АК широкого применения.

Устройства управления обеспечивают логическое и временное согласование работы всех устройств, входящих в измерительную систему. Эти устройства в основном также заимствуются из АК широкого применения. Инструментальные методы, применяемые в АСАТ, позволяют анализировать вещества в газообразном, жидком, твёрдом, порошкообразном состоянии, а также в виде плазмы, суспензий и аэрозолей.

В совокупности изделия подкомплексов АСАТ позволяют определить концентрацию большинства составляющих промышленных смесей. Проектируемые и выпускаемые изделия различных подкомплексов могут совместно использоваться для построения многопараметрических измерительных систем, предназначенных для измерения содержания одного или нескольких компонентов в многокомпонентных смесях или соединениях.

Изделия АСАТ, устанавливаемые непосредственно на объекте измерений, должны работать в диапазоне температур от $+5$ до $+50^{\circ}\text{C}$, при влажности окружающей среды 30...80% и атмосферном давлении 800...1100 ГПа. Предусматриваются исполнения обыкновенные, взрывозащищённые, брызгозащищённые, герметические, водозащищённые и защищённые от агрессивной среды. По защищённости от вибрационных воздействий изделия также должны иметь два исполнения — обыкновенное и устойчивое к виброперемещению 0,03 мм и виброускорению 10 м/с^2 в диапазоне частот 5...80 Гц. Напряжённость внешних электрических полей не должна превышать 50 кВ/м. а магнитных полей 400 А/м.

В изделиях АСАТ преимущественно используются унифицированные сигналы постоянного тока 0 – 5 мА, 4...20 мА и напряжения постоянного тока 0...1 мВ и 0...10 В.

Ниже приводятся краткие сведения о назначении и характеристиках подкомплексов средств измерений состава, входящих в АСАТ.

Подкомплекс фотометрических средств измерений (АСАТ-Ф) представляет собой набор устройств, позволяющих создавать приборы для определения состава жидких сред непосредственно по относительному изменению оптической плотности или по изменению цветных реакций контролируемых сред с соответствующими реагентами. Средства АСАТ-Ф преобразуют изменение оптической плотности в пределах 0...0,5 в унифицированный выходной сигнал.

Фотометрический подкомплекс состоит из двух базовых моделей (фотоабсорбциомера и турбидиметра). Модификации отличаются размерами кювет и толщиной просвечиваемого слоя в кюветах: 5, 10, 25, 50, 100 мм. Основная погрешность измерений 2%.

Принцип действия полярографических приборов основан на получении соотношений между силой тока, напряжением и концентрацией анализируемого вещества, восстанавливающегося на измерительном электроде. В настоящее время используются как приборы, работающие на постоянном токе, так и приборы, работающие на переменном токе, импульсные, высокочастотные и осциллографические.

Изделия подкомплекса кондуктометрических средств измерений (АСАТ-К) предназначены для преобразования значения электропроводности водных растворов солей, щелочей и кислот в унифицированный сигнал. В комплекс входят три базовые модели автоматических кондуктометрических концентратометров: АКК-1, АКК-3, АКК-9. Они позволяют осуществлять контроль растворов от высокой чистоты (дистиллированная вода) до сильно загрязнённых (технические растворы с механическими примесями) и от неагрессивных до сильно агрессивных.

Методы измерения, применяемые в комплексе, делятся на контактные и бесконтактные. Контактный метод позволяет измерять чистые малоагрессивные среды с удельной электропроводностью от 10^{-1} до 10^{-2} См/см. Бесконтактным методом, в котором используются низкие частоты, измеряют растворы с высокой удельной электропроводностью — до 1 См/см, т. е. агрессивные растворы солей, щелочей, кислот. Практически максимальным значением удельной электропроводности обладают растворы кислот с концентрацией 25...30% при повышенной температуре.

Арматура изделия АСАТ-К обеспечивает установку чувствительных элементов на технических агрегатах и магистралях и защиту их от агрессивных воздействий контролируемой среды. В измерительные схемы введена автоматическая температурная коррекция в диапазоне температур от 1 до 110°C. Основная погрешность измерительных преобразователей $\pm 2,5$ %, выходной сигнал 0...5 мА, 4...20 мА.

Подкомплекс потенциометрических средств измерения химического состава (АСАТ-П), предназначен для измерения концентрации растворов различных веществ по активности ионов растворённого вещества в водных средах (рХ), а также по величине окислительных и восстановительных потенциалов (ОВП). Чувствительные элементы приборов подкомплекса состоят из электродной пары (электродов измерительного и сравнения), арматуры и дополнительных устройств, обеспечивающих контакт электродов с контролируемой средой в их соединении с преобразователем.

В качестве базовых элементов для измерения рН приняты стеклянные промышленные электроды. Для измерения активности ионов натрия (рNa) используются также стеклянные электроды, для определения активности различных катионов и анионов (рК, рСа, рСl, рI, рСN, рSO₃ и др.) — электроды на основе ионообменных мембран; для измерения рS при рН = const используется серебряный электрод. Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) измеряется платиновыми электродами.

Преобразование ЭДС электродных систем в унифицированный выходной сигнал постоянного тока осуществляется преобразователями в двух исполнениях — обыкновенным и с искробезопасным входом.

В устройствах подкомплекса осуществляется температурная компенсация в диапазоне температуры среды от 0 до 100°С. Основная погрешность измерительных преобразователей $\pm 1\%$.

Подкомплекс диэлькометрических средств измерений состава (АСАТ-Д) предназначен для определения свойств, состава или структуры веществ по диэлькометрическим (связанным с диэлектрической проницаемостью) параметрам. С помощью анализаторов, создаваемых на базе агрегатных средств АСАТ-Д, решается широкий круг задач, в частности осуществляется контроль фазового состава многофазных потоков, определение диэлектрических свойств широкого класса материалов, анализа состава смесей, компонентов многофазных потоков, анализ влагосодержания. В первой очереди АСАТ-Д разрабатываются агрегатные средства комплекса диэлькометрических приборов для формирования и подготовки пробы и формирования измерительной информации.

Комплекс АСАТ-Д представлен тремя группами приборов:

- 1) промышленного контроля фазового состава двухфазных потоков; 2) анализа состава бинарных систем в промышленных потоках; 3) лабораторного анализа электрических свойств и состава материалов.

Назначение приборов первой группы – непрерывный бесконтактный дистанционный контроль концентрации одного из компонентов двухфазных промышленных потоков, например твердого компонента в потоках аэро- и гидрозолей, образующихся при пневмо- или гидротранспорте твёрдых (сыпучих) материалов; определение газовых включений в жидкости.

