



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Авиационный колледж

## Методические указания

# ПМ.04 «Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов»

Автор  
Смирнов Ю. А.

Ростов-на-Дону, 2019

## Аннотация

Методические указания по ПМ.04 «Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов». Технология формирования систем автоматического управления типовых технологических процессов, средств измерений, несложных мехатронных устройств и систем предназначены для студентов всех форм обучения специальностей 15.02.07. Автоматизация технологических процессов и производств

## Автор



**к.т.н., доцент, преподаватель 1 категории авиационного колледжа ДГТУ Смирнов Юрий Александрович.**



## Оглавление

Практическое занятие	Тема	1.1.4.	Расчет	электроприводных мехатронных модулей	6
Практическое занятие	Тема	1.1.5.	Расчет	электроприводных мехатронных модулей	16
Практическое занятие	Тема	1.1.6.	Расчет	электроприводных мехатронных модулей	85
Практическое занятие	Тема	1.1.7.	Расчет	электроприводных мехатронных модулей	112
Практическое занятие по теме	1.2.4.	Выбор исполнительного двигателя ЭММ			140
Практическое занятие	Тема	1.2.6.	ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭММ		144
Практическое занятие	Тема	1.2.8.	ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ		153
Практическое занятие	Тема	1.2.10.	ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ		167
Практическое занятие	Тема	2.1.3.	Пакет Simulink – визуальная среда проектирования мехатронных систем		204
Практическое занятие	Тема	2.1.5.	Представление математического описания и динамические характеристики объектов управления		240
Практическое занятие	Тема	2.2.2.	Активные элементы силовых полупроводниковых преобразователей в пакете Sim Power System		260
Практическое занятие	Тема	2.2.2.	Активные элементы силовых полупроводниковых преобразователей в пакете Sim Power System		270
Практическое занятие	Тема	2.2.4.	Полупроводниковые элементы силовых полупроводниковых преобразователей в пакете Sim Power System		289
Практическое занятие	Тема	2.2.5.	Модельное исследование устройств силовой электроники (управляемые выпрямители)		313

Практическое занятие Тема 2.2.6. Модельное исследование устройств силовой электроники (преобразователи постоянного напряжения).....	342
Практическое занятие Тема 2.2.7. Модельное исследование устройств силовой электроники (автономные инверторы) .....	362
Практическое занятие Тема 2.2.8. Модельное проектирование вторичных источников питания для силовых полупроводниковых преобразователей	387
Практическое занятие Тема 2.3.1. Математическое описание и модели машин постоянного тока и асинхронных машин .....	411
Практическое занятие Тема 2.3.2. Математическое описание и модели синхронных машин в пакете SIM POWER SYSTEM .....	424
Практическое занятие Тема 2.3.3. Модельное проектирование мехатронных систем постоянного тока.....	433
Практическое занятие Тема 2.3.4. Математическая модель и синтез регуляторов.....	439
Практическое занятие Тема 2.3.5. Синтез регуляторов в следящей системе .....	451
Практическое занятие Тема 2.3.6. Виртуальная модель системы и ее исследование .....	463
Практическое занятие Тема 2.3.6. Виртуальная модель системы и ее исследоваие .....	467
Практическое занятие Тема 2.3.7. Исследование статических характеристик системы постоянного тока на виртуальной модели.....	471
Практическое занятие Тема 2.3.8. Стенды систем в Sim Power Sistem ..	474
Практическое занятие Тема 2.4.2. Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором .....	484
Практическое занятие Тема 2.4.3. Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором .....	489
Практическое занятие Тема 2.4.4. Моделирование асинхронных систем с частотным управлением .....	495
Практическое занятие Тема 2.4.5. Моделирование асинхронных систем с частотно-токовым управлением .....	501
Практическое занятие Тема 2.4.6. Моделирование асинхронных систем с векторным управлением .....	504

Практическое занятие Тема 2.4.7. Моделирование асинхронных систем с векторным управлением .....	508
Практическое занятие Тема 2.4.8. Виртуальная модель и стенды асинхронной системы .....	512
Практическое занятие Тема 2.5.2. Моделирование вентильного двигателя .....	528
Практическое занятие Тема 2.5.3. Моделирование связей и характеристик вентильного двигателя .....	531
Практическое занятие Тема 2.5.4. Моделирование датчика положения ротора и преобразователя координат .....	536
Практическое занятие Тема 2.5.5. Моделирование вентильного двигателя с инерционным каналом.....	539
Практическое занятие Тема 2.5.6. Исследование виртуальной модели вентильного двигателя .....	547
Практическое занятие Тема 2.5.7. Синтез регуляторов в системе с ВД .	554
Практическое занятие Тема 2.5.8. Синтез регуляторов в виртуальной системе и ее моделирование.....	565
Практическое занятие по теме №4.3. Программное обеспечение рабочих станций .....	595
Практическое занятие по теме №4.3.4. Промышленные сети: архитектура, оборудование, характеристики.....	626
Практическое занятие по теме №4.4.3. Интегрированная среда разработки проекта MASTER SCADA .....	660
Практическое занятие по теме №4.4.4. Интегрированная среда разработки проекта MASTER SCADA .....	694
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ по теме 4.5.4. Примеры применения технологии АСМ .....	745

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 1.1.4. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

### ВОПРОСЫ

1. Определение мощности двигателя.
2. Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при незначительных и значительных динамических нагрузках.
3. Оптимизация выбора силовых элементов.

### 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.
2. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей: учеб.пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 336 с. (Л4 с.73-80).

### 1. Определение мощности двигателя

Определение требуемой мощности двигателя, или, по [1], энергетический расчет, является важной частью процесса конструирования ММ и направлен на рациональный выбор двигателя и преобразователя движения (совокупность двигателя и преобразователя движения далее будет называться **приводом**), которые обеспечивают заданные законы движения выходного звена. Необходимо учитывать, что привод определяет энергетические свойства модуля и его кинематические и динамические характеристики и при этом является весьма дорогостоящим, энерго- и материалоемким узлом. Поэтому следует стремиться обеспечить заданные характеристики ММ с одновременной минимизацией стоимости, мощности и массы привода.

Методика энергетического расчета ММ определяется заданными режимами движения и информацией о параметрах нагрузки. С этой точки зрения можно выделить два основных варианта постановки за-

дачи расчета ММ, которые наиболее часто встречаются в инженерной практике.

В **первом варианте** проводят проектирование **специализированного** ММ как составляющей части мехатронной системы. При таком подходе конструктор с помощью специальных расчетов получает детальную информацию об объекте: законе его движения во времени, характеристиках нагрузки (включая ее составляющие), массогабаритных параметрах объекта, условиях эксплуатации и т. д. Наличие полной информации о нагрузке позволяет оптимизировать параметры привода.

Методики энергетического расчета и оптимизации специализированных ММ можно найти в специальной литературе [9, 10].

**Второй вариант** предусматривает создание **универсального** ММ как функционально самостоятельного изделия, которое в дальнейшем может быть использовано в мехатронных системах различного назначения и конструктивного исполнения. В этом случае конструктор не имеет полной информации о характере нагрузки и законе движения объекта во времени. Энергетический расчет проводят для типового закона перемещения выходного звена модуля по предельным значениям нагрузки, скорости и ускорения движения.

Ниже будет рассмотрен энергетический расчет универсального ММ.

### **2.1. Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при незначительных динамических нагрузках**

Рассмотрим методику расчета универсального ММ при незначительных динамических нагрузках, когда силы инерции значительно

меньше внешних сил, действующих на ММ. В этом случае основными исходными данными являются:

- структурная схема мехатронного модуля;
- приложенная внешняя нагрузка (сила  $F_H$  или вращающий момент  $T_H$ );  
— требуемая скорость (линейная  $v_{\text{вых}}$  или угловая  $\omega_{\text{вых}}$ ) выходного звена.

Для ММ поступательного движения требуемую мощность двигателя, Вт, определяют по формуле

$$P = F_H v_{\text{вых}} K_{\text{дин}} / \eta, \quad (3.1)$$

где  $F_H$  — усилие сопротивления на выходном звене, Н;  $v_{\text{вых}}$  — линейная скорость выходного звена, м/с;  $\eta$  — коэффициент полезного действия преобразователя движения;  $K_{\text{дин}} = 1,1 \dots 1,3$  — коэффициент запаса, учитывающий влияние динамических нагрузок в период разгона и торможения.

$$P = T_H \omega_{\text{вых}} K_{\text{дин}} / \eta, \quad (3.2)$$

где  $T_H$  — момент сопротивления на выходном звене, Н·м;  $\omega_{\text{вых}}$  — угловая скорость выходного звена,  $\text{с}^{-1}$ .

Формулу (3.2) следует использовать с учетом предполагаемого типа двигателя. В том случае, если двигатель способен развивать пусковой момент, значительно превышающий номинальный, коэффициент  $K_{\text{дин}}$  может быть принят равным единице. В частности, это касается асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором 4А и АИР, приведенных в табл. 2.2, которые имеют отношение пускового момента к номинальному не менее двух.

Так как двигатели одной и той же мощности имеют разные номинальные вращающие моменты  $T_{\text{ном}}$ , то необходимо определить требуемый момент двигателя, Н·м:

$$T_{\text{д.тр}} = T_{\text{H}}/(u\eta), \quad (3.3)$$

где  $u$  — передаточное отношение преобразователя движения.

Окончательно тип двигателя выбирают по каталогам исходя из условий:

$$P_{\text{д}} \geq P; \quad (3.4)$$

$$T_{\text{ном}} \geq T_{\text{д.тр}}. \quad (3.5)$$

Предварительный выбор вентильного бесконтактного моментного двигателя серии ДБМ осуществляют для ММ без преобразователя движения по пусковому моменту  $T_{\text{п}}$ , равному статическому синхронизирующему моменту  $T_{\text{с}}$  (см. табл. 2.4), для ММ с преобразователем движения — по приведенной выше методике.

Для ММ, работающих в повторно-кратковременном режиме, должна быть задана циклограмма нагружения (рис. 3. 1).

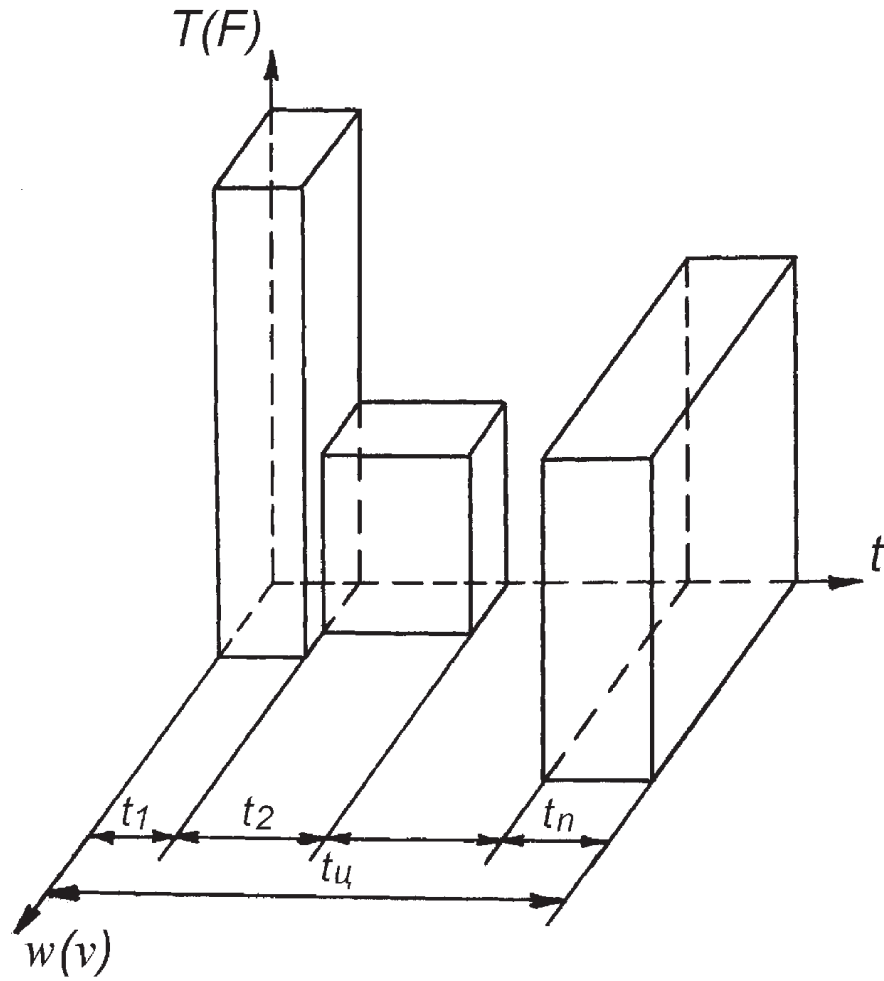


Рис. 3.1. Циклограмма нагружения мехатронного модуля

В этом случае, учитывая, что время разгона и торможения значительно меньше времени установившегося движения, можно определить значение требуемой среднеквадратичной статической мощности, приведенной к валу двигателя, Вт:

$$P_C = \sqrt{\sum_{K=1}^n P_{CK} \cdot \frac{\omega_{\text{в}}}{\omega_{PK}} \cdot t_{PK}^2} \cdot K_{\text{т}} \quad (3.6)$$

где  $P_{CK}$  — требуемая статическая мощность двигателя на  $K$ -м рабочем участке нагрузочной циклограммы двигателя, Вт; для ММ линейного движения

$$P_{CK} = F_{HK} v_K / \eta, \quad (3.7)$$

где  $F_{HK}$  — сила сопротивления на  $K$ -м рабочем участке циклограммы, Н;  $v_K$  — линейная скорость выходного звена на  $K$ -м рабочем участке циклограммы, м/с; для ММ вращательного движения

$$P_{CK} = T_{HK} \omega_K / \eta, \quad (3.8)$$

где  $T_{HK}$  — момент сопротивления на  $K$ -м рабочем участке циклограммы, Нм;  $\omega_K$  — угловая скорость выходного звена на  $K$ -м рабочем участке циклограммы,  $c^{-1}$ ;  $n$  — число включенных состояний двигателя за цикл;  $\omega_{НОМ}$  — номинальная скорость вращения вала двигателя,  $c^{-1}$ ;  $\omega_{PK}$  — рабочая скорость вращения вала двигателя на  $K$ -м рабочем участке циклограммы,  $c^{-1}$ ;  $t_{PK}$  — длительность  $K$ -го рабочего участка циклограммы, с;  $\beta_{w_k}$  — коэффициент, учитывающий теплоотдачу при понижении скорости вращения двигателя по отношению к номинальной, вызванное условиями обеспечения требуемого технологического процесса, определяемый по формуле

$$\beta_{w_k} = \beta_o + (1 - \beta_o) \frac{\omega_{PK}}{\omega_{НОМ}}, \quad (3.9)$$

где  $\beta_o = 0,7 \dots 0,78$  — для двигателей закрытого исполнения.

Требуемый среднеквадратичный момент двигателя

$$T_c = \frac{\sum_{k=1}^n T_{HK}^2 \cdot t_{PK}^2}{\sum_{k=1}^n t_{PK}} \quad (3.10)$$

Тип двигателя выбирают по каталогам, исходя из следующих условий:

$$P_d \geq P_c; \quad (3.11)$$

$$T_{НОМ} \geq T_c. \quad (3.12)$$

## 2.2. Энергетический расчет универсального мехатронного модуля при значительных динамических нагрузках

Исходными данными при расчете универсального ММ при значительных динамических нагрузках являются:

- структурная схема ММ;
- приложенная внешняя нагрузка  $M_H$  ( $T_H$  или  $F_H$ );
- требуемая скорость (линейная  $v_{ВЫХ}$  или угловая  $\omega_{ВЫХ}$ ) выходного звена;

- момент инерции  $J_H$  (масса  $m_H$ ) объекта управления;
- требуемое ускорение  $E_{\text{вых}}$  (угловое  $\varepsilon_{\text{вых}}$  или линейное  $a_{\text{вых}}$ ) выходного звена.

Длительность разгона и торможения значительно меньше периода установившегося движения, поэтому динамические нагрузки оказывают влияние на работу двигателя очень короткий промежуток времени. Это дает возможность определить мощность двигателя и предварительно его выбрать по методике, изложенной выше, т. е. без учета динамических нагрузок.

Влияние динамических нагрузок на величину момента двигателя может быть значительным. Поэтому необходимо определить требуемый момент двигателя с учетом динамических нагрузок по формуле

$$T_{\text{д.тр.мах}} = \frac{T_H + T_{\text{дин}}}{\eta}, \quad (3.13)$$

где  $T_{\text{дин}}$  — динамический момент, вызванный ускоренным движением вращающихся частей ММ и объекта управления, приведенный к выходному звену, Н·м, равный

$$T_{\text{дин}} = (J_d \omega^2 + J_{\text{пд}} + J_H) \varepsilon_{\text{вых}}, \quad (3.14)$$

$J_d$  — момент инерции ротора двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $J_{\text{пд}}$  — момент инерции вращающихся частей преобразователя движения, кг·м<sup>2</sup>, равный

$$J_{\text{пд}} \approx (0,1 \dots 0,3) J_d \omega^2, \quad (3.15)$$

$J_H$  — момент инерции объекта управления, кг·м<sup>2</sup>.

Окончательно тип электродвигателя выбирают по стандартам исходя из условий:

$$P_d \geq P; \quad (3.16)$$

$$T_{\text{ном}} \geq T_{\text{д.тр}}; \quad (3.17)$$

$$T_{\text{д.мах}} \geq T_{\text{д.тр.мах}}, \quad (3.18)$$

где  $T_{\text{д.мах}}$  — максимальный момент двигателя (задается в стандартах).

При отсутствии данных приближенно можно принимать

$$T_{д.мах} \approx (2, 0 \dots 2, 2) T_{ном}. \quad (3.19)$$

Возвращаясь к комментарию к формуле (3.2), можно сделать вывод, что все двигатели 4А и АИР из табл. 2.2 удовлетворяют условию (3.19).

В случае невыполнения указанных условий необходимо выбрать двигатель с большим максимальным вращающим моментом.

### 3. Оптимизация выбора силовых элементов

Выбор варианта привода (двигателя и преобразователя движения) ММ может быть осуществлен неоднозначно, поэтому при его конструировании следует стремиться к оптимальному решению. Необходимо выбрать **критерий оценки качества** варианта. Оптимальным считается тот, которому соответствует экстремальное значение критерия.

В инженерной практике в качестве критериев оптимизации применяют различные показатели:

- время перемещения выходного звена на заданное расстояние;
- время согласования скорости выходного звена с заданным значением;
- минимизация массы и габаритов ММ;
- энергопотребление ММ при выполнении типовых движений.

Результат конструирования в значительной степени зависит от того, насколько удачно разработчик выберет необходимый критерий. Например, выбор в качестве критерия максимального углового ускорения  $\epsilon_{мах}$  выходного звена ориентирован на ММ, работающие в составе высокопроизводительного оборудования. Для осуществления поставленной задачи необходимо определить оптимальное передаточное отношение преобразователя движения [1] по формуле

$$\frac{T_H}{\eta \cdot T_{д.макс}} + \sqrt{\left( \frac{T_H}{\eta \cdot T_{д.макс}} \right)^2 + \frac{J_H}{J_{л.пл}}} \quad (3.20)$$

Требуемый максимальный момент двигателя определяют в виде

$$T_{д.тр. макс} = \frac{2}{\eta} \sqrt{J_{д.пл} \varepsilon_{макс} (J_H \varepsilon_{макс} + T_H)}, \quad (3.21)$$

где  $J_{д. пл}$  — момент инерции ротора двигателя и приведенный к валу двигателя момент инерции преобразователя движения

$$J_{д.пл} \approx (1,1...1,3)J_{д}. \quad (3.22)$$

Для выбора типа электродвигателя необходимо выполнение условия

$$T_{д.макс} \geq T_{д.тр.макс}. \quad (3.23)$$

Если условие (3.23) не выполняется, необходимо выбрать двигатель с большим максимальным вращающим моментом.

Для выбранного привода с оптимальным передаточным отношением необходимо выполнение условия

$$\omega_{ном} / u_{опт} \geq \omega_{вых}. \quad (3.24)$$

При невыполнении условия (3.24) необходимо выбрать двигатель с большими скоростными возможностями и провести перерасчет мехатронного модуля.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 1.1.5. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

### ВОПРОСЫ

1. Расчет преобразователя движения:
  - 1.1. Предварительный выбор передачи по общим критериям.
  - 1.2. Особенности расчета преобразователей движения мехатронных модулей.

### 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.
4. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей: учеб.пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 336 с. (Л4 с. 80-136).

### **1. Расчет преобразователя движения** **1.1. Предварительный выбор передачи по общим критериям**

**Критерием для выбора передачи** называется техническое требование к ММ, позволяющее выделить из перечня механических передач те, конструкции которых позволяют обеспечить его выполнение [11].

Если же техническое требование может быть реализовано передачами различных типов, то критерием для выбора оно, очевидно, являться не может. Например, практически все передачи с жесткими звеньями способны обеспечить перемещение рабочего органа с точностью  $\pm 1\text{мм}$ . Следовательно, подобное техническое требование не может служить основанием для выбора передачи конкретного типа, т. е. не входит в число критериев.

С ужесточением технического требования до некоторого предела оно переходит в разряд критериев. Пусть техническим требованием оговаривается точность перемещения рабочего органа  $\pm 0,01$  мм. В этом случае оно, безусловно, является критерием, которому удовлетворяет далеко не каждая передача.

Критерии подразделяются на **общие** и **специальные**.

Общими называются критерии, входящие в техническое задание практически любого ММ. К ним относятся:

- передаточное отношение преобразователя движения;
- КПД;
- вид движения и скорость (линейная или угловая) рабочего органа;
- максимальные допустимые габариты и масса;
- обусловленные заказчиком стоимость изготовления и эксплуатационные расходы.

Специальными называются критерии, обусловленные техническими требованиями, которые связаны с конкретным назначением ММ. К ним относятся:

- допустимая кинематическая погрешность перемещений рабочего органа;
- допустимая величина мертвого хода (для реверсивного ММ);
- обеспечение самоторможения;
- прочие критерии (определенная конфигурация, способ крепления и др.).

В ряде случаев выбор передачи может быть произведен уже на основании анализа общих критериев.

Передаточное отношение — один из важнейших параметров передачи (применительно к зубчатым, червячным, планетарным и волновым передачам используется термин передаточное число).

Для обеспечения заданного передаточного отношения часто применяют многоступенчатые передачи. Например, передаточное число цилиндрической зубчатой передачи в принципе не ограничено. Однако, начиная уже с  $u = 6,3$ , целесообразно от одноступенчатой передачи перейти к двухступенчатому редуктору. Конструкция усложняется, но становится компактной и малогабаритной, что благоприятно сказывается на ММ в целом. Существенный эффект увеличения передаточного числа дают комбинации из передач различных типов, например, червячной и зубчатой цилиндрической. Червячно-цилиндрический редуктор без особых трудностей может быть выполнен с  $u = 315$ .