Группа приборов для анализа бинарных систем предназначена для определения состава отдельных фаз двухфазных потоков или состава бинарных смесей жидкостей и газов. В третью группу приборов входят диэлькометрические анализаторы широкого применения. Их назначение — анализ свойств и состава (в том числе влажности) диэлектрических материалов во всех агрегатных состояниях при частоте $20 \cdot 10^8$ Гц в широком диапазоне изменения диэлектрической проницаемости ($1,5 \dots 10\,000$) и тангенса угла диэлектрических потерь ($10^{-5} \dots 10$ и более). Базовая модель группы используется для анализа различных материалов в наиболее распространенном интервале изменения диэлектрической проницаемости и потерь. Модификации модели предназначены для анализа материалов с характерными свойствами (сегнетоэлектриков, полупроводников, газов).

Подкомплекс магнитных (термомагнитных) средств измерений (АСАТ-М) предназначен для определения концентрации одного из компонентов в газовых и парогазовых смесях, обладающих свойствами магнитной восприимчивости, например кислорода, а также газов, вступающих в реакцию с кислородом.

Агрегатированные средства комплекса изготовлены в виде самостоятельных функциональных блоков (агрегатов) и комплектуются из унифицированных модулей и узлов. В первую очередь в комплекс входят измерители магнитной восприимчивости, основными техническими характеристиками которых являются чувствительность к входному информативному параметру, погрешность функции преобразования (погрешность нуля и погрешность чувствительности), полный или рабочий диапазон измерения значений информативного параметра, разрешающая способность преобразователя.

Средства получения информации о физических свойствах вещества и качества продукции включают в себя средства неразрушающего контроля продукции, средства получения информации о свойствах вещества теплофизических, оптических, электрофизических (и параметрах изделий), физико-механических. Физико-механические средства включают в себя средства измерения плотности, твердости, вязкости, гранулометрического состава, средства получения информации о прочих физико-механических свойствах.

Применение приборов для контроля физических свойств исходных материалов, полуфабрикатов и изделий, а также для неразрушающего контроля качества продукции непосредственно в технологических процессах весьма перспективно. Однако в связи с разнообразием контролируемых параметров и условий измерения, а также в связи со сложностью инструментальных методик приборы для непрерывного контроля непосредственно в ходе технологического процесса еще не получили широкого распространения.

Для измерения плотности жидкостей предназначены буйковые плотномеры, в которых буй полностью погружен в жидкость и выталкивающая сила пропорциональна её плотности. Применяются гидростатические и радиоактивные плотномеры.

Вязкость жидкости чаще всего измеряется с помощью вискозиметров, принцип действия которых основан на измерении момента сопротивления цилиндра, погруженного в жидкость и вращающегося с постоянной скоростью.

Для контроля комплексных параметров, характеризующих электрофизические свойства веществ (тангенс угла диэлектрических потерь, магнитная проницаемость, удельная проводимость и т. д.), в составе АСЭТ выпускается и проектируется комплекс технических средств для построения информационно-измерительных систем (ИИС) и измерительно-вычислительных комплексов (ИВК).

Для контроля ряда физико-механических параметров исходных материалов, сырья и готовой продукции, таких, как прочность, твёрдость, ударная вязкость и т. п., предназначены разрывные и другие испытательные машины агрегатного комплекса средств испытаний материалов и конструкций на прочность (АСИП). В состав комплекса входят устройства для задания нагрузок и климатических условий, для контроля и регистрации результатов испытаний, включен процесс разрушения образца.

Для контроля качества продукции в настоящее время проектируется и планируется осваивается в производстве агрегатный комплекс средств неразрушающего контроля — АСНК. По содержанию информации о качестве изделия приборы АСНК подразделяются на дефектоскопы, измерители геометрических размеров и структуроскопы.

Дефектоскопы предназначены для обнаружения дефектов типа нарушений сплошности (трещин, раковин, расслоений, включений, непропаев и т. п.). Измерители геометрических размеров предназначены для определения размеров изделия, преимущественно в движении и в труднодоступных местах, и для определения

толщины покрытий и слоёв. Структуроскопы позволяют измерить или оценить физические или структурные свойства материалов (тип структуры, распределение ферритной фазы в сталях, коэрцитивную силу, твёрдость и т. п.).

Характерной особенностью средств АСНК является возможность построения систем комплексного контроля изделий. Такие системы включают в себя устройства доставки и перемещения изделия, а также несколько дефектоскопов, структуроскопов и других средств измерений, каждое из которых контролирует определенный параметр изделия.

Средства измерений сил, масс, весодозирующие устройства. Для измерения сил и масс в средствах измерений используется метод уравнивания известной силой (массой) или силой упругого элемента, величина деформации которого пропорциональна уравнивающей силе. Первый метод применяется преимущественно в приборах непосредственного отсчета. К ним относятся различные рычажные, гирные и квадрантные весы. В устройствах, основанных на втором методе, измеряемая сила или вес измеряемой массы уравнивается усилием, развиваемым упругим элементом, величина деформации которого преобразуется в сигнал дистанционной передачи.

В качестве преобразований деформации в электрический сигнал применяются тензорезисторы, магнитоупругие и вибрационно-частотные преобразователи. Достоинства тензорезисторных преобразователей заключаются в высокой точности, стабильности и надёжности, простоте конструкции, возможности суммирования сигналов большого количества тензорезисторов, широком температурном диапазоне и малоинерционности.

В нашей стране серийно производятся проволочные и фольговые тензорезисторы с базой от 1 до 30 мм и номинальным сопротивлением от 50 до 400 Ом на бумажной или плёночной основе (подложке), работоспособные в диапазоне температур от -40 до $+70^{\circ}\text{C}$. Для высокотемпературных измерений (до $+430^{\circ}\text{C}$) предназначены тензорезисторы из никельмолибденовой проволоки (тип НМП). На основе тензорезисторных преобразователей выпускается ряд силоизмерительных систем.

Вибрационно-частотные преобразователи основаны на измерении частоты автоколебаний перемычки, технологически изготовленной за одно целое с упругим элементом. Такая конструкция в отличие от известных струнных датчиков позволяет исключить влияние мест заделки чувствительного элемента, что обеспечивает их высокую эксплуатационную надёжность и временную стабильность.

На основе вибрационно-частотного чувствительного элемента разработан ряд ИП силы, обладающих высокой стабильностью и обеспечивающих класс точности до 0,05. Для измерения сил сжатия серийно выпускаются датчики типа СВК с верхними пределами от 200 Н до 200 кН. Для измерения сил растяжения выпускаются ИП типа СВР этой серии с верхними пределами измерений от 2 до 10 кН.

Конструкции вибрационно-частотных ИП максимально унифицированы. Практически для всех ИП применяется одна и та же система возбуждения и усиления сигнала. ИП вибрационно-частотной системы имеют выходной сигнал, обладающий повышенной помехозащищённостью, обеспечивающий высокую точность при передаче и при преобразовании в цифровую форму.

Некоторое распространение в отечественной аппаратуре получили магнитоупругие ИП, иногда называемые *трансдукторами* или *тордукторами*. Принцип их действия основан на изменении магнитной проницаемости ферромагнитных материалов при наличии механических напряжений, которая преобразуется в изменение индуктивности катушек, намотанных на упругий элемент. Достоинства магнитоупругих ИП заключаются в высокой механической прочности, надежности, высокой мощности выходного сигнала. Однако эти ИП имеют невысокую точность (1...2%), значительную температурную погрешность (около 0,2% на 10°С) и временную нестабильность.

Для измерения и дозирования масс в промышленных условиях выпускается ряд весоизмерительных и дозирующих устройств. Унифицированный ряд весоизмерительных устройств, построенных на основе тензорезисторных ИП, предназначен для измерения массы нетто сыпучих или жидких продуктов, загружаемых в различные ёмкости. Устройство представляет собой измерительную систему, состоящую из набора первичных преобразователей, на которых монтируется взвешиваемая емкость, вторичных преобразователей и регистрирующего прибора. Устройства ряда позволяют измерять массы от 4 до 120000 кг.

Созданы серии весов и весоизмерительных устройств для взвешивания различных изделий и емкостей с материалами. В частности, разработаны крановые тензометрические весы с наибольшим пределом взвешивания 160, 400 и 500 т классов точности 0,25 и 0,5, снабженные аппаратурой связи с централизованными средствами сбора, обработки данных и управления ТП.

Большой эффект дает использование устройств для взвешивания различных транспортных средств без остановки, а также железнодорожных составов —

без расцепки. На базе вибрационно-частотных датчиков изготавливаются конвейерные весы для взвешивания сыпучих материалов, перемещаемых ленточными транспортерами со скоростью до 2,5 м/с. Производительность весов до 5000 т/ч. Весы автоматические конвейерные, предназначенные для взвешивания в движении поддона с грузом, обеспечивают передачу данных в систему управления и регистрацию результата. Погрешность взвешивания 0,5%, скорость движения конвейера 0,2 м/с.

Система связанного многокомпонентного дозирования сыпучих материалов предназначена для поддержания заданного расхода и соотношения до пяти компонентов с точностью до 0,5% от текущего расхода смеси. Производительность системы от 0,5 до 2500 кг/ч, наибольший суммарный весовой расход 5 т/ч.

Новые общепромышленные средства измерений сил, масс и весодозирующей техники создаются преимущественно в состав агрегатного комплекса средств измерения и дозирования масс (АСИМ). АСИМ представляет собой совокупность узлов, блоков и устройств, на базе которых методом агрегатирования создаются основные типы циферблатных и цифровых электронно-механических и электронных весовых и весодозирующих систем периодического действия для штучных грузов, а также системы дискретного и непрерывного действия для сыпучих материалов. В изделиях АСИМ приняты аналоговые сигналы связи 0...5 мА, 0...10 В и 4...8 кГц и цифровые сигналы в двоично-десятичном коде 8 – 4 – 2 – 1 с логическим нулём 0...2,4 В и логической единицей 9,6...14,4 В положительной полярности.

Конструктивные исполнения устройства АСИМ должны обеспечивать возможность эксплуатации:

- механических силоизмерителей при температуре от – 10 до 50°C;
- первичных ИП — при температуре от – 30 до 50°C (классов точности 0,2 и 0,4), от 5 до 400°C (класса точности 0,1) и от 10 до 35°C (класса точности 0,04);
- остальных устройств — при температуре от 5 до 50°C, за исключением крупноформатных табло и некоторых грузоприёмных устройств, которые могут эксплуатироваться при температуре от – 30 до 50°C.

Средства измерений кинематических величин. К кинематическим величинам относятся величины, характеризующие геометрические размеры и координаты, а также параметры движения (линейную и угловую скорость, ускорение).

Для дистанционного измерения кинематических величин широко применяются различные электромагнитные устройства — сельсины, индуктосины, тахоге-

нераторы, кодовые маски. Особой разновидностью кинематических величин являются параметры вибраций: виброперемещение, виброскорость и виброускорение. Измерение этих параметров необходимо для контроля состояния и предупреждения аварий технологического оборудования, а также для контроля различных изделий на вибропрочность. Отечественные средства для измерения параметров вибраций выпускаются и проектируются преимущественно в составе агрегатного комплекса средств измерения вибраций (АСИВ).

Средства измерений электроэнергетических величин. К. электроэнергетическим величинам относятся параметры электрической энергии, потребляемой из государственной электрической сети или генерируемой местными электрическими станциями и электросиловыми агрегатами. Отечественные средства измерений электроэнергетических величин выпускаются преимущественно в составе агрегатного комплекса средств электроизмерительной техники (АСЭТ). В составе АСЭТ имеется большое количество типов измерительных преобразователей, коммутаторов, АЦП, ЦАП, показывающих и регистрирующих приборов и т. п.

Номенклатура первичных измерительных преобразователей электроэнергетических величин включают в себя преобразователи: напряжения постоянного тока, напряжения переменного тока, силы постоянного тока, силы переменного тока, активной мощности трёхфазного тока, реактивной мощности трёхфазного тока, частоты переменного тока.

Ряды первичных преобразователей строятся по четырём ключевым параметрам: диапазон изменения входного сигнала, основная погрешность, время установления показаний, диапазон изменения выходного сигнала.

Все измерительные преобразователи работают по принципу усиления и преобразования части электрической энергии, отбираемой из измеряемой сети. Приборостроением обеспечивается практически весь диапазон измерения электрических параметров как постоянного, так и переменного токов.

5. Средства обработки информации и формирования сигналов управления

Технические средства обработки информации и формирования сигналов управления, называемые иногда устройствами центральной части системы ГСП, предназначены для осуществления всех алгоритмов регулирования и управления

— от простейших режимов автоматического регулирования, т. е. стабилизации отдельных параметров, до автоматизации управления крупными и сложными установками и предприятиями в целом.

По кругу решаемых задач данные устройства подразделяются на три уровня: средства местного контроля и регулирования; средства централизованного контроля и регулирования; средства автоматизации управления.

Между уровнями осуществлен принцип иерархии: устройства нижних уровней решают задачи функционально более простые, чем устройства верхних уровней. Устройства верхних уровней формируют уставки, изменяют алгоритмы работы устройств нижних уровней и соединяются с объектом управления и устройствами нижних уровней с помощью устройств промежуточных уровней.

На каждом уровне рассматриваемых технических средств находятся несколько функционально аналогичных устройств или совокупностей устройств, объединяемых в комплексы. Комплексы устройств различаются по областям применения, принципу действия и конструктивному исполнению. Ниже рассматриваются основные характеристики и номенклатура ТС каждого из указанных уровней.

Средства местного контроля и регулирования. Технические средства этого уровня предназначены для создания автоматического контроля и регулирования отдельных технологических параметров различных объектов — котельных агрегатов, промышленных печей, ректификационных колонн, смесительных агрегатов и т. п. Обычно они получают сигнал от измерительных преобразователей и воздействуют на управляемый объект через внешнее исполнительное устройство.