Передачи винт-гайка скольжения (ВГС), шарико-винтовые (ШВП) и реечные, предназначенные для преобразования вращательного движения в поступательное или, наоборот, поступательного во вращательное, характеризуются передаточным отношением, имеющим размерность.

$$u_{ВП} = \omega_1 / v_2, \quad (3.25)$$

при преобразовании поступательного движения во вращательное

$$u_{ПВ} = v_2 / \omega_1, \quad (3.26)$$

где  $\omega_1$  — угловая скорость вращающегося звена,  $c^{-1}$ ;  $v$  — скорость движения поступательно перемещающегося звена, м/с.

Для ММ, предназначенного к эксплуатации при больших нагрузках и в напряженном режиме, (большая продолжительность включения, высокие скорости рабочего органа) существенным становится такой критерий, как КПД. Помимо того, что от его величины зависят энергозатраты ММ, нужно также принимать во внимание следующее соображение.

Низкий КПД характерен для передач, работа которых сопровождается интенсивным относительным скольжением звеньев, т. е. червячной и ВГС. Эксплуатация таких передач в тяжелом режиме со-

проводится комплекс отрицательных последствий: быстрым абразивным износом контактирующих поверхностей, нагревом, увеличением кинематической погрешности и мертвого хода.

Не все передачи способны обеспечить требуемую быстроходность рабочего органа ММ. Трудности при конструировании возникают не только тогда, когда задана высокая скорость выходного звена, но и когда нужно придать ему сверхнизкую, так называемую ползучую скорость. В последнем случае может существовать принципиальная возможность использования, например, многоступенчатого цилиндрического зубчатого редуктора, но это будет настолько громоздкий механизм, что он не пройдет по критериям габаритов и стоимости изготовления.

Смысл последних двух критериев — максимальные допустимые габариты и масса, стоимость изготовления и эксплуатационные расходы — понятен и пояснений не требует. Оценка по ним требует от конструктора умения сопоставить передачи хотя бы качественно, по принципу «больше — меньше», что, в свою очередь, подразумевает представление о технологии изготовления передач. При ориентировочном определении массы могут помочь эмпирические зависимости массы различных типов редукторов от их главного параметра: одноступенчатый цилиндрический редуктор

$$m = 8000a_w^{2,5}, \quad (3.27)$$

двухступенчатый цилиндрический редуктор

$$m = 10240a_{wT}^{2,5}, \quad (3.28)$$

коническо-цилиндрический редуктор

$$m = 12300a_{wT}^{2,5}, \quad (3.29)$$

червячный редуктор

$$m = 15600a_w^{2,5}, \quad (3.30)$$

где  $m$  — масса редуктора, кг;  $a_w$  — межосевое расстояние, м;  $a_{wT}$  — межосевое расстояние тихоходной ступени, м.

Формулы (3.27) — (3.30) получены для редукторов с чугунными корпусами. При выполнении корпуса из сплава на основе алюминия значение массы уменьшается в 1,5 – 2 раза.

Значения некоторых общих критериев, характерные для различных механических передач, приведены в табл. 3.1, 3.2.

Таблица 3.1

**Значения общих критериев для передач вращения**

Передача	Критерий		
	$i$	КПД	$\omega_{po}, c^{-1}$
Зубчатая цилиндрическая	1...12,5 (1...6,3)	0,98	150...12 (150...23,8)
Цилиндрический двухступенчатый редуктор	6,3...63 (8...40)	0,96	23,8...2,38 (18,8...3,75)
Зубчатая коническая	1...5	0,97	150...30
Коническо-цилиндрический редуктор	10...40 (10...31,5)	0,95	15...3,75 (15...4,76)

Окончание табл. 3.1

Передача	Критерий		
	$i$	КПД	$\omega_{po}, c^{-1}$
Планетарная схемы 2К-Н	3...9 (4...6)	0,97	50...16,7 (37,5...25)
Волновая	63...400 (80...315)	0,87...0,81	2,38...0,375 (1,88...0,476)
Червячная	8...80 (10...32)	0,95...0,7	18,8...1,88 (15...4,69)

1.  $\omega_{po}$  — угловая скорость рабочего органа при угловой скорости вала двигателя  $150 c^{-1}$ .  
2. В скобках указаны диапазоны оптимальных значений.

Таблица 3.2

**Значения общих критериев для вращательно-поступательных передач**

Передача	Критерий		
	$u_{ВП}, m^{-1}$	КПД	$v_{po}, m/c$
Реечная	10...200	0,96	15 ( $\leq 1,0$ )
Винт-гайка скольжения	150...3000	$\leq 0,7$	1,6 ( $\leq 0,1$ )
Шарико-винтовая	150...3000 (300...2000)	0,9...0,95	3,0 ( $\leq 1,0$ )

1.  $v_{po}$  — максимальная скорость рабочего органа.  
2. В скобках указаны диапазоны оптимальных значений.

Комментируя данные табл. 3.1, следует отметить, что многоступенчатые планетарные редукторы чаще всего образуются путем последовательного соединения передач схемы 2К-Н. В ряде случаев целесообразен синтез преобразователя движения в виде комбинации передач различных типов, как это уже было показано на примере червячно-цилиндрического редуктора.

Определение граничных значений критериев для оценки вращательно-поступательных передач затруднительно. В первую очередь это касается передачи ВГС (и вообще характерно для передач с интенсивным скольжением рабочих поверхностей). Величины КПД передач лежат в очень широких пределах. Значение КПД, приведенное в табл. 1.2, является максимальным, обычно же оно не превышает 0,5.

То же можно сказать и о величине скорости рабочего органа. Оптимальное значение для передачи ВГС  $u_{po} < 0,1 \text{ м/с}$  получено по наибольшему значению скорости относительного скольжения в винтовой паре  $u_{ск} = 0,25 \text{ м/с}$ , приведенной в [12]. Диапазон оптимальных значений для ШВП  $u_{po} < 1,0 \text{ м/с}$  получен при допущении, что частота вращения винта  $n_B < 3000 \text{ об/мин}$ .

Оценка передач по общим критериям невозможна без знания их конструктивных и технологических особенностей.

**Цилиндрическая зубчатая передача** может быть выполнена с внешним либо с внутренним зацеплением. Передача с внутренним зацеплением имеет меньшие габариты, но конструктивно и технологически сложнее передачи с внешним зацеплением, поэтому ее применение должно быть обосновано.

Во всех случаях следует стремиться к использованию косозубых передач: они имеют меньшие габариты и способны обеспечивать окружные скорости до 30 м/с при незначительном технологическом усложнении.

Для получения наименьших габаритов двухступенчатого редуктора важно правильно распределить общее передаточное число между ступенями (табл. 3.3 и 3.4). Значения общего передаточного числа  $i$ , а также передаточных чисел быстроходной ступени  $i_B$  и тихоходной ступени  $i_T$  даны в соответствии со стандартным рядом.

Таблица 3.3

Передаточные числа ступеней трехосных цилиндрических редукторов											
$i$	10	12,5	14	16	18	20	22,4	25	28	31,5	$\geq 35,5$
$i_B$	3,55	4	4,5	5	5,6	6,3	7,1	8	9		
$i_T$	2,8	3,15			3,55			4	$\geq 4$		

Следует отметить, что от ММ, как правило, требуется точное выполнение задания в части передаточного числа, и отступление от стандарта допустимо.

В силу особенностей технологии изготовления **конических передач** рекомендуется выполнять их с передаточными числами  $i < 5$ . Это ограничение, в свою очередь, приводит к необходимости уже при  $i > 5$  использовать конические передачи в составе двухступенчатых, обычно коническо-цилиндрических, редукторов. Нагрузочная способность конических передач ниже (при равных массах), чем цилиндрических, поэтому конической делают быстроходную ступень.

Таблица 3.4

Передаточные числа ступеней соосных цилиндрических редукторов												
$i$	10	12,5	14	16	18	20	22,4	25	28	31,5	35,5	$\geq 40$
$u_B$	4,5	5	5,6	6,3	7,1	8	9	10				
$u_T$	2,24	2,5	2,8		3,15			3,55		$\geq 4$		

Учитывая это обстоятельство, а также то, что ММ, как правило, характеризуются компактностью и малыми размерами, далее будут рассматриваться передачи с внешними конусными расстояниями  $50 \text{ мм} < R_e < 100 \text{ мм}$ .

**Реечные передачи** наряду с ВГС и ШВП используются для преобразования вращательного движения в поступательное и так же, как ШВП, для преобразования поступательного движения во вращательное.

Преимуществами реечной передачи по сравнению с передачей ВГС являются высокий КПД и менее интенсивный износ деталей, а по сравнению с ШВП — простота конструкции и низкая стоимость. Однако, как это видно из табл. 3.2, ее передаточное отношение на 1—2 порядка меньше, чем у винтовых передач. Следовательно, реечная передача по сравнению с ними более скоростная.

**Червячные передачи** обычно выполняют с передаточными числами  $i > 8$ . Достоинствами червячных передач являются возможность реализации в одной ступени большого передаточного числа, плавность и бесшумность работы, обеспечение самоторможения при числе витков червяка  $z = 1$ .

Необходимо учитывать и недостатки червячных передач: относительно низкий КПД (особенно при больших  $i$ ), опасность перегрева, повышенный износ зубьев колеса.

На самоторможение червячной передачи можно рассчитывать в том случае, если нагрузка не имеет вибрационного характера.

Диапазон передаточных чисел **волновых зубчатых передач**:  $80 < i < 400$ .

Вследствие многопарности зацепления для этих передач характерны весьма малые значения кинематической погрешности и мертвого хода. При сравнительно малых габаритах и массе волновые передачи способны создавать на выходном звене крутящие моменты до 150 кНм. На волновом принципе основаны механизмы для передачи вращения в герметично закрытое пространство. В настоящее время волновые передачи представляются весьма перспективными, область их использования интенсивно расширяется.

Есть, однако, у волновых передач и серьезные недостатки, главный из которых — сложность изготовления, а это значит — высокая стоимость. Кроме того, максимальная частота вращения генератора волн (т. е. быстроходного вала) с гибким подшипником ограничивается температурой нагрева и для диаметров гибких колес 50,8.. 203 мм равна 3500 об/мин, а для диаметров 254.407 мм — 1750 об/мин. В ряде случаев это приводит либо к необходимости перехода на другую, менее совершенную конструкцию генератора волн, либо вообще к от-

казу от применения волновой передачи. Следует также указать высокую чувствительность передачи к качеству смазки, так как мелкие зубья (применяются модули 0,3,1,25 мм) в условиях интенсивного скольжения при наличии абразивных частиц быстро изнашиваются.

**Передачи ВГС** предназначены в основном для преобразования вращательного движения в поступательное и лишь в редких случаях — поступательного во вращательное.

Конструкции передач просты и технологичны. Передачи работают плавно и бесшумно, имеют высокую надежность, способны обеспечивать микроперемещения, при однозаходной резьбе обладают свойством самоторможения.

Недостатки передач: низкий КПД (обычно не выше 0,5) и интенсивный износ вследствие трения скольжения между витками винта и гайки.

**ШВП** обладают такими положительными качествами, как высокий КПД (0,9,0,95), небольшой износ, высокая точность хода, возможность работы без смазки. Однако по сравнению с передачей ВГС они значительно сложнее по конструкции и дороже. К недостаткам их также относится невозможность самоторможения.

Однако практически чаще всего используется, как было сказано выше, передача по схеме 2К-Н.

Планетарные передачи обладают удобной для применения в ММ конструктивной особенностью: они соосные. Это облегчает компоновку модулей и уменьшает их габаритные размеры.

Недостатки планетарных передач по сравнению с обычными цилиндрическими: сложность конструкции, повышенные требования к точности изготовления и монтажа, существенное снижение КПД с увеличением передаточного числа.

Весьма перспективны передачи, по конструктивной схеме подобные эксцентриково-планетарной, но с другим, не эвольвентным, зацеплением (например, планетарно-цевочным), позволяющим обойтись меньшими числами зубьев в паре «шестерня — колесо», а потому более простым в изготовлении [20].

Далее будут приведены методики расчета названных выше передач как преобразователей движения ММ.

### **1.2. Особенности расчета преобразователей движения мехатронных модулей**

В расчетах преобразователей движения ММ имеется ряд отличий от расчетов передач общего назначения вследствие значительной разницы в требованиях, предъявляемых к этим категориям механизмов.

Рассматривая же требования, следует, по-видимому, начать с такого фундаментального показателя, как стоимость изготовления.

Для передач общего назначения стоимость изготовления является одним из основных критериев выбора материалов и термообработки, технологии изготовления, средств и способов смазки и т. д., а размеры и масса отступают на второй план.

В передачах ММ, наоборот, выше ценится компактность, малые габариты и масса, а стоимость имеет гораздо меньшее значение. Отсюда — изготовление деталей передач из высокопрочных сталей, а корпусов — из легких сплавов и композитов, применение новейших разработок в области конструирования и эксплуатации механизмов и т. п.

Как правило, в техническом задании на передачу общего назначения отсутствуют какие-либо требования к точности перемещения рабочего органа. Приводы, в состав которых входят эти передачи, либо вообще не предназначены для отработки точных перемещений либо

достаточная для выполнения поставленной задачи точность обеспечивается специальными устройствами, а передачи «от ответственности освобождаются». Исключение составляют ВГС и ШВП, поскольку сама конструкция их способствует перемещениям с повышенной точностью.

Для преобразователей движения ММ требование кинематической точности и ограничение мертвого хода вполне типичны. Зачастую ММ как раз и предназначен для совершения перемещений с высокой точностью. А это, в свою очередь, накладывает отпечаток на расчет и саму конструкцию передачи. Изменяется вид сопряжения зубчатых колес, назначается более высокая степень точности, принимаются конструктивные меры для устранения радиальных и осевых зазоров в подшипниковых опорах.

В большинстве случаев передачи общего назначения разрабатываются в расчете на тяжелый и весьма тяжелый режимы эксплуатации. Это обуславливает наименьшие значения допускаемых напряжений, а в итоге — наибольшие размеры деталей передач.

Передачи ММ работают в основном в повторно-кратковременных режимах (легком и среднем). Появляется возможность повышения напряжений, что в совокупности с высокими прочностными характеристиками материалов приводит к уменьшению размеров ответственных деталей. Снижается их жесткость, растут упругие деформации и связанный с ними мертвый ход. Поэтому при расчете передаточных механизмов ММ необходимо уделять больше внимания вопросам жесткости деталей.

Следует отметить такую особенность, как более скрупулезное приведение размеров деталей передачи ММ в соответствие с результатами расчетов. В качестве примера этого положения может быть приведен вал колеса зубчатой передачи.

Согласно методике конструирования валов [ 14], диаметры участков вала назначают предварительно, а затем проверяют на усталостную прочность. Пусть при минимальном допуске запасе усталостной прочности  $[s]_{\min} = 1,6$  расчетный запас прочности в наиболее нагруженном сечении составил  $s = 4$ . Для передачи общего назначения результат считают удовлетворительным и размеры вала оставляют без изменений. Если же это передача ММ, к которому предъявляется жесткое требование минимизации массы, то необходимо решить вопрос о возможности приближения  $s$  к  $[s]$  путем уменьшения диаметров ступенек.

Разумеется, далеко не к каждому преобразователю движения ММ предъявляется весь комплекс названных выше требований. В случае, если по техническому заданию ММ подобен механизму общего назначения, то и расчет его передач может быть произведен по методике, изложенной в курсе «Детали машин».

Методика разработки преобразователя движения ММ содержит следующие этапы:

- 1) выбор типа преобразователя по общим и специальным критериям;
- 2) проектный расчет передачи с целью определения ее основных конструктивных параметров;
- 3) проверочный расчет передачи;
- 4) эскизная компоновка преобразователя движения;
- 5) конструирование валов и предварительный выбор подшипников;
- 6) определение размеров элементов корпуса;
- 7) разработка эскиза преобразователя движения;
- 8) проверочные расчеты подшипников, валов, соединений;
- 9) выбор способа смазки и смазочных материалов;
- 10) разработка чертежно-конструкторской документации.

Ниже будут рассмотрены методики расчета различных передач.

### Цилиндрические зубчатые передачи

Расчет одноступенчатой передачи и двухступенчатого редуктора основан на методике расчета передач общего назначения, изложенной в [14, 15]. При расчете передачи для ММ нужно учитывать следующие рекомендации:

- передача должна быть косозубой, если в техническом задании специально не оговорено изготовление прямозубой;
- твердость шестерни и колеса принимать либо ( $HB_1 > 350; HB_2 > 350$ ), либо ( $HB_1 > 350; HB_2 < 350$ );
- в отличие от передач общего назначения, величину модуля  $m_n$  можно принимать меньше 1,5 мм из стандартного ряда, мм: 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,25;
- при определении  $u, a_w, b_1, b_2$  требования технического задания имеют преимущество перед требованиями стандарта; например, если по конструкции ММ необходимо, чтобы  $a_w$  было равно 120 мм, следует принимать  $a_w = 120$  мм, несмотря на расхождение со стандартом (ближайшее стандартное значение  $a_w = 125$  мм);
- при проектировании двухступенчатого редуктора следует отдавать предпочтение соосной схеме, так как она повышает компактность ММ;
- если в техническом задании на ММ оговорена допустимая кинематическая погрешность, то проверочный расчет передачи должен содержать проверку по этому критерию (см. п. 3.3.1);
- если в техническом задании на ММ оговорено максимально допустимое значение мертвого хода, то проверку передачи по этому критерию (см. п. 3.3.1) производят после конструирования валов и предварительного выбора подшипников.

Обозначения:  $b_1$ — ширина венца шестерни;  $b_2$ — ширина венца колеса.

В остальном расчет следует выполнять по вышеуказанной литературе.

### Конические зубчатые передачи

Методика расчета передач общего назначения — см. [14, 15].

Дополнительные рекомендации:

- при нереверсивном характере нагрузки передача должна иметь круговые зубья, при реверсивной нагрузке передача прямозубая;
- передаточное число  $u < 5$ ; при необходимости обеспечения  $u > 5$  целесообразно перейти от одноступенчатой передачи к коническо-цилиндрическому редуктору и передаточные числа ступеней выбирать по табл. 3.5;

Таблица 3.5

**Рекомендуемые передаточные числа коническо-цилиндрического редуктора**

Передаточное число редуктора $u$	8; 9	10; 11,2	12,5; 14	16	$\geq 18$
Передаточное число быстроходной ступени $u_B$	3,15	3,55	4	4,5	5
В случае расхождения передаточного числа, определенного по техническому заданию, со стандартом преимущество имеет требование технического задания.					

- твердость шестерни и колеса передачи с круговым зубом — см. п. 3.2.3;
- о величине модулей — см. п. 3.2.3;
- о проверках кинематической точности и мертвого хода — см. п. 3.3.2.

### Реечные передачи

**Исходные данные** (в соответствии с техническим заданием на ММ):

- ❖ номинальная нагрузка на выходном звене (сила на рейке  $F_t, Н$ );
- ❖ номинальная скорость выходного звена (линейная скорость рейки  $v$ , м/с);
- ❖ максимальное рабочее перемещение выходного звена (рейки  $H_2$ , мм);
- ❖ номинальная скорость ведущего звена (угловая скорость шестерни  $\omega$ , с<sup>-1</sup>);

- ❖ допустимая величина кинематической погрешности;
- ❖ допустимая величина мертвого хода (для передач с реверсивной нагрузкой);
- ❖ нагрузочная диаграмма (циклограмма);
- ❖ срок службы (долговечность) передачи;
- ❖ прочие (массогабаритные показатели, способ крепления, конфигурация корпуса и пр.).

Для определенности принято, что ведущим звеном является шестерня.

**Кинематический расчет** реечной передачи начинается с определения расчетного диаметра делительной окружности шестерни  $d$ , мм, по формуле

$$d' = 2000 \nu / \omega. \quad (3.31)$$

Полученное значение округлить до 0,01 мм.

Передаточное отношение реечной передачи

$$u_{ВП} = \omega_1 / \nu_2 = 2 \cdot 10^3 / d_1, \text{ мм}^{-1}. \quad (3.32)$$

Максимальный угол поворота шестерни равен

$$\varphi_1 = 2H_2 / d_1. \quad (3.33)$$

**Проектный расчет** начинается с определения необходимых допускаемых контактных напряжений для материалов шестерни и рейки и выбора соответствующих марок сталей и способов упрочнения.

Необходимое допускаемое контактное напряжение для шестерни

$$[\sigma]_{H1} \geq 487(d')^{-1}[F_t K_{H\beta} / \psi_{bd}]^{0,5}, \quad (3.34)$$

где  $K_{H\beta}$  — коэффициент неравномерности распределения нагрузки по ширине зуба (табл. 3.6);  $\psi_{bd}$  — коэффициент относительной ширины шестерни.

 Значения коэффициентов  $K_{H\beta}$ ,  $K_{F\beta}$ 

Таблица 3.6

Расположение шестерни относительно опор, тип опор	Твердость, HB	$K_{H\beta}$			$K_{F\beta}$		
		$\psi_{bd}$			$\psi_{bd}$		
		0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6
Консольное, шарикоподшипники	$\leq 350$	1,08	1,17	1,28	1,16	1,37	1,64
	$> 350$	1,22	1,44	—	1,33	1,7	—
Консольное, роликоподшипники	$\leq 350$	1,06	1,12	1,19	1,1	1,22	1,38
	$> 350$	1,1	1,25	1,45	1,2	1,44	1,71
Симметричное	$\leq 350$	1,01	1,02	1,03	1,01	1,03	1,05
	$> 350$			1,04	1,02	1,04	1,08
Несимметричное	$\leq 350$	1,03	1,05	1,07	1,05	1,1	1,17
	$> 350$	1,06	1,12	1,2	1,09	1,18	1,3

Величина  $\psi_{bd}$  определяется отношением  $\psi_{bd} = b/d$ , но для прямозубой передачи наименьшее значение делительного диаметра шестерни  $d_{\min} = 17m$ , а наибольшая рекомендуемая ширина рейки  $b_{\max} = 10m$ . Подстановка этих значений в указанное отношение дает наибольшую величину коэффициента  $\psi_{bd}$ :  $\psi_{bd\max} = 10/17 \approx 0,59$ .

Затем определяют эквивалентное число циклов нагружения зуба шестерни контактными напряжениями по формуле

$$N_{HE1} = 1,15 \cdot 10^6 CL_h (d' t_{\text{ц}})^{-1} \sum_{i=1}^k (F_{ti}/F_t)^3 v_i t_i \quad (3.35)$$

где  $C$  — число реек, находящихся в зацеплении с шестерней;  $L_h$  — заданная техническим заданием долговечность передачи, ч;  $t_{\text{ц}}$  — длительность одного технологического цикла, с;  $F_{ti}$  — сила на рейке на  $i$ -ом участке циклограммы нагружения;  $v_i$  — скорость рейки на  $i$ -ом участке циклограммы, м/с;  $t_i$  — длительность  $i$ -го участка циклограммы, с;  $k$  — число участков циклограммы.

Находят коэффициент долговечности при расчете по контактным напряжениям

$$K_{HL1} = (N_{H01}/N_{HE1})^{1/3}, \quad (3.36)$$

где  $N_{H01}$  — базовое число циклов изменения напряжений для материала шестерни (табл. 3.7), можно также использовать формулу  $N_{H01} \approx HB_{\text{ср}}^3$ .