Средства местного контроля и регулирования включают в себя комплексы средств автоматизации, регуляторы прямого действия, приборы вторичные показывающие, вторичные регулирующие, вторичные регистрирующие. Последние включают в себя потенциометры, мосты, миллиамперметры, вольтметры, а также вторичные приборы дифференциально-трансформаторной системы.

Средства данной группы зачастую выполняют одновременно функции индикации и регистрации значения контролируемой величины, сигнализации о достижении контролируемой величиной одного или нескольких заданных значений и позиционного регулирования, одноконтурного регулирования отдельных параметров по П -, ПИ - или ПИД-законам.

Особой разновидностью средств местного контроля и регулирования являются регуляторы без использования вспомогательной энергии (регуляторы прямого дей-

ствия). В них конструктивно объединены измерительный преобразователь, устройство формирования управляющего воздействия и исполнительный механизм с регулирующим органом. Приборостроением выпускается широкая номенклатура регуляторов прямого действия: температуры – около 50 типов, давления и перепада давления – более 20 типов, расхода и уровня – около 10 типов, выпускаются регуляторы и других параметров.

Средства местного контроля и регулирования подразделяются на универсальные и специализированные. Входными сигналами универсальных устройств являются унифицированные сигналы связи ГСП. Входными сигналами специализированных устройств являются естественные сигналы, поэтому они используются для индикации, регистрации, сигнализации и регулирования вполне определенных физических величин. В настоящее время группа приборов местного контроля и регулирования достаточно многочисленна. Так, например, подгруппа показывающих приборов включает 244 типа, подгруппа регистрирующих и регулирующих приборов (не входящих в агрегатные комплексы) составляет более 150 типов.

При контроле величин, когда требуется повышенная точность и наличие графика изменения контролируемой величины на диаграммной ленте, необходимы регистрирующие приборы. Применение их существенно улучшает качество ведения процессов, повышает эффективность восприятия показаний и обеспечивает фиксацию информации. Широкое применение для этих целей находит унифицированный комплекс вторичных приборов серии КС с расширенными функциями.

Приборы серии КС позволяют выполнять следующие функции: измерение и регистрацию «естественных» электрических сигналов, поступающих от датчиков температуры, давления, расхода и др.; измерение и регистрацию унифицированных сигналов датчиков; регулирование позиционное, пропорциональное изодромное с электрическими и с пневматическими сигналами связи; преобразование и нормирование сигналов датчиков для связи с различными блоками ГСП и системами централизованного контроля.

Показывающие и самопишущие приборы серии КС позволяют выполнять функции:

- 1) измерения и регистрации электрических величин (ток, напряжение), теплотехнических величин (термо-ЭДС, сопротивление, тензосопротивление, расход, уровень, давление), унифицированных сигналов ГСП;

- 2) автоматическое регулирование позиционное, пропорциональное, изодромное и др.;

3) выдачу электрических и пневматических выходных данных.

Средства централизованного контроля и регулирования. Средства централизованного контроля и регулирования предназначены для построения АСУ крупными технологическими агрегатами, установками и производствами. В системах автоматизации таких объектов, как правило, требуется реализовать многоконтурное, взаимосвязанное или каскадное регулирование, косвенные измерения, оптимизацию регулирования, многоступенчатые защиты и логические операции при пуске и останове объекта или перестройке алгоритма регулирования.

Современные средства централизованного контроля и регулирования строятся в виде агрегатных комплексов блоков и устройств, позволяющих создавать различные АСУ ТП для широкого класса объектов.

Для построения сравнительно несложных аналоговых систем контроля и регулирования с развитыми функциями одноконтурного и каскадного регулирования серийно выпускается комплекс регулирующих и функциональных пневматических приборов «Старт», входящих в систему АК пневматических средств контроля и регулирования. В состав комплекса «Старт» входит ряд приборов, которые подразделяются на следующие функциональные группы:

- регулирующие устройства (16 типов), в том числе позиционные регуляторы (два типа), пропорциональные регуляторы (два типа), ПИ-регуляторы (восемь типов), ПИД-регуляторы (два типа), устройства прямого и обратного предварения (два типа);
- функциональные логические и алгебраические устройства (11 типов); управляющие устройства (два типа);
- приборы контроля, показывающие и регистрирующие (12 типов).

Для связи между всеми приборами системы используется унифицированный пневматический сигнал 20...100 кПа.

Для построения более сложных аналого-дискретных систем централизованного контроля и регулирования с числом параметров до нескольких сотен предназначен агрегатный функционально-аппаратурный комплекс «Центр». Комплекс создан на основе типизации функций контроля и регулирования в АСУ ТП с непрерывным характером процессов, для которых высокое быстродействие не является обязательным, и предъявляются повышенные требования к пожаро- и взрывобезопасности, надёжности в условиях длительной эксплуатации, простоте обслуживания. Аппаратура выполнена на принципе блочного агрегатирования приборов системы «Старт»

и повышения степени централизации при контроле и регистрации параметров. Каждая блочная единица комплекса является функционально законченной частью АСУ ТП на определенную группу параметров (10, 20, 40, 60). Это позволяет при проектировании, внедрении и эксплуатации АСУ ТП оперировать не отдельными приборами, а укрупненными функциональными блоками.

Дальнейшим развитием комплексов приборов «Старт» и «Центр» является разрабатываемый в настоящее время АК пневматических средств контроля в регулировании АСКР-П.

Для построения систем управления циклическими процессами разработана пневматическая агрегатно-модульная система пневматических средств дискретной автоматики «Цикл». Модули системы «Цикл» обеспечивают выполнение логических функций, в том числе функций памяти и некоторых счетных операций, а также позволяют реализовать циклическое программное управление.

Системы автоматизации на средствах пневмоавтоматики имеют ограниченное применение в связи с недостаточными быстродействием и дистанционностью (до 300 м) передачи сигнала и рядом других особенностей.

Более универсальными являются системы с электрическими сигналами связи. В состав систем АК электрических аналоговых средств контроля и регулирования входят три агрегатных комплекса: «Каскад», АКЭСР, АСКР-ЭЦ.

Из этих систем АК наибольшее распространение получили средства транзисторного электрического унифицированного комплекса приборов автоматического регулирования с сигналом связи постоянного тока «Каскад». В состав комплекса входят следующие устройства: регулирующие приборы (три типа), в том числе аналоговый и импульсный ПИД-регуляторы; приборы алгебраических операций (четыре типа); приборы динамических преобразований (два типа); приборы нелинейных и логических операций (два типа); приборы контроля и индикации (один тип); задающие устройства (два типа), приборы ручного управления (два типа); усилители мощности (пять типов); вспомогательные приборы (три типа).

Приборы комплекса «Каскад» имеют блочно-модульную конструкцию, являются конструктивно законченными единицами и могут применяться как самостоятельные изделия. Они состоят из взаимозаменяемых модулей, имеющих нормализованные габариты.

Унифицированные токовые сигналы 0...5 мА и 0...20 мА используются для дистанционной связи с измерительными преобразователями. Для связи между приборами используются токовый сигнал 0 ... 5 мА и внутренний сигнал постоянного

напряжения 0...2,5 В. Дистанционная связь с исполнительными устройствами и с усилителями мощности осуществляется с помощью токового сигнала 0...5 мА и дискретного сигнала постоянного напряжения 0 и + 24 В.

Использование в АК «Каскад» токового сигнала связи обеспечивает высокую помехозащищенность при эксплуатации в промышленных условиях и высокую точность при передаче сигнала на расстояние до 3 км.

Дальнейшим развитием систем аналоговых средств контроля и регулирования с сигналом связи постоянного тока является комплекс электрических средств контроля и регулирования на интегральных микросхемах — АКЭСР. Конструктивно все изделия АКЭСР изготавливаются в виде самостоятельных блоков. Каждый блок содержит от 4 до 12 модулей. В целом все устройства АКЭСР обеспечиваются 25 разновидностями модулей.

Основной элементной базой функциональных модулей являются большие интегральные схемы. Применение микроинтегральных схем позволяет достичь высокой надёжности, Вероятность безотказной работы большинства изделий АКЭСР за 2000 ч составляет 0,96...0,98. В АКЭСР использована система сигналов связи «ток - напряжение», представляющая собой ряд унифицированных сигналов связи (0...5, 0...20, 4...20 мА и 0...10 В постоянного тока). Приборы комплекса выпускаются в двух исполнениях: приборном и шкафном.

Приборное исполнение предназначено для щитового монтажа. Приборы шкафного исполнения изготавливаются полностью на базовых конструкциях УТК и предназначены для установки в шкафах, пультах и стойках.

Комплекс АСКР-ЭИ, представляет собой совокупность унифицированных блоков, приборов и типовых установок, предназначенных для непрерывного и циклического контроля и многоканального регулирования технологических параметров, информацию о которых наиболее целесообразно обрабатывать в аналоговой форме, а представление информации оператору осуществлять как в цифровой, так и в аналоговой форме. Особенности комплекса являются широкая номенклатура средств связи с оператором, возможность комплексной автоматизации «простых» (до 64 контролируемых параметров) объектов на основе сравнительно дешевой и высоконадежной аппаратуры, а также возможность гибкого видоизменения структур систем автоматизации применительно к специфике управляемого объекта.

Все средства комплекса АСКР-ЭЦ построены на единой элементной базе, содержащей семь серий интегральных микросхем общего применения, в пять типов микросхем частного применения.

Для построения автоматизированных систем управления агрегатами, установками и технологическими процессами на предприятиях с непрерывным и непрерывно-дискретным характером производства в различных отраслях промышленности спроектирован комплекс технических средств локальных информационно-управляющих систем (КТС ЛИУС). Комплекс предназначен для централизованного контроля процессов с числом контролируемых параметров от 64 до 128 (шаг дискретизации 8, 16, 32) и управления ими. Комплекс в основном ориентирован на работу с непрерывными частотными датчиками, хотя допускает возможность обработки информации, поступающей от датчиков напряжения и тока (в унифицированных пределах).

Средства КТС ЛИУС позволяют строить АСУ ТП, которые по информационным объёмам и типам решаемых задач не требуют применения управляющих вычислительных машин или имеют их на высшем уровне иерархии. В последнем случае средства КТС ЛИУС используются для реализации систем управления, которые автономно выполняют функции контроля, управления и обмениваются информацией с вычислительными комплексами АСВТ-М (М-6000).

Совместно с изделиями КТС ЛИУС могут применяться другие устройства ГСП. Для этого входные в выходные сигналы устройств КТС ЛИУС имеют параметры, обеспечивающие информационную совместимость с электрическими и пневматическими изделиями ГСП. Обмен информацией между блоками КТС ЛИУС обеспечивается единым интерфейсом ЕИ 1.

В составе КТС ЛИУС предусмотрены следующие устройства: средства преобразования сигналов (из одного вида в другой, нормализация позиционных сигналов, сравнение частотных сигналов); средства ввода — вывода информации; средства обработки, хранения и обмена информацией; средства представления информации; комбинированные средства обработки информации; комплексы централизованного контроля, первичной обработки информации и регулирования; источники питания.

Конструктивной базой КТС ЛИУС является комплекс унифицированных типовых конструкций (УТК).

Средства автоматизации управления. Автоматизация управления промышленными предприятиями, современными высокопроизводительными интенсивными процессами и агрегатами становится эффективной при использовании вычислительной техники. Для этой цели выпускается ряд комплексных средств,

предназначенных для построения систем управления объектами на основе анализа поступающей информации о большом числе физических величин и технологических параметров, характеризующих состояние и поведение этих объектов, т. е. на основе анализа большого потока информации, необходимой для принятия оптимального решения.

Агрегатный комплекс АСВТ-М включает в себя набор процессоров различной производительности, системные периферийные устройства, широкий набор устройств связи с объектом и систему программного обеспечения. Обобщенная структурная схема комплекса приведена на рис. 2.6.

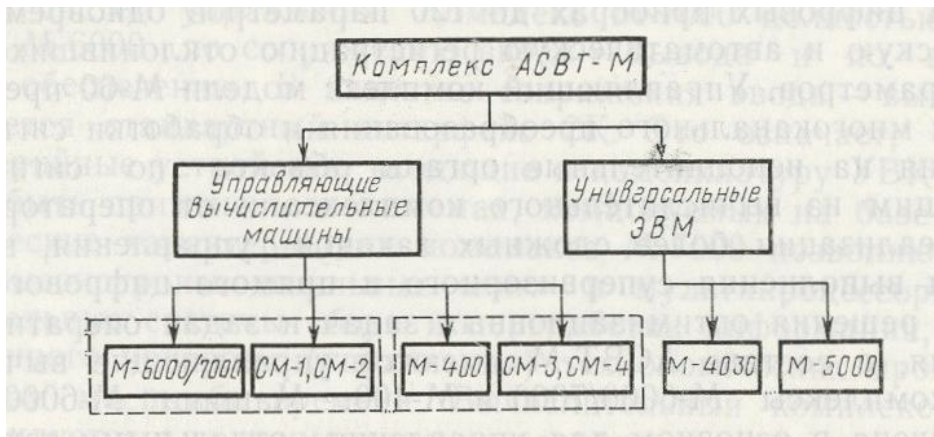


Рис. 2.6. Структура агрегатного комплекса средств автоматизации управления АСВТ-М

На базе средств АСВТ-М создан ряд управляющих вычислительных комплексов (УВК): микропрограммный автомат М-6010, машина централизованного контроля М-40, информационный комплекс М-60, управляющие вычислительные комплексы М-400, М-6000, М-7000, перфорационный комплекс М-5010 и др.