Таблица 3.7

Базовые числа циклов  $N_0, N_{F0}$   
изменения напряжений, млн циклов

Твердость поверхности зубьев									
HB	200	250	300	350	400	450	500	550	600
HRC	20	25	33	36	42	47	52	56	59
$N_{H0}$	10	12,5	25	35	50	65	85	110	150
$N_{F0}$	4								

Для объемно упрочненных шестерен  $K_{HL1} = 1 \dots 2,6$  при  $HB \leq 350$ , для поверхностно упрочненных —  $K_{HL1} = 1 \dots 1,8$  при  $HB > 350$ . Если  $N_{HE1} > N_{H01}$ , то принимают  $K_{HL1} = 1$ .

Определяют предел контактной выносливости зубьев шестерни

$$\sigma_{Hlimb1} = [\sigma]_{H1} S_H / K_{HL1}, \quad (3.37)$$

где  $S_H$  — коэффициент безопасности ( $S_H = 1,1$  — для объемно упрочненных зубьев;  $S_H = 1,2$  — для поверхностно упрочненных зубьев).

После этого, используя зависимости  $\sigma_{Hlimb1}$  от средней твердости поверхности зуба (см. табл. 3.8), находят значение средней твердости и принимают соответствующие марку стали и термообработку по табл. 3.9.

Таблица 3.8

**Пределы контактной и изгибной выносливости**

Твердость зубьев, HB, HRC	Вид термообработки	Предел контактной выносливости $\sigma_{H\ limb}$ , МПа	Предел изгибной выносливости $\sigma_{F\ limb}$ , МПа
HB $\leq$ 350	Нормализация, улучшение	2HB + 70	1,8HB
HRC 35...45	Объемная закалка	18HRC + 150	550
HRC45...63	Закалка ТВЧ	17HRC + 200	550...650
HRC55...63	Цементация	23HRC	750
	Нитроцементация		750...1000

Таблица 3.9

**Механические характеристики сталей**

А. Нормализованные (Н), улучшенные (У) и объемнозакаленные стали (ОЗ)

Марка стали	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Твердость	Термообработка
40	600	320	192—228	У
	650—750	350	180—207 HB	У
	700—800	400	194—222 HB	У
45	750—850	450	207—236 HB	У
	800—900	550	223—250 HB	У
	850—950	600	236—263 HB	У
50	700—800	370—420	212—235 HB	У
50Г	800	550	241—285 HB	У
35Х	650	450	187 HB	У
	700—800	400	200—230 HB	Н
	750—850	500	215—243 HB	У
40Х	800—900	550	230—257 HB	У
	850—950	600	243—271 HB	У
	900—1000	700	257—285 HB	У

Окончание табл. 3.9

А. Нормализованные (Н), улучшенные (У) и объемнозакаленные стали (ОЗ)				
Марка стали	Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	Твердость	Термообработка
40НХ	850—950	600	250—280 НВ	У
	900—1000	700	265—290 НВ	У
20ХНЗА	1000	850	293—341 НВ	У
38ХА	900	800	269—321 НВ	У
37ХНЗА	1100	950	321—387 НВ	У
40ХНМА	1100	950	293—375 НВ	У
45	1000	750	38—42 HRC	ОЗ
50	620	340	48—52 HRC	ОЗ
Б. Поверхностно-закаленные (ПЗ), цементируемые (ЦМ), азотированные (А) и цианированные (Ц) стали				
45	600	340	53—55 HRC	ПЗ
40Х	1000	850	52—56 HRC	ПЗ
40ХН	800	500	51—57 HRC	ПЗ
20Х	800	650	<u>20—32 HRC</u> 57—63 HRC	ЦМ, 3
18ХГТ	1150	950	<u>332—375 НВ</u> 56—62 HRC	ЦМ, 3
12ХНЗА	1000	800	<u>26—42 HRC</u> 56—63 HRC	ЦМ, 3
12ХНЗА	1000	850	<u>260—400 НВ</u> 58—63 HRC	ЦМ, 3
12Х2Н4А	1200	1000	<u>280—400 НВ</u> 60—65 HRC	ЦМ, 3
20Х2Н4А	1400	1200	<u>300—400 НВ</u> 60—65 HRC	ЦМ, 3
38ХМЮА	1000	850	30—34 HRC	А
40Х	900	650	<u>60 HRC</u> 48—56 HRC	Ц, 3
40ХН	920	700	50—54 HRC	Ц, 3

Примечание: в числителе указана твердость сердцевины, в знаменателе — поверхности.



Согласно рекомендациям для зубчатых передач назначают марку стали и термообработку рейки. Целесообразно марку стали принимать ту же, что и для шестерни.

Вычисляют эквивалентное число циклов нагружения зуба рейки контактными напряжениями по формуле

$$N_{HE2} = N_{HE1} \pi d' / (Cl) \quad (3.38)$$

и коэффициент долговечности

$$K_{HL2} = (N_{H02} / N_{HE2})^{1/3}, \quad (3.39)$$

где  $N_{H02}$  — базовое число циклов изменения напряжений для материала рейки.

Затем определяют допускаемое контактное напряжение для рейки

$$[\sigma]_{H2} = \sigma_{Hlimb2} K_{HL2} / S_H, \quad (3.40)$$

где  $\sigma_{Hlimb2}$  — предел контактной выносливости зубьев рейки.

Меньшее из двух напряжений  $[\sigma]_{H1}$  и  $[\sigma]_{H2}$  является допускаемым контактным напряжением  $[\sigma]_H$  для прямозубой реечной передачи.

Допускаемые напряжения изгиба  $[\sigma]_{F1}$  и  $[\sigma]_{F2}$  определяются так же, как для зубчатых передач [14, 15].

**Определение геометрических параметров** передачи производят следующим образом.

Из условия прочности на изгиб определяют модуль зубьев

$$m \geq 6,6 F_t (\psi_{bd} d' [\sigma]_{F1})^{-1}. \quad (3.41)$$

Полученное значение модуля округляют до ближайшего из стандартного ряда, мм: 1; 1,15; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,25; 2,5; 2,75; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6..., а затем находят число зубьев шестерни по формуле

$$z_1 = d' / m \geq 17. \quad (3.42)$$

Число  $z_1$  округляют до целого и уточняют делительный диаметр шестерни

$$d = mz_1. \quad (3.43)$$

Диаметры вершин и впадин зубьев шестерни равны

$$d_a = d + 2m; \quad (3.44)$$

$$d_f = d - 2,5m. \quad (3.45)$$

Используя найденную величину  $m$ , определяют число зубьев рейки

$$z_2 = H_2/(\pi m). \quad (3.46)$$

Полученное  $z_2$  округляют до целого в большую сторону.  
Ширина рейки

$$b_2 = \psi_{bd} d, \text{ мм}; \quad (3.47)$$

ширина шестерни

$$b = b_2 + 0,6b_2^{0,5}, \text{ мм}, \quad (3.48)$$

с округлением  $b$  и  $b_2$  до целых чисел.

Далее выполняют **проверочные расчеты**.

Определяют **контактные напряжения** по формуле

$$\sigma_H = Z_H Z_M Z_\varepsilon [F_t K_{H\beta} K_{H\alpha} / (db_2)]^{0,5}, \quad (3.49)$$

где  $Z_H = 1,76$  — коэффициент формы сопряженных поверхностей зубьев;  $Z_M = 275 \text{ МПа}^{0,5}$  — коэффициент механических свойств материалов передачи;  $Z_\varepsilon$  — коэффициент суммарной длины контактных линий;  $K_{H\alpha}$  — коэффициент динамической нагрузки.

Значение  $Z_\varepsilon$  вычисляют по формуле

$$Z_\varepsilon = [(4 - \varepsilon_\alpha)/3]^{0,5}, \quad (3.50)$$

где  $\varepsilon_\alpha$  — коэффициент торцевого перекрытия, равный

$$\varepsilon_{\alpha} = 1,88 - 3,2/z_1. \quad (3.51)$$

Коэффициент  $K_{Hv}$  находят по табл. 3.10 в зависимости от скорости рейки и степени точности передачи (см. табл. 3.15).

Значения коэффициента  $K_{Hv}$

Таблица 3.10

		Значения коэффициента $K_{Hv}$					
Степень точности	Твердость зубьев	Скорость рейки $v$ , м/с					
		1	2	4	6	8	10
6	а	1,03	1,06	1,12	1,17	1,23	1,28
	б	1,02	1,04	1,07	1,1	1,15	1,18
7	а	1,04	1,07	1,14	1,21	1,29	1,36
	б	1,03	1,05	1,09	1,14	1,19	1,24

Твердость зубьев: а — шестерня и рейка нормализованные или улучшенные; шестерня закаленная, рейка нормализованная или улучшенная; б — шестерня и рейка закаленные.

Условие обеспечения контактной выносливости:  $\sigma_H \leq [\sigma]_H$ .  
 Допустимая недогрузка 5 %, перегрузка не допускается.

Проверку по **напряжениям изгиба** зуба шестерни выполняют по формуле

$$\sigma_{F1} = 0,9Y_{F1}F_tK_{F\beta}K_{Fv}/(b_2m) \leq [\sigma]_{F1}, \quad (3.52)$$

где  $Y_{F1}$  — коэффициент формы зуба шестерни (табл. 3.11);  $K_{Fv}$  — коэффициент динамической нагрузки (табл. 3.12).

Таблица 3.11

		Значения коэффициента $Y_F$									
$z$	17	18	19	20	21	22	24	25	28	30	
$Y_F$	4,3	4,25	4,18	4,13	4,1	4,08	4,03	3,97	3,9	3,87	
$z$	32	35	40	45	50	60	80	100	150	рейка	
$Y_F$	3,84	3,8	3,76	3,75	3,73		3,74	3,75	3,76	3,78	

Условие обеспечения усталостной прочности зуба рейки по напряжениям изгиба

$$\sigma_{F2} = 3,78\sigma_{F1}/Y_{F1} \leq [\sigma]_{F2}. \quad (3.53)$$

Условие **контактной прочности зубьев при кратковременной перегрузке** выражается формулой

$$\sigma_{H\max} = \sigma_H (T_{\text{пик}}/T_{\text{ном}})^{0,5} \leq [\sigma]_{H\max}, \quad (3.54)$$

где  $T_{\text{пик}}$  — кратковременный (пиковый) момент на шестерне,  $T_{\text{ном}}$  — наибольший момент на шестерне по циклограмме нагружения, т. е. наибольший из моментов при нормально протекающем рабочем процессе.

Таблица 3.12

Значения коэффициента  $K_{Fv}$

Степень точности	Твердость зубьев	Скорость рейки $v$ , м/с					
		1	2	4	6	8	10
6	а	1,06	1,13	1,26	1,4	1,53	1,67
	б	1,02	1,04	1,08	1,11	1,14	1,17
7	а	1,08	1,16	1,33	1,5	1,67	1,8
	б	1,03	1,05	1,09	1,13	1,17	1,22

Твердость зубьев: а — шестерня и рейка нормализованные или улучшенные; шестерня закаленная, рейка нормализованная или улучшенная; б — шестерня и рейка закаленные.

В тех случаях, когда данных о  $T_{\text{пик}}$  нет, в качестве  $T_{\text{пик}}/T_{\text{ном}}$  принимают кратность максимального момента по технической характеристике двигателя.

Допускаемое максимальное контактное напряжение при объемной термообработке  $[\sigma]_{H_{\text{max}}} = 2,8\sigma_T$  ( $\sigma_T$  — предел текучести материала зубьев), при поверхностной термообработке  $[\sigma]_{H_{\text{max}}} = 40HRC_{\text{ср}}$  ( $HRC_{\text{ср}}$  — среднее значение твердости в диапазоне для принятого вида упрочнения).

**Условие изгибной прочности зубьев шестерни и рейки при кратковременной перегрузке**

$$\sigma_{F_{\max 1,2}} = \sigma_{F_{1,2}} (T_{\text{пик}}/T_{\text{ном}}) \leq [\sigma]_{F_{\max 1,2}}, \quad (3.55)$$

где  $[\sigma]_{F_{\max 1,2}}$  — допускаемое максимальное напряжение изгиба соответственно для шестерни и колеса (при твердости зубьев  $HB \leq 350$   $[\sigma]_{F_{\max}} \approx 0,8\sigma_T$ ; при  $HB > 350$   $[\sigma]_{F_{\max}} \approx 0,6\sigma_B$ ;  $\sigma_B$  — предел прочности материала зубьев).

В тех случаях, когда рабочая нагрузка сжимает рейку, необходима ее **проверка на устойчивость**.

Предварительно задают форму опасного сечения рейки. Наиболее простым с точки зрения изготовления и хорошо поддающимся расчету является прямоугольное сечение.

Затем производят проверку сечения на прочность по напряжениям сжатия

$$\sigma_c = F_t/(b_2 h_p) \leq \sigma_{T2}/[s], \quad (3.56)$$

где  $h_p$  — высота опасного сечения;  $[s] = 2$  — коэффициент запаса прочности.

Определяют наименьший радиус инерции опасного сечения по формуле

$$i_{\min} = 0,289h_p \quad (3.57)$$

и гибкость рейки

$$\lambda = \mu l/i_{\min}, \quad (3.58)$$

где  $\mu$  — коэффициент приведения длины стержня (табл. 3.13).

Таблица 3.13

Схема закрепления рейки	Величина $\mu$	Величина $\nu$
	2	0,7
	1	2,2
	0,7	3,4
	0,5	4,9

По величине  $\lambda$  и табл. 3.14 устанавливают коэффициент продольного изгиба  $\varphi$  и вычисляют допустимое напряжение сжатия по условию устойчивости

$$[\sigma]_y = \varphi \sigma_{T2} / [s]. \quad (3.59)$$

В том случае, если полученное по (3.56) напряжение сжатия не больше  $[\sigma]_y$ , т. е.  $\sigma_c \leq [\sigma]_y$ , рейка проходит проверку на устойчивость. В противном случае необходимо увеличить размер  $h_p$  до  $h_p'$

$$h_p' = h_p \sigma_c / [\sigma]_y \quad (3.60)$$

Таблица 3.14

 Значения коэффициента  $\varphi$  реек из сталей с  $\sigma_{T2} \geq 320$  МПа

$\lambda$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
$\varphi$	0,95	0,87	0,79	0,65	0,43	0,3	0,23	0,19	0,15	0,13

Важным этапом проверочных расчетов является определение **кинематической погрешности** передачи и сравнение ее с предельно допустимой по техническому заданию.

В том случае, если нагрузка на рейку имеет реверсивный характер, то, кроме кинематической погрешности, необходимо найти **мертвый ход** передачи и сравнить его с предельно допустимым по техническому заданию.

Методика вычисления кинематической погрешности и мертвого хода дана в п. 3.3.3.

### Червячные передачи

Методика расчета передач общего назначения — см. [14, 15].

Дополнительные рекомендации:

- о величинах  $u$ ,  $a_w$  — см. п. 3.2.3;
- о величинах модулей — см. п. 3.2.3;
- при необходимости обеспечения  $u > 40$  целесообразно перейти от одноступенчатой передачи к червячно-цилиндрическому редуктору;
- при передаточном числе червячно-цилиндрического редуктора  $u \leq 50$  принимать передаточное число быстроходной ступени  $u_B = 8$ ; при  $u > 50$  принимать передаточное число тихоходной ступени  $u_T = 6,3$ ;
- о проверках кинематической точности и мертвого хода — см. п. 3.3.4.

### Планетарные зубчатые передачи

**Конструкции планетарных передач** весьма многообразны.

Простейшая планетарная передача (рис. 3.2) состоит из центрального солнечного зубчатого колеса  $1$  с наружными зубьями, центрального корончатого зубчатого колеса  $3$  с внутренними зубьями, сателлитов  $2$  с внешними зубьями, которые входят в зацепление одновременно с солнечным и корончатым колесами, и водила  $H$ , на котором расположены оси сателлитов.

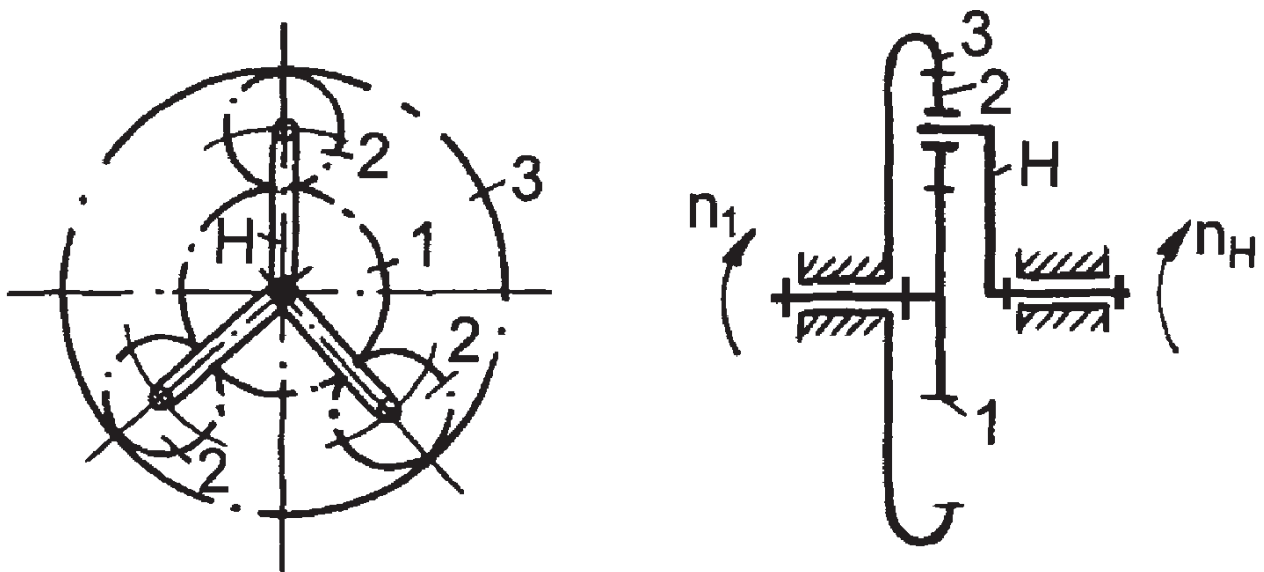


Рис. 3.2. Планетарная передача схемы 2К-Н

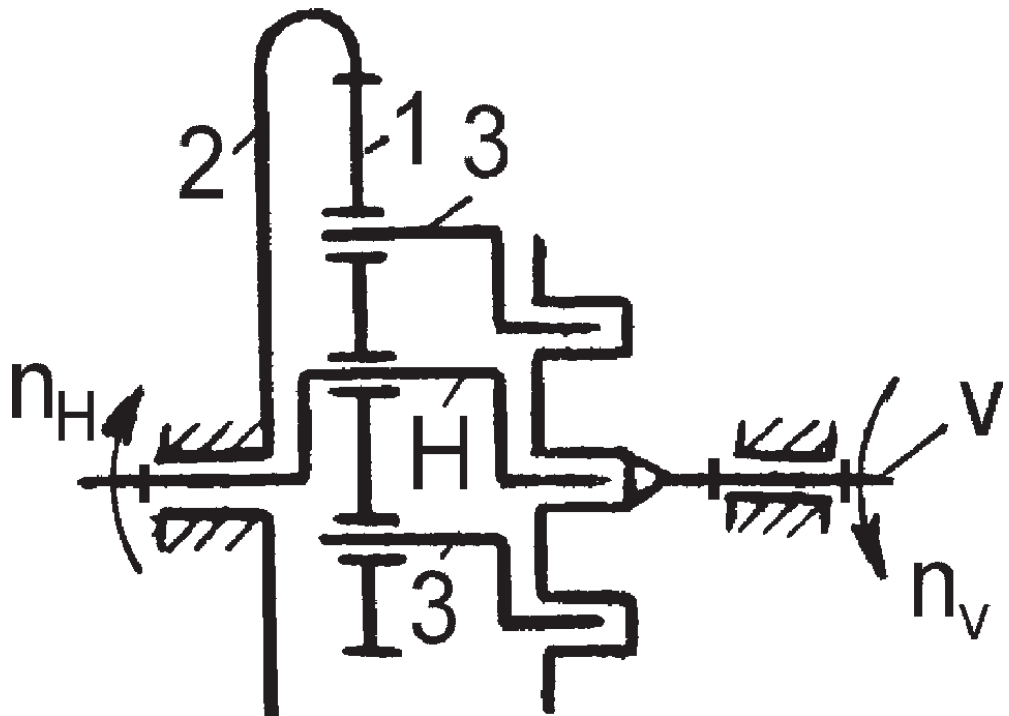
При закрепленном корончатом колесе  $\mathcal{X}(w_3=0)$  вращение солнечного колеса с угловой скоростью  $w_1$  вызывает вращение сателлитов относительно собственных осей с угловой скоростью  $w_2$ , что вызывает качение сателлитов по корончатому колесу и приводит к их перемещению по круговой орбите радиуса  $R_H$ , а следовательно, и водила  $H$  с угловой скоростью  $w_H$ .

Сателлиты вращаются относительно водила со скоростью  $w_2^{H=}$  =  $w_2 - w_H$  и вместе с водилом совершают переносное движение. Их движения напоминают движения планет, поэтому передачу и называют планетарной.

Основными звеньями планетарной передачи являются те, которые воспринимают внешние моменты. Такими звеньями являются солнечные и корончатые колеса, т. е. два центральных колеса (2К) и водило  $H$ . Сокращенное обозначение такого планетарного механизма «2К-Н».

Планетарный механизм *2К-Н* наиболее часто используется в ММ, так как имеет высокий КПД и технологичную конструкцию. Поэтому ниже будет дана методика расчета именно этой схемы.

Подробно и полно планетарные передачи рассмотрены в специальной литературе [23]. Здесь же следует сказать о весьма перспективной конструкции — так называемом эксцентриково-планетарном механизме, вариантом которого является механизм с параллельными кривошипами (рис. 3.3).


 Рис. 3.3. Планетарный механизм с параллельными кривошипами (схема  $K-H-V$ )

Планетарный механизм  $K-H-V$  имеет три основных звена: центральное колесо  $2$ , водило  $H$  и вал  $V$ . Водило представляет собой эксцентрик, на котором установлен сателлит  $1$ . Сателлит передает вращение на вал  $V$  кривошипами  $3$  — эксцентриками, эксцентриситет которых равен эксцентриситету водила.