Управляющие устройства М-6010 и М-40 составляют низшую степень иерархии АСВТ-М и являются микропрограммными процессорами с фиксированной программой. Они могут использоваться самостоятельно как машины централизованного контроля (управления) относительно простых объектов с постоянным набором задач, а также применяться в сочетании с комплексами М-6000 и М-400 в качестве подсистем сбора и обработки первичной информации и локального управления. Комплекс М-6010 в АСУ ТП находит применение для реализации алгоритмов непосредственного цифрового управления, для группового или индивидуального управления устройствами ввода - вывода в вычислительной системе.

В семейство М-40 кроме базовой модели входят машины централизованного контроля (МЦК) четырех модификаций: М-41, М-42, М-43, М-44. В МЦК М-40 используется единый принцип связи между центральным устройством и внешними устройствами — интерфейс 2К, что позволяет использовать в составе М-40 внешние устройства УВК М-6000.

Информационно-управляющий вычислительный комплекс М-60 предназначен для создания иерархических информационных, информационно-управляющих в информационно-вычислительных комплексов, работающих в реальном масштабе времени для автоматизированных систем управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности.

Модель М-60 состоит из двух основных частей: информационного комплекса (ИК) и управляющего комплекса (УК). Информационный комплекс выполняет сбор и обработку информации от датчиков общим количеством до 4096, сигнализацию об отклонениях до 512 параметров, контроль по вызову оператора на аналоговых приборах до 384 параметров одновременно; контроль по вызову на цифровых приборах до 120 параметров одновременно; периодическую и автоматическую регистрацию отклонившихся от нормы параметров. Управляющий комплекс модели М-60 предназначен для многоканального преобразования и обработки сигналов воздействия на исполнительные органы объекта по сигналам, поступающим из вычислительного комплекса и от оператора.

Для реализации более сложных законов управления, в том числе для выполнения супервизорного и прямого цифрового управления, решения оптимизационных задач и задач оперативного управления, в составе АСВТ-М имеются управляющие вычислительные комплексы М-6000/7000 и М-400. Машина М-6000/7000 предназначена в основном для управления отдельными технологическими объектами, а М-400 — для управления научными экспериментами и технологическими процессами, требующими высоких скоростей сбора и обработки данных.

Входящие в УВК М-6000 процессоры, на основе которых строятся системы, ориентированы на высокопроизводительную, но не сложную обработку технологической информации. По своей архитектуре, размерам и стоимости они соответствуют современным мини-ЭВМ.

Все устройства ввода - вывода, внешняя память, устройства печати, связи с оперативным персоналом, связи с управляемым объектом и т. д. подключаются к вычислительному комплексу через стандартный интерфейс 2К АСВТ-М.

В номенклатуру комплекса М-6000 входит большой набор модулей устройств ввода - вывода, позволяющий проектным путем компоновать автоматизированные системы управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности. В настоящее время для потребителей УВК М-6000 поставляется система программного обеспечения М-6000 АСВТ-М, ориентированная на применение перфоленты в качестве системного носителя.

УВК М-400 — это малая ЭВМ, обладающая большим быстродействием и большим объёмом внутренней памяти по сравнению с М-6000.

Дальнейшим развитием и совершенствованием вычислительной части комплекса М-6000 является комплекс М-7000, который позволяет рационально строить многопроцессорные системы. Комплекс М-7000 обеспечивает более высокую производительность, увеличение ёмкости главной памяти, развитие системных возможностей, повышение надёжности и улучшение эксплуатационных данных систем управления. Комплекс М-7000 полностью совместим с М-6000 по сопряжению ввода - вывода и по программному обеспечению. В качестве сопряжения ввода - вывода используется стандартный интерфейс 2К. Это означает, что все периферийные устройства, входящие в номенклатуру УВК М-6000, могут быть применены в системах, компонуемых на базе М-7000. Технические характеристики комплекса М-7000 позволяют создавать высокопроизводительные моно- и мультипроцессорные вычислительные системы сбора и переработки информации, централизованного контроля (управления) технологических процессов в реальном масштабе времени. Вычислительный комплекс М-7000 рекомендуется для применения на верхних уровнях иерархических систем управления при компоновке низовых подсистем на базе М-6000.

Комплекс М-4030 АСВТ-М представляет собой дальнейшее развитие системы АСВТ и предназначен для использования в качестве высшего звена в иерархических многомашинных системах управления и в одномашинных системах (АСУП и ОАСУ) и относится к средствам для автоматизации организационно-экономического управления.

В совокупности с приборами и средствами автоматики других агрегатных комплексов ГСП комплекс М-4030 обеспечивает построение всевозможных вариантов автоматизированных систем управления для народного хозяйства. В результате ряда технических решений в М-4030 при сравнительно небольших затратах на оборудование достигнута средняя производительность 100 тыс. операций/с и суммарная пропускная способность каналов ввода - вывода 2 млн. байт/с.

Математическое обеспечение модели М-4030 включает в себя две операционные системы — ленточную и дисковую, тесты, библиотеки стандартных программ и пакеты прикладных программ различного назначения.

Страны – члены СЭВ приступили с 1978 г. к серийному выпуску комплекса средств вычислительной техники – международной системы малых ЭВМ (в сокращённой записи СМ ЭВМ), которая представляет собой агрегатную систему технических и программных средств вычислительной техники, нормативного методического и эксплуатационного обеспечения и стандартов, используемых в АСУ ТП, в системах автоматизации научных исследований и эксперимента, в системах автоматизации проектирования, а также выполнения небольших по объёму научных и инженерных расчетов. В УВК СМ ЭВМ агрегатные модули выполняются в виде автономных, конструктивно законченных, комплектных блоков с автономным питанием и встроенной вентиляцией.

Вычислительные и управляющие комплексы СМ ЭВМ различного назначения строятся на базе процессоров, номенклатуры модулей памяти и других технических средств СМ ЭВМ.

Управляющие вычислительные комплексы СМ-1 и СМ-2 компануются по спецификации заказчика (пользователя) на базе процессоров СМ-1П и СМ-2П из агрегатных модулей как из номенклатуры СМ ЭВМ, так и (при необходимости) устройств связи с объектом из номенклатуры М-6000, М-7000 АСВТ-М. Эти комплексы имеют полную программную совместимость с УВК М-7000 и одностороннюю программную совместимость на уровне перемещаемых программ с системой М-6000, а также полную совместимость с УВК М-6000, М-7000 по интерфейсу ввода - вывода.

Комплексы СМ-1 и СМ-2 при малых габаритных размерах и сравнительно низкой стоимости обеспечивают высокую производительность, высокие эксплуатационные характеристики, возможность расширения системы команд, как стандартными наборами дополнительных команд, так и специальными командами.

На базе УВК СМ-1 и СМ-2 можно компоновать не только одно- или многоуровневые управляющие системы, но и многомашинные рассредоточенные УВК. Между различными УВК и терминальными устройствами можно передавать информацию по телефонным, телеграфным и специальным каналам связи. В комплексах предусмотрено сопряжение со средствами ЕС ЭВМ. Программное обеспечение УВК СМ-1 и СМ-2 построено по агрегатно-модульному принципу, гибкость которого позволяет компоновать программные системы в соответствии с требуемыми режимами

работы и выполняемыми функциями для определенной конфигурации аппаратных средств.

Ввиду преемственности программного обеспечения с процессорами М-6000 и М-7000 любая системная программа, написанная для УВК М-6000 или М-7000, может быть без изменения выполнена на СМ-1 или СМ-2.

Второе направление СМ ЭВМ представляют УВК СМ-3 и СМ-4, которые компанируются на базе процессоров, обеспечивающих преемственность с М-400 АСВТ-М.

Широкий набор периферийных устройств и устройств связи с объектом, разрабатываемым в рамках СМ ЭВМ на основе базового комплекса СМ-3, позволяет компоновать различные конфигурации УВК для многих областей применения, а именно:

- в системах управления технологическими процессами малой и средней сложности;
- в системах числового программного управления станками и оборудованием;
- на автоматизированных рабочих местах конструктора (технолога);
- в системах автоматизации научных исследований и эксперимента;
- в системах сбора, подготовки и предварительной обработки информации;
- в многомашинных вычислительных системах в качестве концентраторов и коммутаторов сообщений;
- в иерархических, децентрализованных управляющих структурах с микро-ЭВМ «Электроника-60» и другими, расположенными непосредственно у технологического оборудования.

Программное обеспечение УВК СМ-3 и СМ-4 строится как универсальная, многоцелевая система, включающая в себя перфолентную и дисковую операционные системы, перфолентную и дисковую системы реального времени, средства программирования и отладки, средства проверки и тестирования оборудования, проблемно-ориентированные пакеты прикладных программ.

Полная программная совместимость процессора СМ-3П с процессором УВК М-400 позволяет без каких-либо переделок использовать в СМ-3 прикладные программы, разработанные пользователями УВК М-400.

Достижения в области технологии микроэлектроники, прогресс в повышении уровня интеграции полупроводниковых интегральных схем привели к созданию нового класса функциональных приборов, построенных на базе больших интегральных схем (БИС) — микропроцессоров. Микропроцессор (МП) - это функционально законченное устройство с фиксированным интерфейсом, построенное на одно- или

многокристальных БИС, состоящее из арифметическо-логического устройства (АЛУ), внутренних регистров микропрограммного или жесткого управления, предназначенного для реализации заданной системы команд.

С появлением МП на БИС созданы микропроцессорные семейства БИС и микропроцессорные системы (МПС), а добавление к МП внешних блоков памяти и блоков ввода - вывода позволило реализовать новый класс миниатюрных вычислительных машин – микро-ЭВМ.

Микро-ЭВМ – это конструктивно завершённая МПС на БИС, оформленная в виде автономного прибора с собственным источником питания, интерфейсом, устройствами ввода - вывода и комплектом программного обеспечения. Характерными особенностями микро-ЭВМ являются: малая разрядность обрабатываемых слов (4, 8, 12, 16); узкий (слаборазвитый) интерфейс, состоящий не более чем из 34 линий и позволяющий вести обмен информацией с внешней средой; общий интерфейс для оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и внешних устройств (ВУ); отсутствие внешних устройств или их малое число; селекторный режим обмена информацией с внешними устройствами; однопрограммный режим работы; низкая стоимость; высокая надёжность и малые габаритные размеры.

Развитие микро-ЭВМ идет по двум основным направлениям: первое – создание узкоспециализированных микро-ЭВМ; второе – создание микро-ЭВМ общего назначения для решения определенного класса задач.

В настоящее время у нас в стране выпускается ряд микро-ЭВМ, используемых при локальной автоматизации технологических процессов, в АСУ ТП и в автоматизированных системах более высоких уровней. Широкое применение нашли микро-ЭВМ типов «Электроника-60», ДЗ-28, «Искра-1256» и некоторые другие.

Появление микро-ЭВМ сразу же оказало большое влияние на структуру управляющих систем реального времени, предназначенных для сбора и регистрации данных, автоматического контроля и управления промышленным оборудованием и технологическими процессами. Наличие микро-ЭВМ позволяет перейти к созданию децентрализованных автоматизированных систем управления, которые строятся по иерархическому принципу. При этом микро-ЭВМ, реализующие функции локального управления, располагаются в непосредственной близости от объекта управления, а общее управление всей системой осуществляется центральной малой ЭВМ, которая контролирует состояние локальных микро-ЭВМ и вмешивается в управление в предаварийных и аварийных ситуациях. Локальные микро-ЭВМ рабо-

тают независимо либо взаимосвязано друг с другом, осуществляют получение информации с датчиков, производят обработку поступившей информации, формируют и реализуют управляющие воздействия.

Одним из наиболее перспективных и первоочередных направлений использования микро-ЭВМ в АСУ ТП на предприятиях является локальное управление одним или несколькими контурами в многоконтурной системе управления.

Пример управления одним из технологических параметров поясняется схемой, приведенной на рис. 2.7.

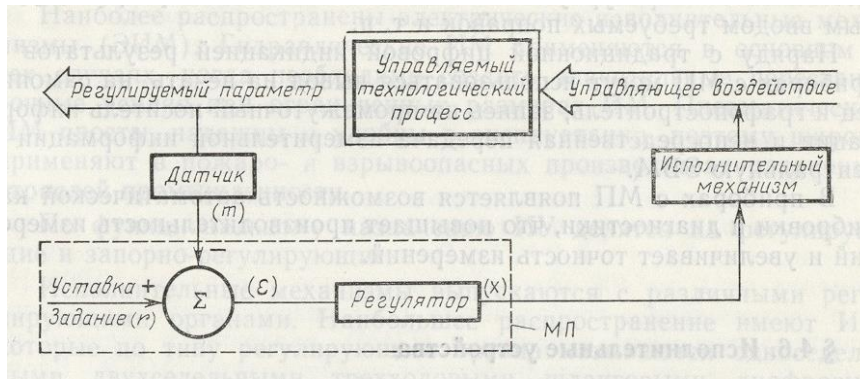


Рис. 2.7. Структурная схема простейшего контура автоматического регулирования с использованием микро-ЭВМ

Датчик измеряет величину регулируемой переменной управляемого процесса и преобразует эту величину в электрический сигнал m , поступающий на вход регулятора. Регулятор определяет значение отклонения измеренного значения регулируемой переменной m от ее заданного значения r ($\varepsilon = r - m$) и вырабатывает управляющий сигнал x , который усиливается и подается на исполнительный механизм. Последний реализует управляющее воздействие. Цель управления, как правило, заключается в том, чтобы выработать управляющее воздействие x , минимизирующее ошибку ε .