За один оборот водила сателлит, совершая сложное плоское движение, поворачивается относительно своей оси на угол, соответствующий разности чисел зубьев центрального колеса и сателлита, в направлении, противоположном направлению вращения водила, т. е. передаточное число такого преобразователя движения равно

$$u_{H-V}^{(2)} = -z_2 / (z_2 - z_1). \quad (3.61)$$

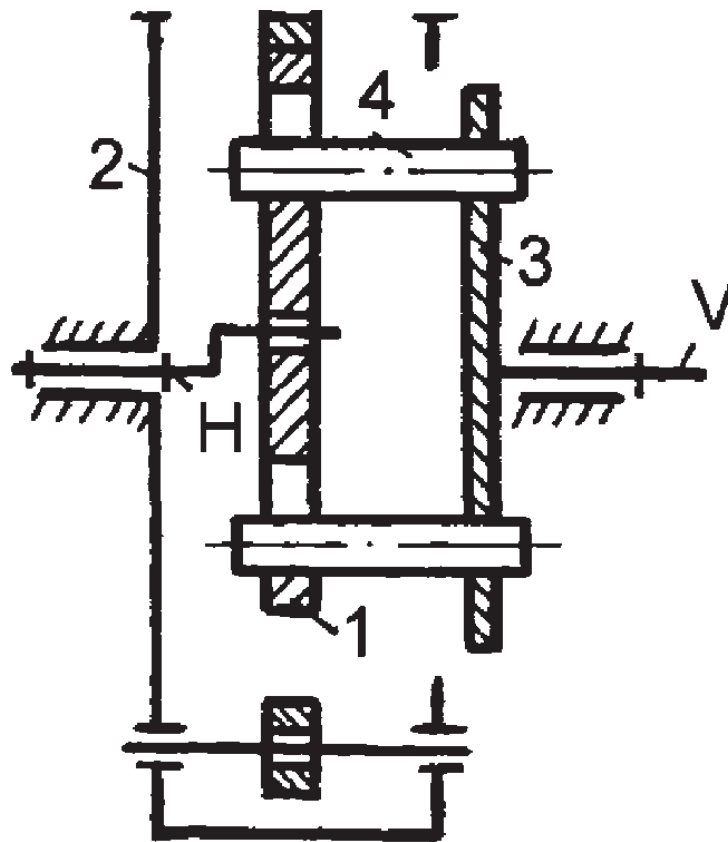
Для предотвращения заклинивания зубьев в зацеплении должно выполняться условие

$$z_2 - z_1 \geq \begin{cases} 8 & \text{при } h_a^* = 1; \\ 7 & \text{при } h_a^* = 0,8, \end{cases} \quad (3.62)$$

где  $h_a^*$  — высота головки зуба.

Очевидно, что при достаточно больших числах зубьев звеньев этой пары одна ступень передачи  $K-H$  может по передаточному числу заменить двухступенчатый цилиндрический редуктор.

Дальнейшие исследования в направлении уменьшения размеров и повышения технологичности изготовления передачи привели к появлению так называемого планетарно-цевочного редуктора (рис. 3.4), в котором вместо эвольвентного зацепления применяют цевочное.



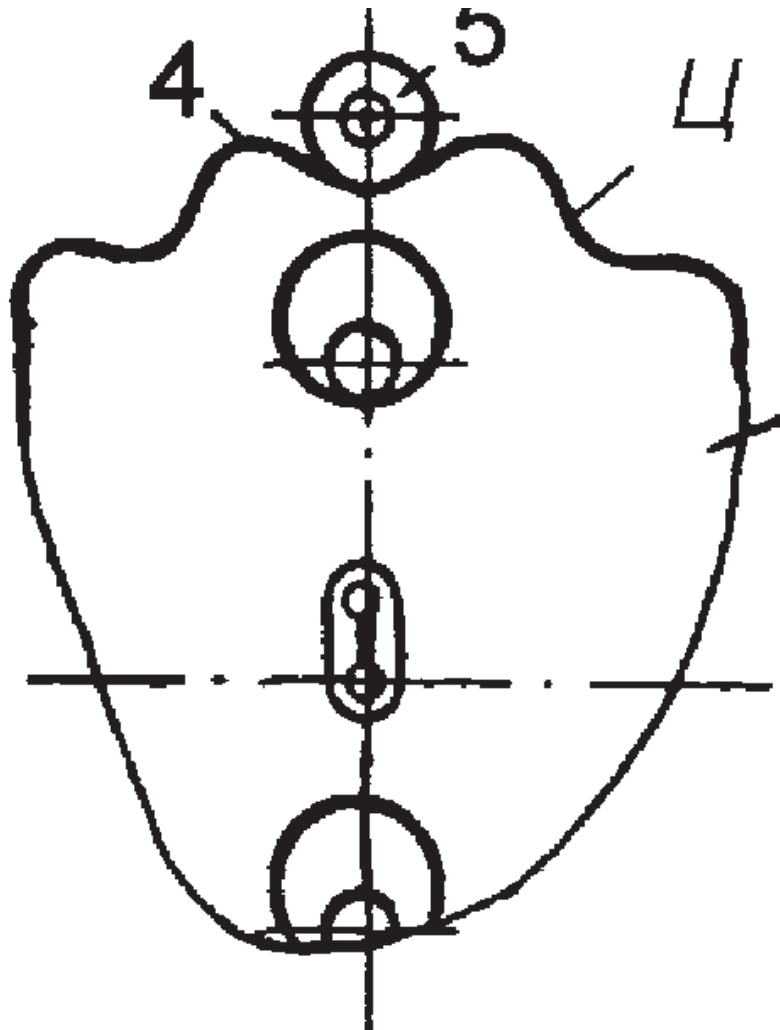


Рис. 3.4. Планетарно-цевочный редуктор схемы *K-H-V*

Сателлит *1* имеет зубья, выполненные по циклоиде (*Ц*), и смонтирован на водиле *H*. Центральное колесо *2* содержит оси *б* с установленными на них с возможностью вращения цевками *5*, взаимодействующими с зубьями сателлита. Выходной вал *V* соединен с диском *3*, в отверстия которого с натягом вставлены пальцы *4*, входящие в отверстия сателлита. Пальцы, контактируя со стенками отверстий, выполняют функцию параллельных кривошипов в схеме по рис. 3.3.

Далее будет рассмотрена планетарная передача, показанная на рис. 3.2.

**Исходные данные** — см. п. 3.2.5.

Целью **кинематического расчета** является определение чисел зубьев солнечного и корончатого колес и сателлита, обеспечивающих требуемое передаточное число, а также число сателлитов.

Передаточное число передачи  $2K-H$  равно

$$u_{1-H}^{(3)} = 1 + z_3/(z_1), \quad (3.63)$$

где  $u_{1-H}^{(3)}$  — передаточное число от солнечного колеса к водилу при неподвижном солнечном колесе.

Следует учитывать, что передаточное число данного механизма не должно превышать 8, в крайнем случае — 9. При необходимости обеспечения большего передаточного числа преобразователь движения выполняют **многоступенчатым**, причем каждая ступень представляет собой передачу по рис. 3.2.

Определение чисел зубьев колес планетарных передач производят обычно методом подбора, задаваясь числом зубьев солнечного колеса и обеспечивая при этом правильность зацепления. Число зубьев колес должно быть выбрано так, чтобы отсутствовали подрезание и заклинивание зубьев.

Следует задаться числом зубьев солнечного колеса, руководствуясь рекомендацией: для солнечного колеса, выполненного из стали нормализованной и улучшенной твердостью  $HB \leq 350$ , —  $z_1 \geq 24$ ; из стали закаленной ТВЧ твердостью  $HRC \leq 52$ , —  $z_1 \geq 21$ ; из стали цементованной твердостью  $HRC \geq 52$ , —  $z_1 \geq 18$ .

Минимальное число зубьев корончатого колеса

$$z_{2\min} \geq \begin{cases} 85 & \text{при } h_a^* = 1; \\ 158 & \text{при } h_a^* = 0,8. \end{cases} \quad (3.64)$$

Задавшись  $z_1$ , предварительно находят  $z_3$  по формуле

$$z_3 = z_1(u_{1H}^{(3)} - 1). \quad (3.65)$$

При подборе чисел зубьев колес необходимо учитывать условия **сборки, соосности и соседства сателлитов.**

Из условия соосности вычисляют число зубьев сателлита

$$z_2 = \frac{z_3 - z_1}{2}. \quad (3.66)$$

Проверяют выполнение условия сборки

$$\frac{z_3 + z_1}{C} = \gamma, \quad (3.67)$$

где  $C$  — число сателлитов (обычно  $C = 3$ );  $\gamma$  — целое число.

Выполнение условия соседства сателлитов выглядит следующим образом:

$$z_2 + 2 \leq (z_1 + z_2) \cdot \sin \frac{\pi}{C}. \quad (3.68)$$

При невыполнении какого-либо из условий изменяют числа зубьев колес на  $\pm 1 \dots 3$  зуба и добиваются выполнения условия. Следует иметь в виду, что числа зубьев колес  $z_1$  и  $z_3$  должны быть или только четные, или только нечетные.

После определения чисел зубьев находят фактическое передаточное число

$$u = 1 + \frac{z_3}{z_1}. \quad (3.69)$$

Вычисляют отклонение передаточного отношения

$$\Delta u = \frac{u - u_{1H}^{(3)}}{u_{1H}^{(3)}} \cdot 100\% \leq [\Delta u], \quad (3.70)$$

где  $[\Delta u]$  — допускаемое отклонение передаточного отношения, %, обычно принимают  $[\Delta u] \leq 4\%$ .

При невыполнении этого условия необходимо число зубьев  $z_3$  солнечного колеса уменьшить, снова найти числа зубьев всех остальных колес и провести проверку механизма по условиям соосности, сборки и соседства.

**Выбор материалов** планетарной зубчатой передачи производят по следующим рекомендациям.

Так как зуб солнечного колеса более часто входит в зацепление, чем зуб сателлита, то при твердости поверхности зубьев сателлита  $HВ < 350$  твердость поверхности зубьев солнечного колеса назначают

на 50...70 единиц выше, чем сателлита. При твердости поверхности зубьев сателлита  $HV > 350$  твердости солнечного колеса и сателлита назначают одинаковыми. Характеристики сталей даны в табл. 3.9.

Для изготовления водил также используют стали. Корпуса планетарных передач ММ необходимо изготавливать из легких материалов и сплавов.

**Допускаемые напряжения для зубьев пар «центральное колесо — сателлит» и «сателлит — корончатое колесо» определяют так же, как для передач общего назначения [14, 15].**

**Проектировочный расчет передачи начинают с определения межосевого расстояния пары «солнечное колесо — сателлит» по формуле, мм,**

$$= K_a(u+1) \sqrt[3]{\frac{T_1 K_{H\beta} K_C}{[\sigma]_H^2 u^2 C \psi_{ba}}}, \quad (3.71)$$

где  $K_a$  — вспомогательный коэффициент (для прямозубых колес  $K_a = 490 \text{ МПа}^{1/3}$ , для косозубых колес  $K_a = 430 \text{ МПа}^{1/3}$ );  $u$  — передаточное отношение между солнечным колесом и сателлитом (отношение чисел зубьев большего колеса к числу зубьев меньшего);  $T_1$  — вращающий момент на солнечном колесе, Н·м;  $K_{H\beta}$  — см. табл. 3.6;  $K_C$  — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения нагрузки между сателлитами (при наличии механизма выравнивания нагрузки  $K_C = 1,1 \dots 1,2$ ); при отсутствии —  $K_C = 1,5 \dots 2,0$ );  $C$  — число сателлитов;  $\psi_{ba}$  — коэффициент ширины зубчатого венца сателлита, равный отношению ширины венца к межосевому расстоянию

$$\psi_{ba} = b_C / a_w \quad (3.72)$$

и принятый из ряда стандартных значений: 0,1; 0,105; 0,16; 0,2; 0,25; 0,315; 0,40; 0,50; 0,63; 0,80 (желательно принимать  $\psi_{ba} = 0,4$  для материалов колес твердостью  $HV \leq 350$ ,  $\psi_{ba} = 0,315$  при твердости  $HRC \leq 50$  и  $\psi_{ba} = 0,25$  при твердости  $HRC > 50$ ).

Затем находят делительный диаметр меньшего из колес пары «солнечное колесо — сателлит». Пусть меньшее — сателлит, тогда

$$d_C = \frac{2a_w}{u+1}. \quad (3.73)$$

Определяют модуль зубьев

$$m = \frac{d_1}{z_1} = \frac{d_C}{z_C}. \quad (3.74)$$

Полученное значение модуля округляют до стандартного, уточняют значения делительных диаметров солнечного колеса, сателлита, корончатого колеса:

$$d_1 = mz_1; \quad d_C = mz_C; \quad d_K = mz_K, \quad (3.75)$$

а также межосевого расстояния

$$a_w = (d_1 + d_2)/2. \quad (3.76)$$

Затем по известным формулам вычисляют диаметры окружностей вершин и впадин зубьев всех колес передачи.

Окружная скорость солнечного колеса, м/с,

$$v = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \cdot 10^3}, \quad (3.77)$$

где  $n_1$  — частота вращения солнечного колеса, об/мин.

По значению окружной скорости назначают степень точности планетарной передачи (табл. 3.15).

Таблица 3.15

Степень точности, не ниже	Окружная скорость не более, м/с		Примечание
	прямозубая	косозубая	
6 (высокоточная)	15	30	Высокоточные передачи, механизмы точной механики, мехатроники и робототехники
7 (точная)	10	15	Скоростные передачи при умеренных нагрузках, высоконагруженные передачи при высоких скоростях
8 (средней точности)	6	10	Передачи общего назначения в машиностроении, не требующие особой точности
9 (пониженной точности)	2	4	Тихоходные передачи с пониженными требованиями к точности

Для мехатронных модулей рекомендуют 6 или 7 степени точности планетарных передач.

**Проверку зубьев в паре «солнечное колесо — сателлит» на выносливость проводят по контактным напряжениям**

$$\sigma_H = 22,4a_W^{-1}z_H z_M z_\varepsilon [T_1(u+1)^3 K_{H\alpha} K_{H\beta} K_{H\nu} / (b_C u C)]^{0,5} \leq [\sigma]_H, \quad (3.78)$$

где  $z_M$  — см. формулу (3.49); смысл коэффициентов  $z_H, z_\varepsilon$  тот же, что и в формуле (3.49), и их значения для прямозубой передачи определяют так же, как при расчете по (3.49), а для косозубой передачи коэффициент  $z_H$

$$z_H = 1,76 \cos \beta, \quad (3.79)$$

коэффициент  $z_\varepsilon$

$$z_\varepsilon = (1/\varepsilon_\alpha)^{0,5} \quad (3.80)$$

при коэффициенте осевого перекрытия

$$\varepsilon_\beta = b_1 \sin \beta / (\pi m_n) \geq 0,9, \quad (3.81)$$

в том же случае, если  $\varepsilon_\beta < 0,9$ , коэффициент  $z_\varepsilon$  находят по (3.50), причем в (3.80) и (3.50) подставляют коэффициент  $\varepsilon_\alpha$ , равный

$$\varepsilon_\alpha = 1,88 - 3,2 \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \cos \beta; \quad (3.82)$$

коэффициент  $K_{H\alpha} = 1$  для прямозубой передачи, для косозубой — см. табл. 3.16; коэффициент  $K_{H\nu}$  — см. табл. 3.10.

Условие (3.78) считается выполненным, если

$$0,9 \leq \sigma_H / [\sigma]_H \leq 1,05. \quad (3.83)$$

При невыполнении условия следует ввести поправку путем изменения ширины венца. Новое значение ширины

$$b'_C = b_C (\sigma_H / [\sigma]_H)^2. \quad (3.84)$$

Полученную ширину округляют до ближайшей по ряду  $Ra40$ , после чего соответственно корректируют ширину венцов сопряженных деталей.

Таблица 3.16

**Значения коэффициента  $K_{на}$**

Окружная скорость $v_2$ , м/с	Степень точности по нормам плавности				
	5	6	7	8	9
2,5	1	1,01	1,03	1,05	1,13
5	1	1,02	1,05	1,09	1,16
10	1,01	1,03	1,07	1,13	—
15	1,01	1,04	1,09	—	—
20	1,02	1,05	1,12	—	—
25	1,02	1,06	—	—	—

**Проверочный расчет** зубьев в паре «солнечное колесо — сателлит» на **выносливость по напряжениям изгиба** производят для того колеса, чье отношение  $\frac{[\sigma]_F}{Y_F}$  меньше. Здесь  $Y_F$  — коэффициент формы зуба, его берут из табл. 3.11 по эквивалентным числам зубьев

$$z_{1v} = z_1 / \cos^3 \beta; z_{Cv} = z_C / \cos^3 \beta. \quad (3.85)$$

Условие усталостной прочности по напряжениям изгиба:

$$\sigma_F = 2000 Y_F Y_\beta Y_\varepsilon T_1 K_{F\alpha} K_{F\beta} K_{Fv} / (bmdC) \leq [\sigma]_F, \quad (3.86)$$

где  $Y_\beta$  — коэффициент угла наклона зубьев, равный

$$Y_\beta = 1 - \beta / 140; \quad (3.87)$$

$Y_\varepsilon$  — коэффициент, учитывающий перекрытие зубьев, для прямозубых колес  $Y_\varepsilon = 1$ , для косозубых

$$Y_\varepsilon = 1 / \varepsilon_\alpha; \quad (3.88)$$

$K_{F\alpha}$  — коэффициент распределения нагрузки между зубьями солнечного колеса и сателлита, для прямозубой передачи и косозубой с  $\varepsilon_\beta \leq 1$   $K_{F\alpha} = 1$ , для косозубой с  $\varepsilon_\beta > 1$

$$K_{F\alpha} = [4 + (\varepsilon_\alpha - 1)(n' - 5)] / (4\varepsilon_\alpha), \quad (3.89)$$

$n'$  — степень точности передачи; коэффициенты  $K_{F\beta}$ ,  $K_{Fv}$  аналогичны по смыслу коэффициентам  $K_{H\beta}$ ,  $K_{Hv}$  и указаны в табл. 3.6, 3.12.

Условие (3.86) считается выполненным, если

$$\sigma_F / [\sigma]_F \leq 1,05. \quad (3.90)$$

Проверочный расчет зубьев колес планетарных передач при перегрузках аналогичен такому же расчету реечной передачи.

Проверки кинематической точности и мертвого хода планетарной передачи — см. п. 3.3.5.

### **Волновые зубчатые передачи**

Конструкция волновой передачи поясняется рис. 3.5. По своей сути она представляет собой планетарную передачу, у которой одно из колес выполнено в виде гибкого венца.

Волновая зубчатая передача состоит из гибкого колеса *1* с наружными зубьями, жесткого колеса *2* с внутренними зубьями и генератора волн *3*.

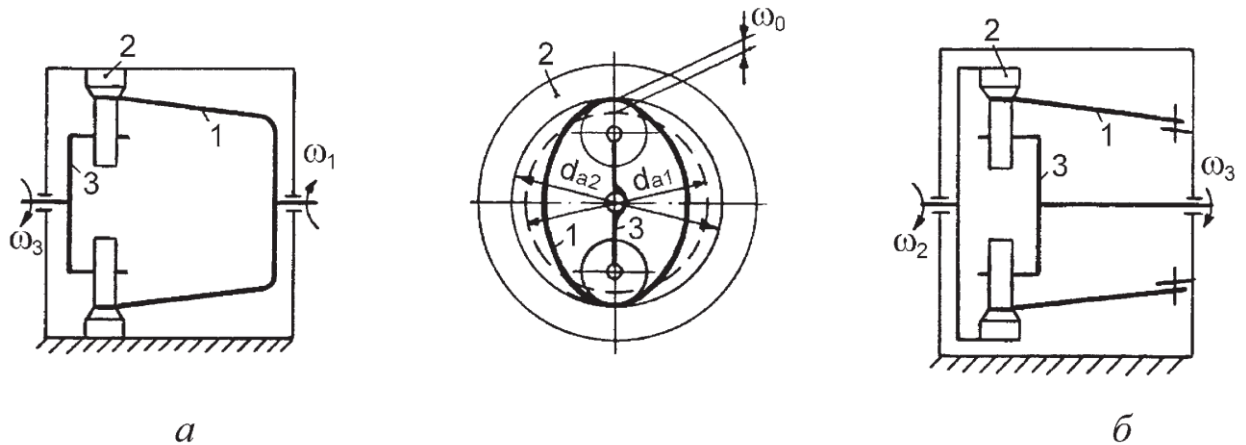


Рис. 3.5. Схема волновой зубчатой передачи

Наружный диаметр  $d_{a1}$  гибкого колеса в недеформированном состоянии меньше внутреннего диаметра  $d_{a2}$  жесткого колеса на величину

$$d_{a2} - d_{a1} = 2\omega_0.$$

Кинематический расчет волновой передачи заключается в подборе чисел зубьев гибкого и жесткого колес по принятому в соответствии с техническим заданием на ММ передаточным числом.

При неподвижном жестком зубчатом колесе *2* (рис. 3.5, а) передаточное число от вала генератора волн *3* к валу гибкого колеса *1* равно

$$u_{31}^{(2)} = -n_B/n_T = -\omega_3/\omega_1 = -z_1/(z_2 - z_1) = -z_1/(K_z v) = -d_1/(d_2 - d_1). \quad (3.92)$$

Знак минус указывает на разные направления вращения ведущего и ведомого звеньев.

Передаточное число от вала генератора волн 3 к валу жесткого колеса 2 при неподвижном гибком колесе 1 (рис. 3.5, б) равно

$$u_{32}^{(1)} = n_B/n_T = \omega_3/\omega_2 = z_2/(z_2 - z_1) = z_2/(K_z v) = d_2/(d_2 - d_1). \quad (3.93)$$

В формулах (3.92), (3.93)  $n_B, n_T$  — частоты вращения быстроходного и тихоходного валов;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  — угловая скорость соответственно гибкого колеса, жесткого колеса и генератора волн;  $z_1, z_2$  — числа зубьев гибкого и жесткого колес;  $d_1, d_2$  — диаметры делительных окружностей гибкого и жесткого колес;  $v$  — число волн деформации ( $v = 1, 2, 3, \dots$ , обычно  $v = 2$ , реже 3);  $K_z$  — коэффициент кратности (обычно  $K_z = 1$ ; при  $u < 70$   $K_z = 2$ ; при  $u < 45$   $K_z = 3$ ).

В качестве материалов зубчатых колес, как правило, используют стали, которые после термообработки имеют твердость 220...330 НВ (табл. 3.17). В отдельных случаях колеса изготавливают из бериллиевой бронзы БрБ2 и пластмассы [24].

Таблица 3.17

**Марки сталей для изготовления зубчатых колес волновых передач**

Сталь	Твердость, НВ	Предел выносливости $\sigma_{-1}$ , МПа
40Х	280...300	500
40ХНМА	310...330	550
30ХГСА	300...320	530
38ХНЗВА	310...330	550
38ХМЮА	220...240	550
ШХ15	260...280	420
Х18Н10Т	220...240	350

Допускаемые напряжения смятия на боковых поверхностях зубьев определяют в виде:

$$[\sigma]_{\text{CM}} = 15,7K_u K_n K_{d1}, \text{ МПа}, \quad (3.94)$$

где  $K_u = (u - 20)/u$  — коэффициент, зависящий от передаточного числа;  $K_n = 10n_B^{-1/3}$  — коэффициент, зависящий от частоты вращения генератора волн (т. е. для понижающей передачи — от частоты быстроходного вала  $n_B$ );  $K_{d1}$  — коэффициент, зависящий от делительного диаметра гибкого колеса  $d_1$  (при  $d_1 \leq 130$  мм  $K_{d1} = 1,25$ ; при  $d_1 > 130$  мм  $K_{d1} = 1$ ).

Для стальных зубчатых колес диапазон допускаемых напряжений составляет  $[\sigma]_{\text{CM}} = 10 \dots 20$  МПа, для пластмассовых —  $[\sigma]_{\text{CM}} = 3 \dots 5$  МПа.

Проектный расчет передачи состоит в определении геометрических параметров гибкого и жесткого колес из условия прочности зубьев на смятие.

Для выполнения расчета применяют упрощенные экспериментально проверенные зависимости. Они верны только для эвольвентных зубчатых колес, нарезанных стандартным инструментом с исходным контуром, имеющим угол зацепления  $\alpha = 20^\circ$ , коэффициент высоты зуба  $h_a^* = 1$ , коэффициент радиального зазора  $C^* = 0,25$  для модулей более 1 мм и  $C^* = 0,35$  для модулей до 1 мм.

Исходными данными для расчета являются крутящий момент  $T_T$ , Нм, на тихоходном валу передачи и частота вращения тихоходного вала.

Расчет начинают с определения делительного диаметра гибкого колеса из условия прочности зубьев на смятие, выраженного формулой

$$\sigma_{\text{CM}} = 10^4 T_T K / (b d_1^2) \leq [\sigma]_{\text{CM}}, \quad (3.95)$$

где  $T_T$  — в ньютонметрах;  $K$  — коэффициент режима работы передачи (при спокойной нагрузке с кратностью перегрузки  $T_{\text{max}}/T \leq 1,2$   $K = 1$ ; при умеренной динамической нагрузке с  $T_{\text{max}}/T \leq 1,6$   $K = 1,25$ ; при резко динамической нагрузке с  $T_{\text{max}}/T \leq 2,5$   $K = 1,75$ );  $b$  — ширина зубчатого венца гибкого колеса, мм.

На рис. 3.6 показаны основные геометрические параметры передачи.

Ширина зубчатого венца гибкого колеса равна

$$b = \psi_{bd} d_1, \quad (3.96)$$

где  $\psi_{bd}$  — коэффициент ширины зубчатого венца (для силовых передач  $\psi_{bd} = 0,15..0,20$ ; для малонагруженных кинематических передач  $= 0,06..0,15$ ).

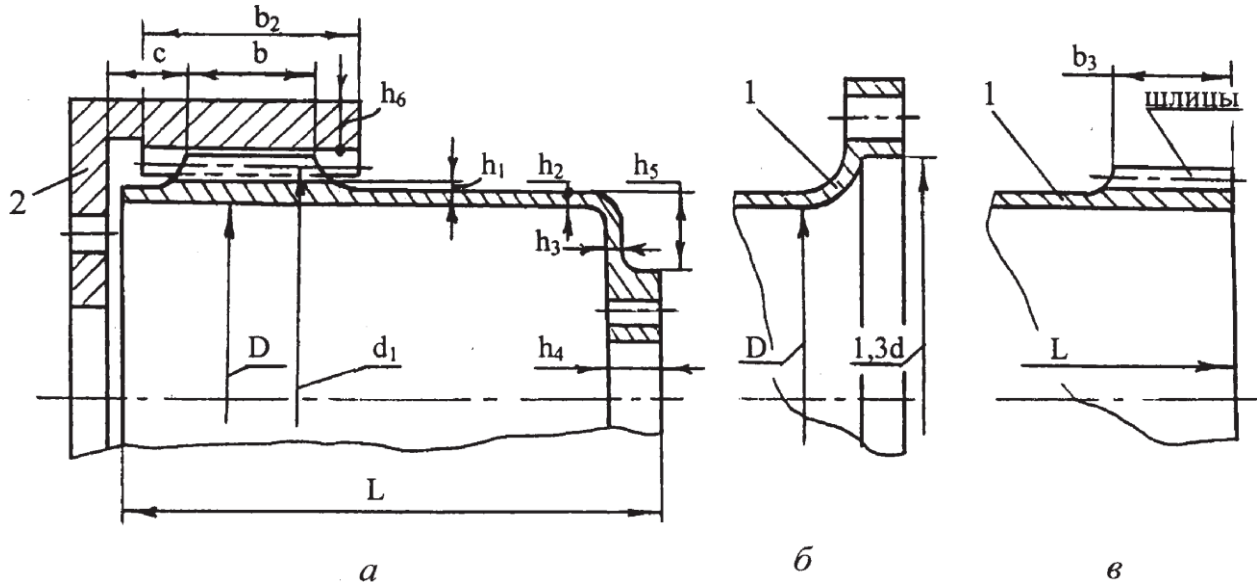


Рис. 3.6. Геометрические параметры волновой передачи: *a* — типовая конструкция передачи; *б* — вариант исполнения фланца гибкого колеса; *в* — гибкое колесо со шлицами

Подстановка значения ширины венца в условие прочности после преобразований дает значение делительного диаметра гибкого зубчатого колеса

$$d_1 = [10T_T K / (\psi_{bd} [\sigma]_{\text{см}})]^{1/3}. \quad (3.97)$$

При кулачковом генераторе волн делительный диаметр предварительно принимают равным внутреннему диаметру  $D$  гибкого колеса, который считают приблизительно равным наружному диаметру гибкого подшипника (табл. 3.18).

Число зубьев  $z_1$  гибкого колеса определяют в зависимости от того, какое колесо вращается. При подвижном гибком колесе

$$z_1 = u K_z v, \quad (3.98)$$

при подвижном жестком колесе

$$z_1 = (u - 1) K_z v. \quad (3.99)$$

**Подшипники шариковые однорядные для волновых передач (ГОСТ 23179—78)**

Обозначение подшипника	Размеры, мм					Число шариков	Предельная частота вращения, об/мин
	$d$	$D$	$B$	$r$	$d_{III}$		
806	30	42	7	0,5	3,969	21	3000
808	40	52	8			23	
809	45	62	9			21	
812	60	80	13			23	
815	75	100	15	1,0	9,128	21	
818	90	120	18		11,113	23	
822	110	150	24	1,0	14,288	21	1500
824	120	160					
830	150	200	30	1,5	19,050	23	
836	180	240	35				
844	220	300	45	2,5	28,575	23	1000
848	240	320	48				
860	300	400	60				
862	310	420	70				
872	360	480	72	3,5	44,450		

$d$  — внутренний диаметр подшипника;  $D$  — наружный диаметр подшипника;  $B$  — ширина подшипника;  $r$  — радиус скруглений кромок колец;  $d_{III}$  — диаметр шариков.

Модуль зубьев равен

$$m = d_1/z_1. \quad (3.100)$$

После вычисления его по (3.100) необходимо принять ближайшее стандартное значение, причем возможно использование модулей, мм: 0,2; 0,22; 0,28; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45. Модули меньше 0,2 мм применяют редко из-за сложности нарезания внутренних зубьев жесткого колеса.

Уточняют делительный диаметр гибкого колеса при дисковом генераторе волн:

$$d_1 = mz_1. \quad (3.101)$$

Находят передаточное число передачи в зависимости от того, какое колесо вращается. При подвижном гибком колесе

$$u' = z_1 / (K_z v), \quad (3.102)$$

при подвижном жестком колесе

$$u' = z_1 / (K_z v) + 1. \quad (3.103)$$

Вычисляют отклонение передаточного числа от требуемого, %,

$$\Delta u = 100(u - u') / u \leq [\Delta u], \quad (3.104)$$

где  $[\Delta u]$  — допускаемое отклонение, %, передаточного числа от требуемого в соответствии с техническим заданием на ММ.

При невыполнении условия (3.104) необходимо изменить  $z_1$  так, чтобы условие было выполнено, и затем скорректировать значение делительного диаметра гибкого зубчатого колеса.

Число зубьев жесткого колеса

$$z_2 = z_1 + K_z v. \quad (3.105)$$

Толщина зубчатого венца стального гибкого колеса

$$h_1 = (70 + 0,5u) m z_1 \cdot 10^{-4}, \text{ мм.} \quad (3.106)$$

Толщина оболочки гибкого колеса

$$h_2 = (0,5 \dots 0,8) h_1. \quad (3.107)$$

Относительный боковой зазор между зубьями ненагруженной передачи

$$\bar{j}_{\max} = j_{\max} / m = T_{\max} b / (d_1^2 h_2 G m) + 4 \cdot 10^{-4} (u - 60), \quad (3.108)$$

где  $j_{\max}$  — необходимый боковой зазор между зубьями ненагруженной передачи, мм;  $G$  — модуль упругости второго рода для материала гибкого колеса (для стали  $G = 8,1 \cdot 10^4$  МПа).

Относительное радиальное упругое деформирование гибкого колеса

$$w_0^* = w_0/m = 0,89 + 8 \cdot 10^{-4}z_1 + 2j_{\max}, \quad (3.109)$$

где  $w_0$  — радиальное упругое деформирование гибкого колеса, мм.  
 Коэффициент смещения исходного контура зубьев гибкого ко-  
 леса

$$x_1 = (1,35 - w_0^*)/(0,85z_1^{-1/3} - 0,04). \quad (3.110)$$

Коэффициент смещения исходного контура зубьев жесткого  
 колеса

$$x_2 = x_1 + w_0^* - 1. \quad (3.111)$$

Относительная глубина захода зубьев

$$h_d^* = h_d/m = 4w_0^* - (4,6 - 4w_0^*) \cdot 10^{-3}z_1 - 2,48, \quad (3.112)$$

где  $h_d$  — глубина захода зубьев, мм.

Диаметр окружности впадин зубьев гибкого колеса

$$d_{f1} = m (z_1 - 2h_d^* - 2c^* + 2x_1). \quad (3.113)$$

Диаметр окружности вершин зубьев гибкого колеса

$$d_{a1} = d_{f1} + 2(h_d^* + c^*)m. \quad (3.114)$$

Диаметр окружности вершин зубьев жесткого колеса

$$d_{a2} = d_{a1} - 2(h_d^* - w_0^*)m. \quad (3.115)$$

Диаметр окружности впадин зубьев жесткого колеса

$$d_{f2} = d_{a1} + 2(0,15 + w_0^*)m. \quad (3.116)$$

Для гибкого колеса передачи с кулачковым генератором волн  
 уточняют значение толщины венца по формуле

$$h_1 = 0,5(d_{f1} - D). \quad (3.117)$$

Длина гибкого колеса с дном (см. рис. 3.6, а)  $L = 0,8D$ , со шлицами (рис. 3.6, в)  $L = 0,7D$ .

Параметры остальных частей гибкого колеса:  $h_3 = (0,7.. 1) h_2$ ;  $h_4 = 2h_1$ ;  $h_5 > 0,16D$ ;  $c = 0,2b$ .

Ширина зубчатого венца жесткого колеса

$$b_2 = b + 0,6b^{0,5}. \quad (3.118)$$

Длина шлицев  $b_3 = 0,5b$ .

Определяют основные геометрические параметры генератора волн.

Геометрию кулачкового генератора (рис. 3.7) определяет радиус-вектор поперечного сечения.

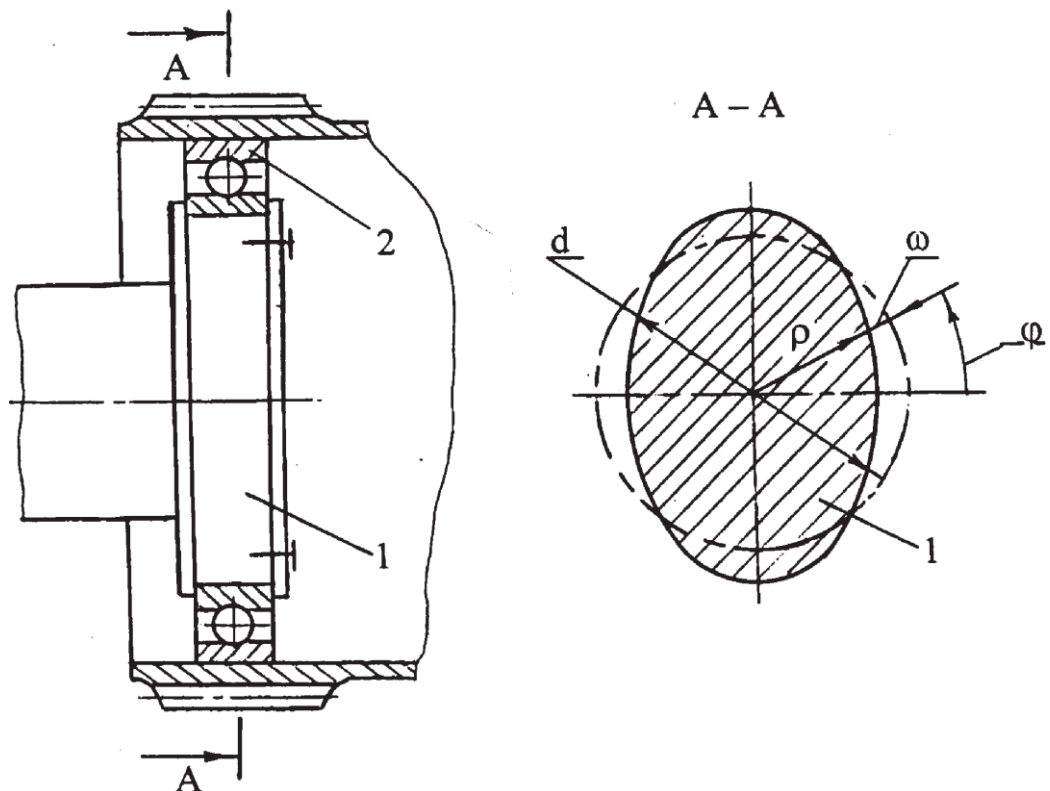


Рис. 3.7. Кулачковый генератор волн: 1 — кулачок; 2 — гибкий подшипник

Радиус-вектор кулачка в каждой четверти равен

$$\rho = 0,5d_{\Pi} + WmK_{\alpha}, \quad (3.119)$$

где  $d_{\Pi}$  — внутренний диаметр гибкого подшипника;  $W$  — коэффициент радиальной деформации (табл. 3.19);  $K_{\alpha}$  — коэффициент, зависящий от угла зацепления  $\alpha$  ( $K_{\alpha} = 1$  для  $\alpha = 20^{\circ}$ ;  $K_{\alpha} = 0,89$  для  $\alpha = 30^{\circ}$ ).

Таблица 3.19

Угол $\varphi$	0	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
$W$	-1,25	-1,13	-0,91	-0,56	-0,15	0,26	0,57	0,76	0,87	0,9

Срок службы стандартных гибких подшипников составляет 10000 ч, допускаются кратковременные двукратные перегрузки.

Эксцентриситет дискового генератора волн (рис. 3.8) равен

$$e = 3,4w_0^*m. \quad (3.120)$$

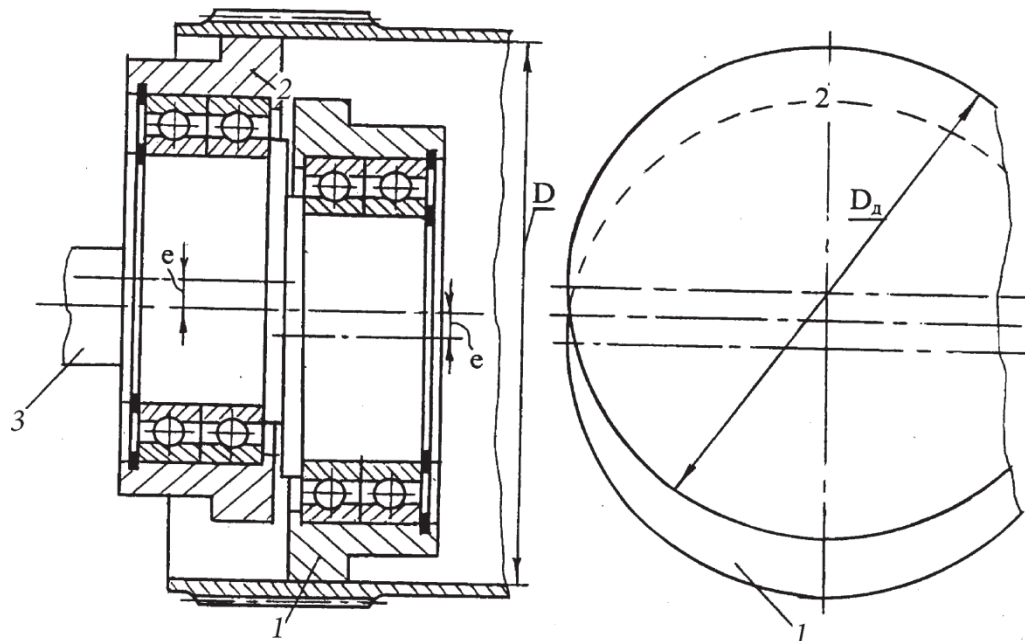


Рис. 3.8. Дисковый генератор волн: 1, 2 — диски; 3 — эксцентриковый вал  
Диаметр дисков

$$D_{\text{д}} = D + 2w_1 - 2e, \quad (3.121)$$

где  $w_1$  — максимальная упругая деформация гибкого колеса с учетом податливости генератора волн и жесткого колеса, а также отклонений размеров от номинальных при изготовлении.

Значение  $w_1$  определяют по формуле

$$w_1 = w_0^* m(0,97 + 0,025\sigma_{\text{см}}^{0,5}), \text{ мм.} \quad (3.122)$$

Проверочные расчеты начинаются с проверки гибкого колеса на выносливость.

Определяют запас усталостной прочности гибкого колеса по формуле

$$s = 0,286\sigma_{-1} u d_1 (K_d K_\sigma w_0^* E h_1)^{-1} \{1 + 0,15[d_1/L + T_T u / (w_0^* d_1 E h_1^2)]^2\}^{-0,5}, \quad (3.123)$$

где  $E$  — модуль упругости первого рода материала гибкого колеса (для стали  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа);  $\sigma_{-1}$  — предел выносливости материала гибкого колеса (см. табл. 3.17);  $K_d$  — коэффициент увеличения напряжения от сил в зацеплении;  $K_\sigma$  — эффективный коэффициент концентрации напряжений у основания зуба.

Условие обеспечения необходимой выносливости гибкого колеса

$$s \geq [s], \quad (3.124)$$

где  $[s] = 1,2$  — минимальный допускаемый запас усталостной прочности.

Величину коэффициента  $K_d$  определяют по формуле

$$K_d = 1 + 2,2 \cdot 10^{-8} T_T / (d_1 h_1^2), \quad (3.125)$$

а коэффициента  $K_\sigma$  — по формуле

$$K_\sigma = 1 + 0,05[(h_a^* + c^*) m d / (R_{\min} h_1)]^{0,5} (R_{\min} + 0,01) / (R_{\min} + 0,02), \quad (3.126)$$

где  $R_{\min}$  — минимальный радиус переходной поверхности, равный

$$R_{\min} = m(h_a^* + c^* - x_1 - \rho^*) / (h_a^* + c^* - x_1 - \rho^* + 0,5z_1) + m\rho^*. \quad (3.127)$$

Значения входящих в (3.127) величин:  $c^* = 0,25$  и  $\rho^* = 0,4$  при  $m > 1$  мм;  $c^* = 0,35$  и  $\rho^* = 0,4$  при  $m = 1 \dots 0,5$  мм;  $c^* = 0,5$  и  $\rho^* = 0,33$  при  $m < 0,5$  мм.

Вероятность  $P$  неразрушения гибкого зубчатого колеса в зависимости от коэффициента запаса усталостной прочности приведена в табл. 3.20.

Таблица 3.20

**Вероятность  $P$  неразрушения гибкого зубчатого колеса и коэффициент  $K_L$  вероятности неразрушения гибкого подшипника**

$s$	1,8	1,7	1,6	1,55	1,5	1,45	1,4	1,3	1,2
$P, \%$	99,8	99,6	99	98,5	97,8	96,7	95,1	90	87
$K_L$	0,5	0,6	0,66	0,69	0,73	0,8	0,9	1	

Уточняют КПД передачи. Потери в волновой передаче складываются из потерь в зацеплении и потерь при вращении генератора волн. Сопротивлением подшипников быстроходного и тихоходного валов пренебрегают. В этом случае КПД равен

$$\eta = [1 + 1,11vf_1/\cos^2\alpha + 0,3uf_2\operatorname{tg}(\alpha + \rho')]^{-1}, \quad (3.128)$$

где  $f_1 = 0,03 \dots 0,05$  — коэффициент, учитывающий трение в зубчатом зацеплении;  $f_2 = 0,0015 \dots 0,003$  — условный коэффициент, учитывающий трение во всех элементах генератора волн;  $\rho' = \operatorname{arctg} f_1$  — приведенный угол трения.

После уточнения КПД выполняют тепловой расчет передачи. В процессе работы редуктор нагревается. Температуру масла и внутренней поверхности корпуса редуктора определяют по формуле

$$t_M = P_B K_t (1 - \eta) / (K_T A) + 20, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (3.129)$$

где  $P_B$  — мощность на быстроходном валу, Вт;  $K_t = t_p/t_{\text{ц}}$  — коэффициент продолжительности работы редуктора ( $t_p$  — время работы редуктора в течение цикла;  $t_{\text{ц}}$  — длительность цикла);  $K_T$  — коэффициент теплоотдачи (при естественном охлаждении  $K_T = 8 \dots 15$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C); при охлаждении с помощью вентилятора  $K_T = 18 \dots 24$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C));  $A = (8 \dots 10) d_1^2$  — поверхность охлаждения редуктора, м<sup>2</sup>.

Затем проверяют выполнение условия

$$t_M \leq [t_M], \quad (3.130)$$

где  $[t_M]$  — допускаемая температура ( $[t_M] = 85 \dots 90$  °C — для минеральных масел по ГОСТ 20799—88;  $[t_M] = 100 \dots 120$  °C — для авиационных масел).

Проверку передачи на соответствие техническому заданию по кинематической погрешности и мертвому ходу производят так, как указано в п. 3.3.6.

### **Передачи винт-гайка скольжения**

#### **Исходные данные:**

- номинальная нагрузка на гайке  $F_a, \text{H}$ ;
- номинальная скорость гайки  $v, \text{м/с}$ ;
- максимальное рабочее перемещение гайки  $s, \text{мм}$ ;
- допустимая величина кинематической погрешности;
- допустимая величина мертвого хода (для передач с реверсивной нагрузкой);
- срок службы (долговечность) передачи;
- прочие (массогабаритные показатели, способ крепления, конфигурация корпуса и пр.).

Для определенности принято, что ВГС осуществляет преобразование вращательного движения в поступательное, ведущим звеном является винт.

Кинематический расчет ВГС не может быть выполнен без конкретного значения диаметра вала. Поэтому следует определить расчетный средний диаметр резьбы вала по критерию износостойкости, используя формулу

$$d_2 \geq K_p \sqrt{\frac{F_a}{\gamma[q]}}, \quad (3.131)$$

где  $K_p = \sqrt{\frac{p}{-t}}$  — коэффициент, зависящий от типа резьбы (для трапецеидальной и прямоугольной резьб  $K_p = 0,8$ ; для упорной резьбы  $K_p = 0,65$ );  $h$  — высота резьбового выступа;  $p$  — шаг резьбы;  $\gamma = 1,2 \dots 3,5$  — коэффициент высоты гайки;  $[q]$  — допускаемое давление между рабочими поверхностями резьбы винта и гайки (в паре «сталь — чугун»  $[q] = 5 \dots 6$  МПа; в паре «сталь — бронза»  $[q] = 9 \dots 11$  МПа).