Использование аналогового регулятора обеспечивает достаточно точное непрерывное управляющее воздействие. Однако несколько таких регуляторов, установленных на технологическом оборудовании, не могут взаимодействовать между собой в вести себя как единое целое. Избавиться от этих недостатков можно с помощью микро-ЭВМ, включив её в цепь обратной связи контура регулирования и заменив ею конкретные средства, обведённые пунктирной линией (МП).

Программируемые средства микро-ЭВМ в контуре регулирования позволяют реализовать линейный (при необходимости взаимосвязанный, программный) закон управления и обеспечивают выполнение следующих операций:

Управление цифровых образовательных технологий

- считывание заданного и измеренного значений регулируемой переменной;
- определение их разности;
- выработка управляющего воздействия в соответствии с заложенной программой;
- передача вычисленного значения x к цифроаналоговому преобразователю и далее на исполнительный механизм.

Использование микро-ЭВМ в контуре управления имеет ряд преимуществ по сравнению с использованием аналоговых регуляторов. Эти преимущества заключаются в том, что микро-ЭВМ одинаково хорошо работают как в линейных, так и нелинейных системах управления, не требуя, как это необходимо при использовании аналоговых регуляторов, дополнительной аппаратуры. Все вычисления производятся по машинным программам, которые могут быть при необходимости изменены.

Микро-ЭВМ может регулировать процесс при изменяющемся во времени задании (законе регулирования) также без подключения дополнительной аппаратуры, без вмешательства человека. При использовании микро-ЭВМ легко осуществляется изменение коэффициентов усиления контура регулирования, что требуется при реализации некоторых нелинейных законов регулирования. Включение в контур регулирования микро-ЭВМ позволяет организовать взаимодействие нескольких контуров между собой, которые ведут себя как единое целое, оптимизируя протекание процесса в целом. Контроль работы системы регулирования проводится микро-ЭВМ по программе, в состав которой входят тестовые и диагностические стандартные подпрограммы. И, наконец, передача цифровой информации в контуре управления осуществляется с меньшей вероятностью появления ошибок, чем при передаче аналогового сигнала.

В измерительной технике также налицо тенденция к переходу от аналоговых методов измерения к дискретным, что позволяет повысить точность измерений и снизить трудоемкость измерительных операций.

Применение МП позволит управлять достаточно сложной последовательностью измерительных операций, осуществлять автоматическое переключение диапазонов и режимов работы, осуществлять вычисление искомой величины по результатам косвенных измерений, усреднять результаты большого числа измерений, осуществлять температурную компенсацию показаний программируемым вводом требуемых поправок и т. п.

Наряду с традиционной цифровой индикацией результатов в приборах с МП могут использоваться вывод на печать, на самописец и графопостроитель, запись на промежуточный носитель информации и непосредственная передача измерительной информации в центральную ЭВМ.

В приборах с МП появляется возможность автоматической калибровки и диагностики, что повышает производительность измерений и увеличивает точность измерений.

6. Исполнительные устройства

Устройства использования командной информации для воздействия на процесс – исполнительные устройства (ИУ) – предназначены для воздействия на объект управления в соответствии с сигналом командной информации, подаваемым на его вход от управляющего устройства. Выходным параметром ИУ является расход вещества или энергии. ИУ состоят из двух основных функциональных блоков: регулирующего органа (РО), непосредственно воздействующего на процесс изменением количества подаваемого вещества или энергии, и исполнительного механизма (ИМ), предназначенного для управления регулирующим органом в соответствии с командной информацией, получаемой от управляющего устройства.

Правильность выбора и соответствие рабочей характеристики ИУ поставленным перед системой автоматизации требованиям особенно существенны, поскольку ИУ является конечным устройством воздействия АСУ на регулируемый процесс.

К основным параметрам, характеризующим исполнительные устройства, относятся: вид вспомогательной энергии, за счет которой создается перестановочное усилие (энергии питания); вид энергии – носителя командного сигнала; величины условной пропускной способности; пропускная (расходная) характеристика; рабочее давление и перепад давления на исполнительном устройстве; физико-химические свойства среды, для которой предназначено устройство.

Отечественной промышленностью разработаны и выпускаются исполнительные механизмы (ИМ) всех ветвей ГСП - пневматические, гидравлические, электрические и без использования вспомогательной энергии. Для обеспечения совместности ИУ ГСП с управляющими устройствами, принадлежащими к различным ветвям, применяются преобразователи унифицированных сигналов ГСП – электропневматические, электрогидравлические, пневмоэлектрические.

В зависимости от конструктивных особенностей привода и используемой энергии исполнительные механизмы делятся на: а) пневматические мембранные и поршневые; б) гидравлические мембранные и поршневые; в) электрические и специальные.

Наиболее распространены электрические исполнительные механизмы (ЭИМ). Гидравлические ИМ применяются в основном в тех случаях, когда необходимо создать значительные перестановочные усилия при ограниченных размерах ИМ. Пневматические ИМ просты, надёжны и удобны в эксплуатации, поэтому широко применяют в пожаро - и взрывоопасных производствах различных отраслей промышленности.

По функциональному назначению ИУ делятся на регулирующие и запорно-регулирующие.

Исполнительные механизмы выпускаются с различными регулирующими органами. Наибольшее распространение имеют ИУ, которые по типу регулирующего органа называются односедельными, двухседельными, трёхходовыми, шланговыми, диафрагмовыми и заслоночными.

Основная классификация регулирующих органов, которые можно комплектовать с различными исполнительными механизмами, ведётся по величине условной пропускной способности. По этому признаку РО делятся на четыре группы: РО больших расходов – регулирующие заслонки с условной пропускной способностью от 40 до 250000 м³/ч (условные проходы от 50 до 1000 мм); РО средних расходов – регулирующие заслонки с условной пропускной способностью от 2 до 5000 м³/ч (условные проходы от 10 до 300мм); РО малых расходов – регулирующие клапаны с условной пропускной способностью от 0,1 до 4,0 м³/ч (условные проходы от 6 до 25 мм); РО микрорасходов – регулирующие клапаны с условной пропускной способностью от 0,1 м³/ч и менее и условным проходом 10 мм и менее.

Перемещение затвора одно- и двухседельных, трёхходовых, шланговых и диафрагмовых клапанов – поступательное, перемещение заслонок и шаровых кранов - вращательное.

Отечественным приборостроением выпускаются электрические исполнительные механизмы (ЭИМ) постоянной скорости 22 типоразмеров, 61 модификации, главным образом однооборотные с моментом силы на выходном валу от 6,3 до 1600 Н·м.