Затем по стандартам на резьбы и расчетному значению среднего диаметра подбирают резьбу, у которой  $d_2$  равен или больше расчетного, и далее наружный  $d$  и внутренний  $d_1$  диаметры. В табл. 3.21 приведена выдержка из стандарта на трапецеидальную резьбу [16].

Таблица 3.21

Параметры трапецеидальной резьбы, мм

$p$	$d_2$	$d_1$	$d$	$p$	$d_2$	$d_1$	$d$	$p$	$d_2$	$d_1$	$d$
2	7	6	8	3	8,5	7	10	4	14	12	16
	9	8	10		10,5	9	12		16	14	18
	11	10	12		12,5	11	14		18	16	20
	13	11	14		28,5	27	30		63	61	65
	15	14	16		30,5	29	32		68	66	70
	17	16	18		32,5	31	34		73	71	75
$p$	$d_2$	$d_1$	$d$	$p$	$d_2$	$d_1$	$d$	$p$	$d_2$	$d_1$	$d$
5	19,5	17	22	6	27	24	30	8	20	16	24
	21,5	19	24		29	26	32		24	20	28
	23,5	21	26		31	28	34		40	36	44
	25,5	23	28		33	30	36		44	40	48
	82,5	80	85		35	32	38		48	44	52
	87,5	85	90		37	34	40		56	52	60

Определяют необходимую угловую скорость винта

$$\omega = 2000\pi v / (pK), \quad (3.132)$$

где  $K$  — число заходов резьбы; обычно ВГС выполняют однозаходными, и  $K = 1$ , но при необходимости в преобразователях движения ММ могут применяться и многозаходные резьбы.

В заключение кинематического расчета вычисляют угол подъема винтовой линии

$$\psi = \arctg \frac{pK}{\pi d_2}. \quad (3.133)$$

Характерной особенностью передачи ВГС является то, что ее кинематический расчет включает в себя значительную часть **проектировочного расчета**. Кроме уже полученных параметров резьбы находят крутящий момент на винте

$$T = F_a d_2 \operatorname{tg}(\psi + \rho') / 2, \quad (3.134)$$

где  $\rho'$  — приведенный угол трения в резьбе, равный

$$\rho' = \operatorname{arctg}[f/\cos(\alpha/2)], \quad (3.135)$$

$f$  — коэффициент трения скольжения в резьбе (в зависимости от материала гайки  $f = 0,1 \dots 0,2$ );  $\alpha$  — угол профиля резьбы (для трапецеидальной резьбы  $\alpha = 30^\circ$ , для упорной —  $\alpha/2 = 3^\circ$ , для прямоугольной —  $\alpha = 0$ ).

В том случае, если  $\psi < \rho'$ , передача является самотормозящейся. Дополнительно вычисляют КПД винтовой пары

$$\eta_{\text{ВП}} = \operatorname{tg}\psi / \operatorname{tg}(\psi + \rho'). \quad (3.136)$$

Практически КПД ВГС лежит в пределах  $\eta_{\text{ВП}} = 0,25 \dots 0,5$ . Высоту гайки определяют по формуле

$$H = \gamma d_2 \quad (3.137)$$

с округлением полученного значения по ГОСТ 6636—69.

Число витков резьбы в гайке

$$z = H/p. \quad (3.138)$$

Наружный диаметр  $D$  гайки принимают в зависимости от ее материала:  $D \approx 1,5d$  — для чугунной;  $D \approx 1,3d$  — для бронзовой.

Диаметр и высота упорного бурта гайки равны:  $D_1 = 1,3D$ ;  $a = (0,2 \dots 0,3) D$ .

**Проверочные расчеты** содержат проверку винта и конструктивных элементов гайки.

#### Условие прочности винта

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{0,5} \leq [\sigma], \quad (3.139)$$

где  $\sigma_{\text{ЭКВ}}$  — эквивалентное напряжение в опасном сечении винта;  $\sigma$  — нормальное напряжение, равное

$$\sigma = 4F_a / (\pi d_1^2); \quad (3.140)$$

Касательное напряжение  $\tau$  равно:

$$\tau = 16T/(\pi d_1^3); \quad (3.141)$$

$[\sigma]$  — допускаемое нормальное напряжение для материала винта.

**Проверку винта на устойчивость** производят в том случае, если рабочая нагрузка — сжимающая. Определяют радиус инерции поперечного сечения винта, который для круглого сечения равен  $i = 0,25d_1$ , затем по (3.58) находят значение гибкости  $\lambda$ , а по табл. 3.14 — коэффициент  $\varphi$ . Вычисляют допускаемые по условию устойчивости нормальное напряжение и силу сжатия:

$$[\sigma_y] = \varphi[\sigma], \quad (3.142)$$

$$[F_a] = \pi d_1^2[\sigma_y]/4. \quad (3.143)$$

Устойчивость винта обеспечивается, если  $F_a \leq [F_a]$ .

Кроме того, винты, у которых  $\lambda \geq 100$ , проверяют **по критической частоте вращения**. Критическая частота вращения — меньшая из полученных по формулам

$$n_{кр} = 5 \cdot 10^7 \nu d_1 k / l^2, \quad (3.144)$$

$$n_{кр} = 8 \cdot 10^4 / d_1, \quad (3.145)$$

где  $\nu$  — коэффициент, зависящий от способа закрепления винта (см. табл. 3.13).

Винт проходит по этому условию, если частота вращения винта не больше критической, т. е.

$$n = 30 \omega / \pi \leq n_{кр}. \quad (3.146)$$

**Витки резьбы гайки** проверяют **на изгиб**

$$\sigma_{и} = K_{и} F_a / (dH) \leq [\sigma]_{и}, \quad (3.147)$$

где  $K_{и}$  — коэффициент типа резьбы (для трапецеидальной резьбы  $K_{и} = 1,3$ ; для упорной —  $K_{и} = 1,5$ ; для прямоугольной —  $K_{и} = 1,9$ );  $[\sigma]_{и}$  — допускаемое напряжение изгиба (для чугунных гаек  $[\sigma]_{и} = 25$  МПа; для бронзовых —  $[\sigma]_{и} = 40$  МПа).

**Тело гайки проверяют по нормальным напряжениям**

$$\sigma_r = 5,2F_a / [\pi(D^2 - d^2)] \leq [\sigma]_r, \quad (3.148)$$

где  $[\sigma]_r$  — допускаемое нормальное напряжение для материала гайки; для чугунных гаек  $[\sigma]_r = 20$  МПа; для бронзовых —  $[\sigma]_r = 40$  МПа.

**Бурт гайки проверяют на изгиб и смятие:**

$$\sigma_{и} = 3F_a (D_1 - D) / (\pi D a^2) \leq [\sigma]_{и}, \quad (3.149)$$

$$\sigma_{см} = 4F_a / [\pi(D_1^2 - D^2)] \leq [\sigma]_{см}, \quad (3.150)$$

где  $[\sigma]_{\text{см}} = 60 \text{ МПа}$  — допускаемое напряжение смятия.

Проверку передачи на соответствие техническому заданию по кинематической погрешности и мертвому ходу производят так, как указано в п. 3.3.7.

### 3.2.10. Шарико-винтовые передачи

#### Исходные данные:

- номинальная нагрузка на гайке  $F_a$ , Н;
- номинальная скорость гайки  $v$ , м/с;
- номинальная угловая скорость винта  $\omega$ , с<sup>-1</sup>;
- максимальное рабочее перемещение гайки  $s$ , мм;
- допустимая величина кинематической погрешности;
- допустимая величина мертвого хода (для передач с реверсивной нагрузкой);
- нагрузочная диаграмма (циклограмма);
- срок службы (долговечность) передачи;
- прочие (массогабаритные показатели, способ крепления, конфигурация корпуса и пр.).

Для определенности принято, что ШВП осуществляет преобразование вращательного движения в поступательное, ведущим звеном является винт.

**Геометрический расчет** ШВП предполагает определение ее размеров по условию обеспечения заданного техническими требованиями на ММ передаточного отношения.

Решая уравнение (3.132) относительно  $p$ , получают шаг резьбы винта

$$p = 2000 \pi v / (\omega K), \text{ мм.} \quad (3.151)$$

Результат округляют до ближайшего стандартного значения из ряда, мм: 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 24.

Диаметр шариков принимают по рекомендации  $d_{\text{ш}} = 0,6p$  с округлением до ближайшего большего стандартного значения, мм: ... 1,0; 1,2; 1,3; 1,5; 1,588; 1,984; 2,0; 2,381; 2,5; 2,778; 3,0; 3,175; 3,5; 3,572; 4,0; 4,366; 4,5; 4,763; 5,0; 5,159; 5,5; 5,556; 5,8; 6,0; 6,35; 6,5; 6,747; 7,0; 7,144; 7,5; 7,938; 8,0; 8,3348,5; 8,731; 9,0; 9,575; 9,922; 10,0...

Находят внутренний диаметр резьбы винта

$$d_{\text{в}} = d_{\text{ш}}/K_{\text{ш}}, \quad (3.152)$$

где  $K_{\text{ш}} = 0,1 \dots 0,35$  — коэффициент диаметра шариков.

На этом этапе полезно выполнить предварительную проверку вала на прочность по нормальным напряжениям по формуле

$$\sigma = 4F_a/(\pi d_{\text{в}}^2) < \sigma_{\text{т}}/n_{\text{т}}, \quad (3.153)$$

где  $\sigma_{\text{т}}$  — предел текучести материала вала, ориентировочно можно принять  $\sigma_{\text{т}} = 800$  МПа;  $n_{\text{т}} = 1,5 \dots 2,5$  — коэффициент запаса прочности.

Диаметр окружности, на которой расположены центры шариков (см. рис. 3.9), равен

$$d_{\text{о}} = d_{\text{в}} + 2(r_{\text{ж}} - B'), \quad (3.154)$$

где  $B'$  — смещение профиля резьбы в радиальном направлении

$$B' = \left( r_{\text{ж}} - \frac{d_{\text{ш}}}{2} \right) \cos \beta; \quad (3.155)$$

$r_{\text{ж}}$  — радиус профиля резьбы винта и гайки.

Для уменьшения трения радиусы  $r_{\text{ж}}$  винта и гайки должны быть больше радиуса шариков. При  $d_{\text{ш}} \leq 8$  мм радиус профиля  $r_{\text{ж}} = 0,51d_{\text{ш}}$ ; при  $d_{\text{ш}} > 8$  мм радиус профиля  $r_{\text{ж}} = 0,53d_{\text{ш}}$ .

Полученный результат  $d_{\text{о}}$  округляют до ближайшего большего стандартного значения: 3,5; 4; 4,5; 5; 6; 8; 10; 12; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100.

Уточняют значение внутреннего диаметра винта

$$d_{\text{в}} = d_{\text{о}} - 2(r_{\text{ж}} - B'). \quad (3.156)$$

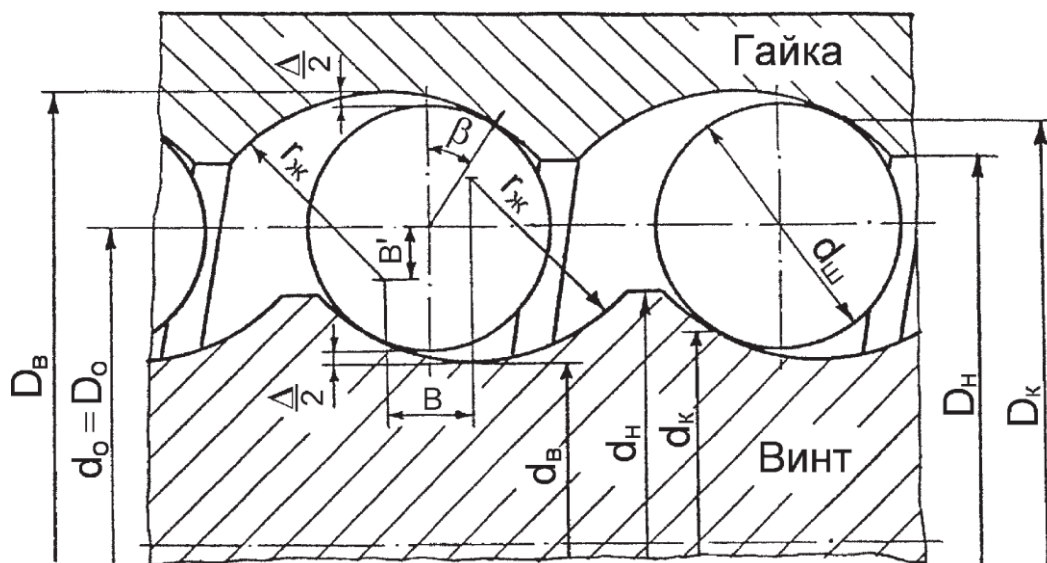


Рис. 3.9. Размеры шарико-винтовой передачи

Диаметр окружности, по которой происходит контакт шариков с винтом, равен

$$d_K = d_0 - d_{\text{ш}} \cos \beta, \quad (3.157)$$

где  $\beta$  — угол контакта шарика со стенками канавок, при расчете принимают  $\beta = 45^\circ$ .

Наружный диаметр винта

$$d_H = d_B + 2h_1, \quad (3.158)$$

где  $h_1 = (0,3 \dots 0,35)d_{\text{ш}}$  — глубина профиля резьбы у винта и гайки.

Число шариков в рабочей части ШВП с каналом возврата

$$z_{\text{ш}} = \frac{\pi d_0 \cdot K_B}{d_{\text{ш}}} - 1, \quad (3.159)$$

где  $K_B$  — число рабочих витков в одной замкнутой рабочей цепочке, его принимают из ряда 1,5; 2,5; 3,5; 4.

В ШВП, в которых шарики направляются из впадин одного витка во впадину соседнего, перекатываясь через выступ резьбы винта, канал возврата шариков выполняют в специальном вкладыше, который вставляют в окно гайки.

В этом случае число рабочих шариков в одном витке (в рабочей части винтового механизма) равно

$$z_{\text{ш}} = \frac{\pi d_0}{d_{\text{ш}}} - \frac{3p}{d_{\text{ш}}}, \quad (3.160)$$

где  $3p/d_{\text{ш}}$  — число шариков в канале возврата.

Как в первом, так и во втором случае полученные значения  $z_{\text{ш}}$  округляют до ближайшего меньшего целого числа. Если при расчете окажется  $z_{\text{ш}} > 65$ , то следует уменьшить число шариков, увеличив при этом их диаметр.

Число замкнутых рабочих цепочек в гайке определяют по условию износостойкости

$$P = \frac{F_a}{z_{\text{ш}} d_{\text{ш}}^2 \gamma_{\text{н}} i \cos \psi} \approx \frac{F_a}{z_{\text{ш}} d_{\text{ш}}^2 \gamma i} \leq [P]_{\text{ст}}, \quad (3.161)$$

где  $P$  — удельная осевая нагрузка, МПа;  $\gamma_{\text{н}} = 0,8$  — коэффициент неравномерности распределения нагрузки между шариками;  $i$  — число замкнутых цепочек;  $\cos \psi \approx 1$ , так как  $\psi$  мал;  $[P]_{\text{ст}}$  — допускаемая удельная осевая статическая нагрузка, МПа, ее определяют в зависимости от относительного радиального зазора  $\chi$  по графику (рис. 3.10); относительный радиальный зазор равен

$$\chi = \frac{\Delta}{d_{\text{ш}}}, \quad (3.162)$$

$\Delta$  — радиальный зазор

$$\Delta = 2 \left( r_{\text{ж}} - \frac{d_{\text{ш}}}{2} \right). \quad (3.163)$$

Число замкнутых рабочих цепочек в гайке определяют по формуле

$$i \geq \frac{F_a}{z_{\text{ш}} d_{\text{ш}}^2 \gamma [P]_{\text{ст}}}. \quad (3.164)$$

Полученное значение числа цепочек округляют до ближайшего большего целого.

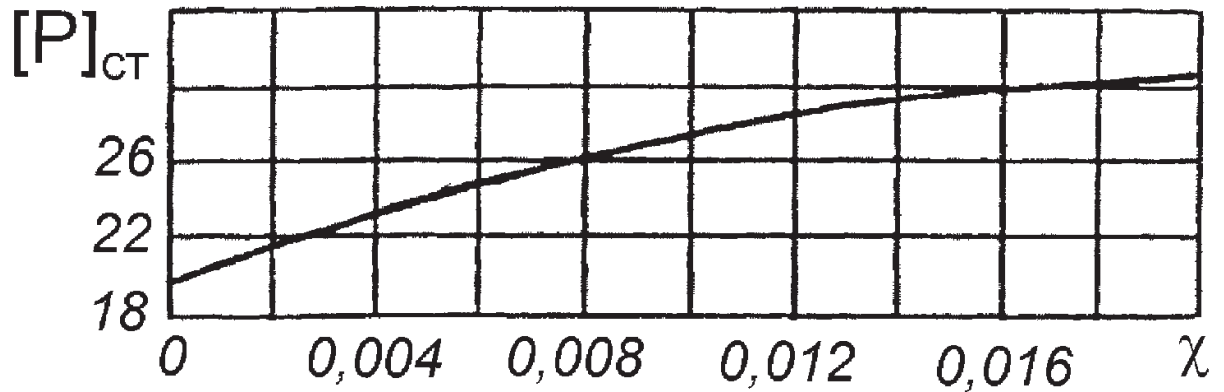


Рис. 3.10. Зависимость допускаемой удельной осевой нагрузки, МПа, от относительного радиального зазора, мм

Определение остальных геометрических параметров ШВП — см.

[26].

Для выполнения проверочных расчетов необходимо выбрать материалы элементов передачи. Марки сталей, чаще всего используемые для изготовления ШВП, и способы их упрочнения приведены в табл. 3.22.

Таблица 3.22

**Материалы шарико-винтовых передач**

Наименование элемента передачи	Марка стали	Способ упрочнения	Твердость HRC
Винт	ХВГ 7ХГ2ВМ	Объемная закалка	58...60 58...60
	8ХФ 50ХФА	Закалка при индукционном нагреве токами звуковых частот	58...62 58...60
	8ХФ	Закалка при индукционном нагреве токами радиочастот	58...62
	20Х3МВФ	Азотирование	более 60
Гайка и вкладыш	9ХС, ХВГ ШХ15 18ХГТ	Объемная закалка	58...60
	12ХНЗА	Цементация	58...60
Корпус	45	Не упрочняют	—
Шарик	ГОСТ 3722—81 Степень точности 1	—	≥ 63

Выполняют **проверку винта на прочность** по формуле

$$\sigma = 4F_{a\Sigma}/(\pi d_B^2) < \sigma_T/n_T, \quad (3.165)$$

где  $\sigma_T$  — для выбранного материала;  $F_{a\Sigma}$  — осевая нагрузка на винт с учетом предварительного натяга.

Предварительный натяг в ШВП (совместную деформацию шариков, винта и гайки) создают для выборки зазора в резьбе, ликвидации мертвого хода и повышения точности работы. В этом случае

$$F_{a\Sigma} = \begin{cases} F_H + F_a - \text{если } F_H < \frac{F_a}{2,83}; \\ F_H + 0,65F_a - \text{если } F_H > \frac{F_a}{2,83}, \end{cases} \quad (3.166)$$

где  $F_H$  — сила предварительного натяга, ее рекомендуют принимать  $F_H \approx (0,10 \dots 0,15)C$ ;  $C$  — динамическая грузоподъемность (см. формулу (3.167)).

В передаче без предварительного натяга  $F_{a\Sigma} = F_a$ .

По аналогии с подшипником качения при расчете ШВП определяют ее динамическую грузоподъемность

$$C = f_c (K_B i \cos \beta)^{0,7} z^{0,67} d_{ш}^{1,8}, \quad (3.167)$$

где  $f_c = 80 \dots 110$  — коэффициент динамической грузоподъемности;  $z = z_{ш}/K_B$  — число рабочих шариков в одном витке гайки.

**Проверку ШВП на долговечность** производят в том случае, если  $n_1 \geq 10$  об/мин, следующим образом.

Определяют эквивалентную динамическую нагрузку

$$F = \frac{\sum F_{a\Sigma i}^3 \cdot n_i \cdot t_i}{\sum n_i \cdot t_i} \quad (3.168)$$

где  $F_{a\Sigma i}$  — суммарная нагрузка на  $i$ -м участке нагрузочной диаграммы;  $n_i$  — частота вращения винта на  $i$ -м участке, об/мин;  $t_i$  — продолжительность действия нагрузки, с;  $m$  — число участков нагрузочной диаграммы.

Затем находят эквивалентную частоту вращения винта по формуле

$$n = \frac{\sum_{i=1}^m n_i \cdot t_i}{\sum t_i} \quad (3.169)$$

Условие обеспечения заданной техническими требованиями на ММ долговечности выражается формулой

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \cdot \left( \frac{C}{F} \right)^3 \geq [L]_h, \quad (3.170)$$

где  $L_h$  — долговечность работы передачи, ч;  $[L]_h$  — заданная долговечность работы передачи, ч.

ШВП, в которой частота вращения винта  $n_1 < 10$  об/мин, должна быть проверена на статическую грузоподъемность по условию

$$F_{a\Sigma\max} \leq C_o, \quad (3.171)$$

где  $F_{a\Sigma\max}$  — максимальная статическая нагрузка;  $C_o$  — статическая грузоподъемность, Н, равная

$$C_o = 78d_o d_{\text{ш}} K_z K_B i. \quad (3.172)$$

**Проверка ШВП на прочность по контактным напряжениям** выполняется по формуле

$$\sigma_{\text{к}} = 0,245 n_p^3 F_{a\Sigma} E^2 \left( \frac{2}{r_{\text{ш}}} - \frac{1}{r_{\text{ж}}} + \frac{2}{r_{\text{в}}} \right)^2 \leq [\sigma]_H, \quad (3.173)$$

где  $\sigma_{H\max}$  — максимальные контактные напряжения, МПа;  $[\sigma]_H$  — допускаемые контактные напряжения, МПа (для винтовых поверхностей винта и гайки твердостью HRC $\geq$ 53 и шариков твердостью HRC $\geq$ 63 допускаемые контактные напряжения равны  $[\sigma]_H = 3500 \dots 5000$  МПа);  $r_{\text{в}} = 0,5d_{\text{в}}$  — внутренний радиус винта;  $n_p$  — коэффициент нагрузки, определяемый по табл. 3.23 в зависимости от отношения главной кривизны А и главной кривизны Д:

$$A = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ r_{ш} & r_{ж} \end{pmatrix} \quad (3.174)$$

$$D = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_{ш}} + \frac{1}{r_{в}} \right) \quad (3.175)$$

Таблица 3.23

 Значения коэффициента нагрузки  $n_p$ 

А/Д	$n_p$	А/Д	$n_p$	А/Д	$n_p$
1,0000	1,0000	0,2738	0,9172	0,04237	0,6740
0,9623	0,9999	0,2620	0,9121	0,04032	0,6678
0,9240	0,9997	0,2501	0,9067	0,03823	0,6612
0,8852	0,9992	0,2380	0,9008	0,03613	0,6542
0,8459	0,9985	0,2257	0,8944	0,03400	0,6467
0,8059	0,9974	0,2132	0,8873	0,03183	0,6387
0,7652	0,9960	0,2004	0,8766	0,02962	0,6300
0,7238	0,9942	0,1873	0,8710	0,02737	0,6206
0,6816	0,9919	0,1739	0,8614	0,02508	0,6104
0,6384	0,9890	0,1603	0,8507	0,02273	0,5990
0,5942	0,9853	0,1462	0,8386	0,02033	0,5864
0,5489	0,9805	0,1317	0,8246	0,01787	0,5721
0,5022	0,9746	0,1166	0,8082	0,01533	0,5555
0,4540	0,9669	0,1010	0,7887	0,01269	0,5358
0,4040	0,9571	0,09287	0,7774	0,009934	0,5112
0,3518	0,9440	0,08456	0,7647	0,007018	0,4783
0,3410	0,9409	0,07600	0,7504	0,003850	0,4267
0,3301	0,9376	0,06715	0,7338		
0,3191	0,9340	0,05797	0,7144		
0,3080	0,9302	0,04838	0,6909		
0,2967	0,9262	0,04639	0,6856		
0,2853	0,9219	0,04439	0,6799		

**Вращающий момент, Нмм, на винте** при отсутствии натяга равен

$$T = F_a \frac{d_K}{2} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \rho_K); \quad (3.176)$$

в передаче с предварительным натягом

$$T = F_{a\Sigma} \cdot \frac{d_K}{2} \operatorname{tg}(\psi + \rho_K), \quad (3.177)$$

где  $\psi$  — угол подъема винтовой линии, равный

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{p_K}{\pi d_o}; \quad (3.178)$$

$\rho_K$  — приведенный угол трения качения

$$\rho_K = \operatorname{arctg} \frac{2f_K}{d_{\text{ш}} \sin \beta}, \quad (3.179)$$

$f_K$  — приведенный коэффициент трения качения (при закаленных винтовых поверхностях твердостью HRC  $\geq 58$  и стальных шариках твердостью HRC  $\geq 63$  принимают  $f_K = 0,007 \dots 0,01$  мм).

При вращении винта (гайки) шарики, благодаря трению, перекатываются по винтовым поверхностям винта и гайки и передают вращение от винта (гайки) к гайке (винту), перемещающейся поступательно. От проворачивания относительно своей продольной оси гайка (винт) удерживается направляющими или шпонкой, зафиксированной в корпусе.

КПД передачи равен

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg}(\psi + \rho_K)}. \quad (3.180)$$

В ШВП  $\rho_k \ll \psi$ , поэтому КПД даже при малых углах подъема винтовой линии достигает 80...90 %.

При  $\psi > 2^\circ$  КПД увеличивается мало, поэтому выгодно выбирать угол  $\psi$  небольшим, так как при этом снижается необходимый вращающий момент.

**Проверка винта на устойчивость и критическую частоту вращения** выполняется так же, как в п. 3.2.9.

Проверку передачи на соответствие техническому заданию по кинематической погрешности и мертвому ходу производят так, как указано в п. 3.3.8.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 1.1.6. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ**

### ВОПРОСЫ

1. Определение кинематической погрешности и мертвого хода преобразователей движения с различными видами передач.
2. Определение кинематической погрешности и мертвого хода многоступенчатого преобразователей движения.

### 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.
6. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей: учеб.пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 336 с. (Л4 с. 136-161).

### **1. Определение кинематической погрешности и мертвого хода преобразователей движения с различными видами передач**

#### **1.1. Цилиндрическая зубчатая передача**

Формула для определения максимальной кинематической погрешности  $F'_{i\max}$  цилиндрической зубчатой передачи по дуге делительной окружности имеет вид

$$F'_{i\max} = K\{[(F'_{i1})^2 + (E_{\Sigma M1})^2]^{0,5} + [(F'_{i2})^2 + (E_{\Sigma M2})^2]^{0,5}\}, \quad (3.181)$$

где  $K$  — коэффициент фазовой компенсации (для  $1,5 < u \leq 2,5$   $K \approx 0,84$ ; для  $u \leq 2,5$  и  $2,5 < u \leq 12,5$   $K \approx 0,97$  с точностью  $\pm 1\%$ );  $F'_{i1}$ ,  $F'_{i2}$  — допуск на кинематическую погрешность шестерни и колеса соответственно;  $E_{\Sigma M1}$ ,  $E_{\Sigma M2}$  — суммарная приведенная погрешность монтажа шестерни и колеса соответственно.

Допуски на кинематическую погрешность равны

$$F_{i1} = F_{P1} + f_{f1}; \quad (3.182)$$

$$F_{i2} = F_{P2} + f_{f2}, \quad (3.183)$$

где  $F_{P1}$ ,  $F_{P2}$  — допуск на накопленную погрешность шага шестерни и колеса соответственно (табл. 3.24);  $f_{f1}$ ,  $f_{f2}$  — допуск на погрешность профиля зуба, значения см. в табл. 3.25.

Таблица 3.24

**Значения  $F_p$ , мкм, цилиндрического зубчатого колеса**

Степень точности	Делительный диаметр, мм						
	До 32	Св. 32 до 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 125	Св. 125 до 200	Св. 200 до 315	Св. 315 до 500
6	22	25	28	34	40	45	56
7	32	36	42	48	55	67	80
8	45	50	56	67	80	95	110

Таблица 3.25

Значения  $f_f$ , мкм

Степень точности	$m_n$ , мм	Делительный диаметр, мм			
		До 50	Св. 50 до 125	Св.125 до 280	Св. 280 до 560
6	от 1 до 2	8		9	11
	св. 2 до 3,5	8	9	10	12
	св. 3,5 до 6	10		11	13
7	от 1 до 2	10	11	12	15
	св. 2 до 3,5	11	12	14	17
	св. 3,5 до 6	13	14	16	19
8	от 1 до 2	13	14	17	22
	св. 2 до 3,5	15	16	19	24
	св. 3,5 до 6	18	19	22	28

Суммарные погрешности монтажа равны

$$E_{\Sigma M1} = [(F_{r1} \operatorname{tg} \alpha / \cos \beta)^2 + (e_{a1} \operatorname{tg} \beta)^2]^{0,5}; \quad (3.184)$$

$$E_{\Sigma M2} = [(F_{r2} \operatorname{tg} \alpha / \cos \beta)^2 + (e_{a2} \operatorname{tg} \beta)^2]^{0,5}; \quad (3.185)$$

где  $F_{r1}, F_{r2}$  — монтажное радиальное биение шестерни и колеса соответственно (табл. 3.26);  $\alpha = 20^\circ$  — угол зацепления;  $\beta$  — угол наклона зуба;  $e_{a1}, e_{a2}$  — монтажное осевое биение шестерни и колеса соответственно (ориентировочно принимают  $e_a = 5 \dots 15$  мкм).

Таблица 3.26

 Значения  $F_f$ , мкм, цилиндрического зубчатого венца

Степень точности	$m_n$ , мм	Делительный диаметр, мм	
		До 125	Св. 125 до 400
6	от 1 до 3,5	25	36
	св. 3,5 до 6	28	40
7	от 1 до 3,5	36	50
	св. 3,5 до 6	40	56
8	от 1 до 3,5	45	63
	св. 3,5 до 6	50	71

Максимальная кинематическая погрешность передачи по вероятностному методу расчета равна

$$F'_{iop} = K_p F'_{iоmax}, \quad (3.186)$$

где  $K_p$  — вероятностный коэффициент фазовой компенсации (табл. 3.27);  $F'_{iоmax}$  — максимальная расчетная кинематическая погрешность по дуге делительной окружности колеса.

Таблица 3.27

Значения коэффициента  $K_p$  для степени риска 4,5 %

$u$	От 1 до 1,5	Более 1,5 до 2	Более 2 до 2,5	Более 2,5 до 3	Более 3 до 3,5	Более 3,5 до 4	Более 4 до 4,5	Более 4,5 до 5	Более 5 до 6,5	Более 6,5
$K_p$	0,95	0,83	0,81	0,91	0,92	0,88	0,92	0,94	0,94	0,96

Максимальная кинематическая погрешность по вероятностному методу расчета в угловых минутах равна

$$\delta\varphi = 6,88 F'_{iop}/d_2; \quad (3.187)$$

то же — в радианах

$$\delta\varphi = 0,002 F'_{iop}/d_2. \quad (3.188)$$

Максимальное значение мертвого хода цилиндрической передачи равно

$$J_{tmax} = 0,7(E_{HS1} + E_{HS2}) + [0,5(T_{H1}^2 + T_{H2}^2) + 2f_a^2 + (G'_{r1})^2 + (G'_{r2})^2]^{0,5}, \quad (3.189)$$

где  $E_{HS1}$ ,  $E_{HS2}$  — смещение исходного контура соответственно шестерни и колеса (табл. 3.28);  $T_{H1}$ ,  $T_{H2}$  — допуск на смещение исходного контура соответственно шестерни и колеса (табл. 3.29);  $\pm f_a$  — предельное отклонение межосевого расстояния (табл. 3.30);  $G'_{r1}$ ,  $G'_{r2}$  — радиальный зазор (люфт) в опорах вращения соответственно шестерни и колеса.

Таблица 3.28

 Значения  $E_{HS}$ , мкм, сопряжение С

Степень точности	Делительный диаметр, мм					
	До 80	Св. 80 до 125	Св. 125 до 180	Св. 180 до 250	Св. 250 до 315	Св. 315 до 400
6	74	87	100	115	130	140
7	80	100	110	120	140	160
8	90	110	120	140	160	180

Таблица 3.29

 Значения  $T_H$ , мкм, сопряжение С

Степень точности	Делительный диаметр, мм	
	До 125	Св. 125 до 400
6	90	120
7	120	140
8	140	180

Таблица 3.30

 Значения  $\pm f_a$ , мкм, сопряжение С

Межосевое расстояние, мм	До 80	Св. 80 до 125	Св. 125 до 180	Св. 180 до 250	Св. 250 до 315	Св. 315 до 400
$\pm f_a$	35	45	50	55	60	70

С целью уменьшения мертвого хода в зубчатых передачах ММ следует принимать сопряжение С. В тех случаях, когда это невозможно, необходимо использовать в преобразователях движения компенсаторы зазоров.

Радиальные зазоры в опорах определяют следующим образом:

$$G'_{r1} = G_{r11} + G_{r12}, \quad (3.190)$$

$$G'_{r2} = G_{r21} + G_{r22}, \quad (3.191)$$

где  $G_{r11}$ ,  $G_{r21}$  — радиальные зазоры ненагруженных подшипников в опорах соответственно шестерни и колеса (табл. 3.31);  $G_{r12}$ ,  $G_{r22}$  — радиальные зазоры в опорах, обусловленные посадками подшипников на валы и в корпус (табл. 3.32).

Таблица 3.31

**Максимальные зазоры  $G_{r11}$ ,  $G_{r21}$ , мкм, нормальной группы (подшипники шариковые радиальные однорядные)**

Диаметр вала, мм	До 10	Св. 10 до 18	Св. 18 до 40	Св. 40 до 50	Св. 50 до 65	Св. 65 до 80	Св. 80 до 100	Св.100 до 120
Максимальный зазор, мкм	13	18	20	23	28	30	36	41

Таблица 3.32

**Максимальные зазоры  $G_{r12}$ ,  $G_{r22}$ , мкм, для посадки подшипников в корпус Н7//0 (подшипники шариковые радиальные однорядные)**

Диаметр наружного кольца, мм	Св. 10 до 18	Св. 18 до 30	Св. 30 до 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 120	Св.120 до 150	Св.150 до 180	Св.180 до 200
Максимальный зазор, мкм	26	30	36	43	50	58	65	76

В табл. 3.31, 3.32 приведены данные для наиболее часто используемых подшипников и посадок (при посадке подшипника в корпус с зазором он обычно на вал монтируется с натягом).

Подшипники выбирают при проектировании валов передачи, а затем проверяют по динамической грузоподъемности. Только после этого можно точно определить зазоры и вычислить максимальный мертвый ход передачи.

Мертвый ход по вероятностному методу

$$J_{тp} = K_p J_{тmax}, \text{ мкм}, \quad (3.192)$$

в угловых единицах

$$J_{фp} = 0,002 K_p J_{тmax} / d_2, \text{ рад}, \quad (3.193)$$

где  $K_p$  — по табл. 3.26.

### Коническая зубчатая передача

Максимальное значение кинематической погрешности конической передачи определяют аналогично цилиндрической передаче (формула (3.181)) с учетом следующих отличий.

В качестве делительных диаметров колеса и шестерни используют средние делительные диаметры  $d_{m2} = 0,857d_{e2}$  и  $d_{m1} = 0,857d_{e1}$  соответственно.

Допуски на кинематическую погрешность шестерни и колеса равны

$$F'_{i1} = F_{p1} + 1,15 f_{zзо1}; \quad (3.194)$$

$$F'_{i2} = F_{p2} + 1,15 f_{zзо2}, \quad (3.195)$$

где  $f_{zзо1}, f_{zзо2}$  — допуск на циклическую погрешность зубцовой частоты соответственно шестерни и колеса.

Значения  $F_{p1}$  и  $F_{p2}$  определяют по эмпирическим формулам: для 6-й степени точности

$$F_{p1} = 3,15 d_{m1}^{0,5} + 6; \quad (3.196)$$

$$F_{p2} = 3,15 d_{m2}^{0,5} + 6, \quad (3.197)$$

для 7-й степени точности

$$F_{p1} = 4,45 d_{m1}^{0,5} + 9; \quad (3.198)$$

$$F_{p2} = 4,45 d_{m2}^{0,5} + 9, \quad (3.199)$$

для 8-й степени точности

$$F_{p1} = 6,3 d_{m1}^{0,5} + 12,5; \quad (3.200)$$

$$F_{p2} = 6,3 d_{m2}^{0,5} + 12,5. \quad (3.201)$$

В (3.196) — (3.201)  $F_{p1}$  и  $F_{p2}$  — в микрометрах,  $d_{m1}$  и  $d_{m2}$  — в миллиметрах.

В прямозубых конических передачах с модулями  $m = 1 \dots 3,5$  мм и  $u \leq 5$   $f_{z\alpha 1} \approx f_{z\alpha 2}$  и для 6-й степени точности равен 16 мкм, для 7-й — 22 мкм, для 8-й — 26 мкм.

В передачах с круговым зубом с  $m_{nm} = 1 \dots 3,5$  мм и  $u \leq 5$  для 6-й степени точности  $f_{z\alpha 1} \approx f_{z\alpha 2} = 5$  мкм, для 7-й —  $f_{z\alpha 1} \approx f_{z\alpha 2} = 7$  мкм, для 8-й —  $f_{z\alpha 1} \approx f_{z\alpha 2} = 8,5$  мкм.

Далее определяют максимальную кинематическую погрешность по вероятностному методу в микрометрах и (или) в радианах по формулам (3.186), (3.187), (3.188).

Максимальное значение мертвого хода конической зубчатой передачи равно

$$\begin{aligned}
 J_{t\max} = & 0,94 (E_{SS1} + E_{SS2}) + \{0,46[(f_{AM1} \sin \delta_1)^2 + (f_{AM2} \sin \delta_2)^2 \\
 & + (G_{a1} \sin \delta_1)^2 + (G_{a2} \sin \delta_2)^2 + E_{\Sigma}^2 + (G'_{r1} \cos \delta_1)^2 + (G'_{r2} \cos \delta_2)^2] \\
 & + 0,9 (T_{S1}^2 + T_{S2}^2)\}^{0,5}, \quad (3.202)
 \end{aligned}$$

где  $E_{SS1}$ ,  $E_{SS2}$  — наименьшее отклонение средней делительной толщины зуба по хорде соответственно шестерни и колеса (табл. 3.33);  $\pm f_{AM1}$ ,  $\pm f_{AM2}$  — предельное осевое смещение зубчатого венца соответственно шестерни и колеса (табл. 3.35);  $G_{a1}$ ,  $G_{a2}$  — осевой зазор в опорах вращения соответственно шестерни и колеса;  $\pm E_{\Sigma}$  — предельное отклонение межосевого угла (табл. 3.36);  $T_{S1}$ ,  $T_{S2}$  — допуск на среднюю делительную толщину зуба по хорде соответственно шестерни и колеса (табл. 3.37);  $G'_{r1}$ ,  $G'_{r2}$  — радиальные зазоры в опорах вращения.

С учетом того, что, как правило, в преобразователях движения используются понижающие передачи (т. е.  $1 \leq u \leq 5$ ), а также принятого выше ограничения внешнего конусного расстояния ( $50 \text{ мм} \leq R_e \leq 100 \text{ мм}$ ) табл. 3.33 преобразована в более удобную табл. 3.34.

При определении осевых  $G_a$  и радиальных  $G'_r$  зазоров в опорах валов следует учесть очень важное обстоятельство: в передаточных механизмах с коническими передачами применяются регулируемые шариковые и роликовые радиально-упорные подшипники. Ввиду того, что перепады температур при работе ММ, как правило, не настолько велики, чтобы вызвать заклинивание подшипников, рекомендуется их регулировка «на нуль», т. е. без осевой игры. В этом случае устраняются и составляющие  $G_{r11}$  и  $G_{r21}$ , так как в указан-

ных подшипниках осевой и радиальный зазоры взаимосвязаны. Пере-

кос валов не возникает, поэтому такая установка особенно благоприятна как для подшипников, так и для передач.

Таблица 3.33

Значения  $\pm f_{AM}$ , мкм, конического колеса с  $m_m (m_{mt}) = 1,3,5$  мм

Сопря- жение	Степень точности	Средний делительный диаметр $d_m$ , мм					
		До 125			Более 125		
		Угол делительного конуса					
		До 20°	Св. 20° до 45°	Св. 45°	До 20°	Св. 20° до 45°	Св. 45°
C	6	48		53	76	72	77
	7	54		59	76	81	86
	8	60		66	84	90	96
B	6	68		75	95	102	109
	7	76		84	106	114	122
	8	84		92	118	126	134

Таблица 3.34

Значения  $E_{ss}$ , мкм, для передач с  $1 < i < 5$  и  $50 < R_e < 100$  мм

Сопря- жение	Степень точности	Шестерня	Колесо	
			$d_{m2} \leq 125$ мм	$d_{m2} > 125$ мм
C	6	48	53	77
	7	54	59	86
	8	60	66	96
B	6	68	75	109
	7	76	84	122
	8	84	92	134

Таблица 3.35

Значения  $\pm f_{AM}$ , мкм, конического колеса с  $m_m (m_{mt}) = 1...3,5$  мм

Степень точности	$R_e$ , мм					
	От 50 до 58			Св. 50 до 100		
	Угол делительного конуса					
	До 20°	Св. 20° до 45°	Св. 45°	До 20°	Св. 20° до 45°	Св. 45°
6	14	12	5	48	40	17
7	20	17	7,1	67	56	24
8	28	24	10	95	80	34

Таблица 3.36

Значения  $\pm \epsilon_E$ , мкм

Сопря- жение	$R_e$ , мм					
	От 50 до 58			Св. 50 до 100		
	Угол делительного конуса шестерни $\delta_1$					
	До 15°	Св. 15° до 25°	Св. 25°	До 15°	Св. 15° до 25°	Св. 25°
<i>C</i>	18	26	30	26	30	32
<i>B</i>	30	42	50	42	50	60

Таблица 3.37

Значения  $T_s$ , мкм

Сопря- жение	Степень точности	$d_m \leq 125$ мм	$d_m > 125$ мм
<i>C</i>	6	52	70
	7	70	95
	8	80	110
<i>B</i>	6	65	85
	7	85	120
	8	100	130

Таким образом, осевой регулировкой обеспечивают устранение зазоров  $G_{a1}$ ,  $G_{a2}$ ,  $G_{r11}$  и  $G_{r21}$ , а радиальные люфты в подшипниковых опорах становятся равными:  $G'_{r1} = G_{r12}$ ,  $G'_{r2} = G_{r22}$ .

В общем случае посадки радиально-упорных подшипников в корпус те же, что и радиальных подшипников, следовательно, для определения  $G_{r12}$  и  $G_{r22}$  можно пользоваться табл. 3.32.

Мертвый ход по вероятностному методу расчета определяют по формулам (3.192), (3.193); значения  $Kp$  — по табл. 3.26.

### Реечная передача

Максимальная кинематическая погрешность передачи равна

$$F'_{i\max} = K_1 \{ [(F'_{i1})^2 + (E_{\Sigma M1})^2]^{0,5} + F'_{i2} \}, \quad (3.203)$$

где  $K_1$  — вероятностный коэффициент фазовой компенсации (табл. 3.38); смысл и значения  $F'_{i1}$  и  $E_{\Sigma M1}$  — см. п. 3.3.1;  $F'_{i2}$  — допуск на кинематическую погрешность рейки.

Таблица 3.38

Значения коэффициента  $K_1$  для реечных передач с модулями 1...16 мм

$z_2/z$	От 1 до, 25	Св. 1,25 до 1,5	Св. 1,5 до 1,75	Св. 1,75 до 2	Св. 2 до 2,25	Св. 2,25 до 2,5	Св. 2,5 до 2,75	Св. 2,7 до 3	Св. 3 до 3,25	Св. 3,25 до 3,5
$K_1$	0,67	0,7	0,75	0,77	0,8	0,83	0,87	0,9	0,93	0,97

Допуск на кинематическую погрешность рейки

$$F'_{i2} = |F_{p2}| + f_{f2}. \quad (3.204)$$

Значения  $F_{p2}$  указаны в табл. 3.39, а  $f_{f2}$  — в табл. 3.40.

Максимальная кинематическая погрешность по вероятностному методу

$$F'_{iop} = K_{p1} F'_{i\max}, \quad (3.205)$$

где  $K_{p1}$  — см. табл. 3.41.

Таблица 3.39

**Значения  $F_{p2}$ , мкм, для шага зубчатой рейки**

Степень точности	Длина рабочего участка рейки $l$ , мм							
	От 32 до 50	Св. 50 до 80	Св. 80 до 125	Св. 125 до 200	Св. 200 до 315	Св. 315 до 500	Св. 500 до 630	Св. 630 до 1000
6	± 25	± 28	± 34	± 40	± 45	± 56	± 63	± 80
7	± 36	± 42	± 48	± 55	± 67	± 80	± 90	± 110

Таблица 3.40

**Значения  $f_2$ , мкм, для профиля зуба рейки**

Степень точности	Модуль $m$ , мм				
	От 1 до 2	Св. 2 до 3,5	Св. 3,5 до 6	Св. 6 до 10	Св. 10 до 16
6	9	11	13	15	18
7	14	15	18	21	25

Таблица 3.41

**Значения коэффициента  $K_{p1}$  для степени риска 4,5 %**

$l/(\pi d)$	От 1 до 1,25	Более, 1,25 до 1,75	Более, 1,75 до 2,25	Более, 2,25 до 2,5	Более, 2,5 до 2,75	Более, 2,75 до 3	Более, 3 до 3,25	Более, 3,25
$K_{p1}$	0,76	0,88	0,84	0,9	0,93	0,86	0,9	0,94

Мертвый ход реечной передачи определяют так же, как для цилиндрической зубчатой передачи, с учетом того, что  $E_{HS2} = 0$ ;  $T_{H2} = 0$ ;  $G'_{r2} = 0$ :

$$J_{tmax} = 0,7E_{HS1} + [0,5T_{H1}^2 + 2f_a^2 + (G'_{r1})^2]^{0,5}. \quad (3.206)$$

Значения  $E_{HS1}$ ,  $T_{H1}$  и  $\pm f_a$  для реечной передачи приведены в табл. 3.42—3.44.

Таблица 3.42

**Значения  $E_{HS1}$ , мкм, реечной передачи (степень точности 6, сопряжение С)**

Делительный диаметр, мм	До 18	Св.18 до 30	Св.30 до 50	Св.50 до 80	Св.80 до 120	Св.120 до 180	Св.180 до 250	Св.250 до 315	Св.315 до 400
$E_{HS1}$	43	52	62	74	87	100	115	130	140

Таблица 3.43

**Значения  $T_{H1}$ , мкм, реечной передачи (степень точности 6, сопряжение С)**

Модуль, мм	От 1 до 3,5	Свыше 3,5 до 6,3	Свыше 6,3 до 10
$T_{H1}$	90	110	125

Таблица 3.44

**Значения  $\pm f_a$ , мкм, реечной передачи (сопряжение С)**

Делительный диаметр $d$ , мм	До 80	Св. 80 до 120	Св. 120 до 180	Св. 180 до 250	Св. 250 до 315	Св. 315 до 400
$\pm f_a$	37	43	50	58	65	70

Мертвый ход по вероятностному методу

$$J_{tp} = K_{p1} J_{tmax}, \text{ мкм}; \quad (3.207)$$

где  $K_{p1}$  — см. табл. 3.41.

### Червячная передача

Максимальная кинематическая погрешность передачи

$$F'_{iоmax} = 0,8\{[(f_{hk} + f_{f1})^2 + E_{\Sigma M1}^2]^{0,5} + [(F'_{i2})^2 + E_{\Sigma M2}^2]^{0,5}\}, \quad (3.208)$$

где  $f_{hk}$  — допуск на погрешность винтовой линии на длине нарезанной части червяка;  $f_{f1}$  — допуск на погрешность профиля червяка;  $F'_{i2}$  — допуск на наибольшую кинематическую погрешность колеса;  $E_{\Sigma M1}$ ,  $E_{\Sigma M2}$  — суммарная приведенная погрешность монтажа соответственно червяка и колеса.

Величины  $f_{hk}$  и  $f_{f1}$  определяют по формулам:  
 для 6-й степени точности

$$f_{hk} = 2,28m + 16,5, \text{ мкм}; \quad (3.209)$$

$$f_{f1} = 1,33m + 8,2, \text{ мкм}; \quad (3.210)$$

для 7-й степени точности

$$f_{hk} = 3,6m + 26, \text{ мкм}; \quad (3.211)$$

$$f_{f1} = 2,1m + 13, \text{ мкм}; \quad (3.212)$$

для 8-й степени точности

$$f_{hk} = 5,7m + 41, \text{ мкм}; \quad (3.213)$$

$$f_{f1} = 3,3m + 25, \text{ мкм}. \quad (3.214)$$

В (3.209) — (3.214) модуль  $m$  — в миллиметрах.  
 Выражение для вычисления  $E_{\Sigma M1}$  следующее:

$$E_{\Sigma M1} = 1,2[e_{a1}^2 + (f_{r1} \text{tg}\alpha \text{tg}\gamma)^2]^{0,5}, \quad (3.215)$$

где  $e_{a1} = 5...15$  мкм — осевое биение червяка;  $f_{r1}$  — радиальное биение червяка;  $\alpha = 20^\circ$  — угол зацепления;  $\gamma$  — угол подъема витка червяка.

Значения  $f_{r1}$  определяют так:  
для 6-й степени точности

$$f_{r1} = 0,044d_1 + 9,5, \text{ мкм}; \quad (3.216)$$

для 7-й степени точности

$$f_{r1} = 0,07d_1 + 15, \text{ мкм}; \quad (3.217)$$

для 8-й степени точности

$$f_{r1} = 0,11d_1 + 23,8, \text{ мкм}, \quad (3.218)$$

где  $d_1$  — делительный диаметр червяка, мм.

Угол  $\gamma$  находят по формуле

$$\gamma = \arctg(z_1 m / d_{w1}), \quad (3.219)$$

где  $d_{w1}$  — начальный диаметр червяка, и в (3.215) вместо  $\text{tg}\gamma$  может быть подставлено выражение  $z_1 m / d_{w1}$ .

Значение  $F'_{i2}$  равно

$$F'_{i2} = F_p + f_{f2}, \quad (3.220)$$

где  $F_p$  — допуск на накопленную погрешность шага червячного колеса;  
 $f_{f2}$  — допуск на погрешность профиля зуба.

Для 6-й степени точности

$$F_p = 3,15d_2^{0,5} + 6, \text{ мкм}; \quad (3.221)$$

$$f_2 = 0,63m + 0,008d_2 + 6,3, \text{ мкм}, \quad (3.222)$$

для 7-й степени точности

$$F_p = 4,45d_2^{0,5} + 9, \text{ мкм}; \quad (3.223)$$

$f_{f2} = m + 0,0125d_2 + 8, \text{ мкм}$ , (3.224) для 8-й степени точности

$$F_p = 6,3d_2^{0,5} + 12,5, \text{ мкм}; \quad (3.225)$$

$$f_{f2} = 1,6m + 0,02d_2 + 10, \text{ мкм}, \quad (3.226)$$

В (3.221) — (3.226)  $d_2$  и  $m$  — в миллиметрах.

Погрешность  $E_{\Sigma M2}$  находят по формуле

$$E_{\Sigma M2} = [(F_r \operatorname{tg} \alpha / \cos \beta)^2 + (e_{a2} \operatorname{tg} \beta)^2]^{0,5}, \quad (3.227)$$

где  $F_r$  — допуск на радиальное биение колеса;  $e_{a2} = 5 \dots 15 \text{ мкм}$  — осевое биение колеса;  $\beta$  — угол наклона зуба колеса ( $\beta = \gamma$ ).

Формулы для определения  $F_r$ :

для 6-й степени точности

$$F_r = 2,24m + 0,56d_2^{0,5} + 28, \text{ мкм}; \quad (3.228)$$

для 7-й степени точности

$$F_r = 3,15m + 0,79d_2^{0,5} + 40, \text{ мкм}; \quad (3.229)$$

для 8-й степени точности

$$F_r = 4m + d_2^{0,5} + 50, \text{ мкм}. \quad (3.230)$$

В (3.228) — (3.230)  $m$  и  $d_2$  — в миллиметрах.

Максимальная кинематическая погрешность по дуге делительной окружности колеса по вероятностному методу

$$F'_{iop} = K_p F'_{iomax} \quad (3.231)$$

где  $K_p = 0,86$  для степени риска 4,5 %.

Максимальная кинематическая погрешность по вероятностному методу расчета в угловых единицах — по (3.187).

Максимальное значение мертвого хода червячной передачи равно

$$J_{tmax} = 0,94E_{SS3} + [0,9(T_{S3}^2 + G_{a1}^2) + 1,56f_a^2 + (G'_{r1})^2 + (G'_{r2})^2]^{0,5}, \quad (3.232)$$

где  $E_{SS3}$  — наименьшее отклонение толщины витка червяка по хорде (табл. 3.45);  $T_{S3}$  — допуск на толщину витка по хорде (см. табл. 3.46);  $\pm f_a$  — предельное отклонение межосевого расстояния (см. табл. 3.47);  $G_{a1}$  — осевой зазор в опорах вращения червяка;  $G'_{r1}$ ,  $G'_{r2}$  — радиальный зазор (люфт) в опоре соответственно червяка и червячного колеса.

Таблица 3.45

**Значения  $E_{SS3}$ , мкм**

Сопря- жение	Степень точности	Модуль $t$ , мм	Межосевое расстояние $a_w$ , мм		
			До 80	Св. 80 до 125	Св.125 до 180
С	6	От 1 до 3,5	116	135	150
		Св. 3,5 до 6,3	120	137	150
		Св. 6,3 до 10	—		158
	7	От 1 до 3,5	140	158	176
		Св. 3,5 до 6,3	143	162	180
		Св. 6,3 до 10	—		190
	8	От 1 до 3,5	170	195	215
		Св. 3,5 до 6,3	180	205	225
		Св. 6,3 до 10	—		235
В	6	От 1 до 3,5	166	190	215
		Св. 3,5 до 6,3	170	192	215
		Св. 6,3 до 10	—		223
	7	От 1 до 3,5	190	213	241
		Св. 3,5 до 6,3	193	217	245
		Св. 6,3 до 10	—		255
	8	От 1 до 3,5	220	250	280
		Св. 3,5 до 6,3	230	260	290
		Св. 6,3 до 10	—		300

Таблица 3.46

**Значения  $T_{sz}$ , мкм**

Сопря- жение	Степень точности	Модуль $t$ , мм	Межосевое расстояние $a_w$ , мм	
			До 80	Св. 80 до 250
С	6	От 1 до 3,5	52	70
		Св. 3,5 до 6,3	60	
		Св. 6,3 до 10	—	80
	7	От 1 до 3,5	70	95
		Св. 3,5 до 6,3		
		Св. 6,3 до 10	—	110
	8	От 1 до 3,5	80	110
		Св. 3,5 до 6,3		
		Св. 6,3 до 10	—	

Окончание табл. 3.46

Сопряжение	Степень точности	Модуль $m$ , мм	Межосевое расстояние $a_w$ , мм	
			До 80	Св. 80 до 250
В	6	От 1 до 3,5	65	85
		Св. 3,5 до 6,3	75	
		Св. 6,3 до 10	—	100
	7	От 1 до 3,5	85	120
		Св. 3,5 до 6,3		
		Св. 6,3 до 10	—	140
	8	От 1 до 3,5	100	140
		Св. 3,5 до 6,3		
		Св. 6,3 до 10	—	

Таблица 3.47

**Значения  $\pm f_a$ , мкм, червячных передач**

Степень точности	Межосевое расстояние $a_w$ , мм		
	До 80	Св. 80 до 125	Св. 125 до 180
6	28	32	38
7	45	50	60
8	71	80	90

Вопрос об осевых зазорах в подшипниках червяков требует особого рассмотрения.

В тех случаях, когда червяк установлен на двух радиально-упорных подшипниках (рис. 3.11), необходимо предусматривать осевой зазор  $G_{a1}$  для компенсации температурных деформаций вала в результате его нагрева.

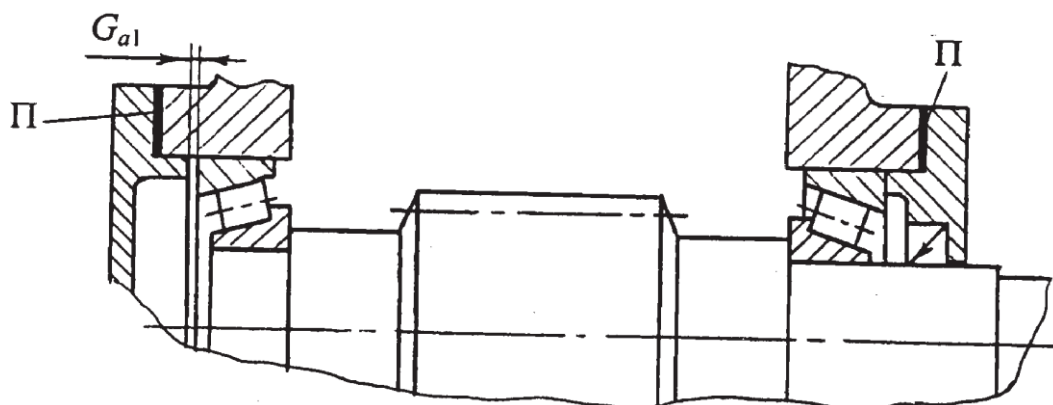


Рис. 3.11. Установка червяка на двух радиально-упорных подшипниках: П — регулировочные прокладки

Величина осевого зазора

$$G_{a1} = 12 \cdot 10^{-6} t l + 0,15, \text{ мм}, \quad (3.233)$$

где  $t$  — максимальный возможный перепад температур, °С;  $l$  — расстояние между подшипниками, мм.

Предельно допустимая температура для минеральных масел считается равной +110 °С, а начальная +20 °С, поэтому  $t = 90$  °С. Обычно в червячных редукторах расстояние между подшипниками червяка близко к величине диаметра делительной окружности колеса, поэтому

$$l \approx d_2 \approx 1,6 a_w, \quad (3.234)$$

Подстановка в (3.233) конкретной величины  $t$  и выражения (3.234) дает формулу, позволяющую найти зазор,

$$G_{a1} = 1,73 a_w + 150, \text{ мкм}. \quad (3.235)$$

В (3.235)  $a_w$  — в миллиметрах.

Существует другой способ установки червяка, при котором в одной опоре расположены два радиально-упорных подшипника (или сдвоенный радиально-упорный подшипник), а в другой — радиальный подшипник (см. рис. 3.12). Опора с двумя подшипниками является фиксирующей, она воспринимает как радиальную, так и осевую нагрузку любого направления. Другая опора — «плавающая» — воспринимает только радиальную нагрузку. Радиально-упорные подшипники регулируются на нулевой зазор, т. е.  $G_{a1} = 0$ ,  $G_{r11} = 0$ .

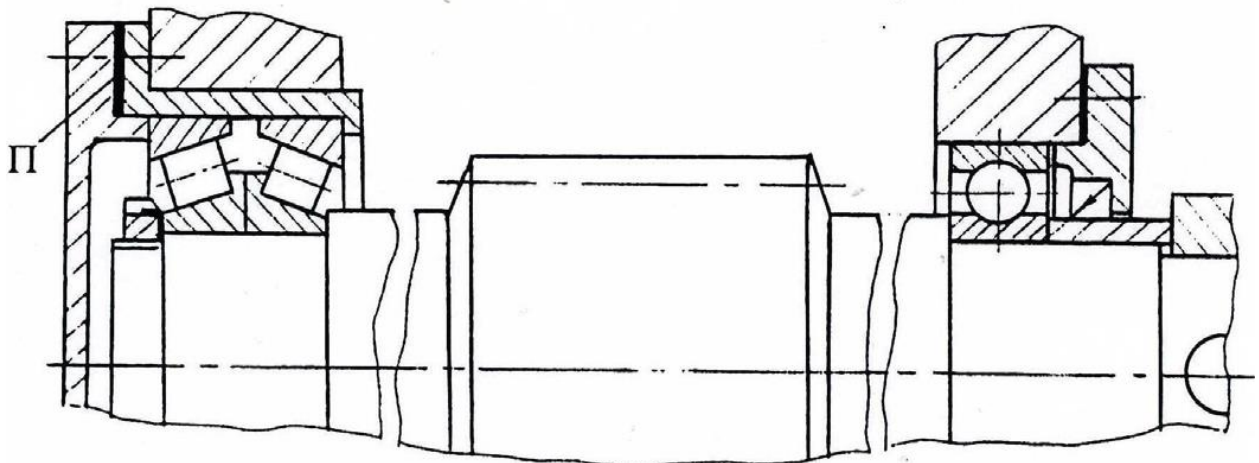


Рис. 3.12. Установка червяка в фиксирующей (левая) и плавающей (правая) опорах:  
 П — регулировочные прокладки

Необходимо, однако, подчеркнуть, что выше рассматривались червячные передачи, эксплуатируемые в тяжелом режиме. В том случае, если между срабатываниями ММ имеются большие промежутки времени (ММ работает с малой продолжительностью включения), опасность заклинивания подшипников снижается, и они могут быть отрегулированы на нулевые зазоры.

Значения  $\pm f_a$  могут быть определены по формуле

$$\pm f_a = B a_w^{0,5}, \text{ мкм}, \quad (3.236)$$

где  $B$  — коэффициент, зависящий от степени точности (для 6-й степени точности  $B = 6,95$ ; для 7-й  $B = 11$ ; для 8-й  $B = 17,4$ );  $a_w$  — в миллиметрах.

Формула (3.190) при определении радиального люфта в опорах червяка по рис. 3.12 с учетом того, что

$$G_{r11} = G_{a1} \operatorname{tg} \alpha_{\Pi} = (1,73 a_w + 150) \operatorname{tg} \alpha_{\Pi}, \quad (3.237)$$

принимает вид

$$G'_{r1} = (1,73 a_w + 150) \operatorname{tg} \alpha_{\Pi} + G_{r12}, \quad (3.238)$$

где  $\alpha_{\Pi}$  — угол конусности конического радиально-упорного подшипника (в зависимости от типоразмера подшипника  $\alpha_{\Pi} = 11^\circ \dots 15^\circ$ );  $G_{r12}$  — по табл. 3.31.

Подшипники червячного колеса регулируют на нулевые зазоры, поэтому  $G'_{r2} = G_{r22}$  (см. табл. 3.48).

Максимальные значения  $G_{a1}$ ,  $G'_{r1}$ ,  $G'_{r2}$ , мкм

Таблица 3.48

Максимальный зазор	Межосевое расстояние $a_w$ , мм		
	До 80	Св. 80 до 125	Св. 125 до 180
$G_{a1}$	257	318	391
$G'_{r1}$	105	128	155
$G'_{r2}$	43	58	65

Мертвый ход по вероятностному методу расчета

$$J_{tp} = K_p J_{tmax}, \text{ мкм}; \quad (3.239)$$

$$J_{\varphi p} = 0,002 K_p J_{tmax} / d_2, \text{ рад}, \quad (3.240)$$

где  $K_p = 0,86$ .

### 3.3.5. Волновая зубчатая передача

Максимальная кинематическая погрешность передачи равна

$$\delta\varphi_{max} = 13,6(F_{r1} + F_{r2})/[10^4(40 + d_1)], \text{ рад}, \quad (3.241)$$

где  $F_{r1}, F_{r2}$  — допуск на радиальное биение зубчатых венцов соответственно гибкого и жесткого колес, мкм (см. табл. 3.49);  $d_1$  — делительный диаметр колеса, мм.

Значения  $F_r$ , мкм, зубчатого венца мелкомодульного колеса

Таблица 3.49

**Значения  $F_r$ , мкм, зубчатого венца мелкомодульного колеса**

Степень точности	Модуль $m$ , мм	Делительный диаметр, мм		
		От 50 до 80	Св. 80 до 125	Св.125 до 500
6	0,1...0,5	19	22	26
	0,5...1,0	22	25	30
7	0,1...0,5	26	30	36
	0,5...1,0	30	36	42
8	0,1...0,5	32	38	45
	0,5...1,0	38	45	50

По вероятностному методу расчета кинематическую погрешность определяют по формуле

$$\delta\varphi_p = K_p \delta\varphi_{\max}, \text{ рад}, \quad (3.242)$$

где  $K_p = 0,96$  — коэффициент фазовой компенсации для степени риска 4,5%.

Для широкой гаммы волновых передач вероятностная кинематическая погрешность не превышает  $6 \cdot 10^{-4}$  рад.

Для большинства волновых передач мертвый ход по вероятностному методу  $J_{\text{фр}}$  лежит в пределах  $2,9 \cdot 10^{-4} \dots 2,6 \cdot 10^{-3}$  рад. Меньшие значения мертвого хода характерны для редукторов больших размеров (с диаметром гибкого колеса более 180 мм).

### **Передача винт-гайка скольжения**

Наиболее часто используются передачи для преобразования вращательного движения в поступательное, поэтому они и будут рассмотрены ниже.

Максимальная кинематическая погрешность передачи равна

$$F'_{i\text{оmax}} = (\delta t_{\Sigma}^2 + E_{\Sigma M}^2)^{0,5}, \quad (3.243)$$

где  $\delta t_{\Sigma} = 5 \dots 15$  мкм — разность между действительным и номинальным расстояниями любых несоседних профилей резьбы по среднему диаметру;  $E_{\Sigma M}$  — суммарная погрешность монтажа винта.

Значение  $E_{\Sigma M}$ :

$$E_{\Sigma M} = [e_a^2 + (e_r \operatorname{tg} \psi)^2]^{0,5}, \quad (3.244)$$

где  $e_a = 5 \dots 15$  мкм — осевое биение винта;  $e_r = 5 \dots 15$  мкм — радиальное биение винта;  $\psi = \operatorname{arctg}(pK/\pi d_2)$  — угол подъема винтовой линии резьбы.

Следует отметить, что величина  $\psi$  слабо влияет на значение  $F'_{i\text{оmax}}$ . В результате для оценки точности винтовой передачи можно считать  $F'_{i\text{оmax}} = 7 \dots 22$  мкм.

По вероятностному методу кинематическая погрешность равна

$$F'_{i\text{ор}} = K_p F'_{i\text{оmax}} = 0,86 F'_{i\text{оmax}} = 6 \dots 19 \text{ мкм}, \quad (3.244)$$

где  $K_p = 0,86$  — вероятностный коэффициент фазовой компенсации для степени риска 4,5 %.

Максимальное значение мертвого хода передачи равно

$$J_{t\text{max}} = b' \operatorname{tg} \psi + [(b'' - b')^2 \operatorname{tg}^2 \psi + b^2 \operatorname{tg}^2 \psi + G_{a1}^2 + G_{a2}^2]^{0,5} + \Delta_B + \Delta_{\text{ОП}}, \quad (3.245)$$

где  $b'$  — верхнее предельное отклонение среднего диаметра резьбы винта;  $b''$  — нижнее предельное отклонение среднего диаметра резьбы гайки;  $G_{a1}$ ,  $G_{a2}$  — осевые зазоры в опорах винта;  $\Delta_B$  — упругая деформация винта;  $\Delta_{\text{ОП}}$  — упругая деформация опоры.

Значения  $b$ ,  $b'$ ,  $b''$  для резьб с шагами 2 мм, 4 мм и 6 мм даны в табл. 3.50.

**Значения  $b, b', b''$ , мкм, для резьб с шагами 2 мм, 4 мм и 6 мм**

Шаг $p$ , мм	$b', b''$ , мкм, при степени точности						$b$ , мкм, при степени точности		
	7h		7e		8e		7H	8H	9H
	$b'$	$b''$	$b'$	$b''$	$b'$	$b''$			
2	0	-200	-71	-271	-71	-321	265	335	425
4		-265	-95	-360	-95	-430	355	450	560
6		-335	-118	-453	-118	-543	450	560	710

При установке винта в фиксирующей и плавающей опорах (аналогично установке червяка по рис. 3.12)  $G_{a1} = G_{a2} = 0$ .

Упругая деформация винта  $\Delta_B$  представляет собой изменение его длины под действием осевой силы  $F_a$ :

$$\Delta_B = 4 \cdot 10^3 F_a l / (\pi d_1^2 E), \text{ мкм}, \quad (3.246)$$

а  $\Delta_{\text{ОП}}$  является суммарной деформацией колец и тел качения подшипника

$$\Delta_{\text{ОП}} = F_a / (K_{\text{П}} d_{\text{ШВ}}), \text{ мкм}. \quad (3.247)$$

В формулах (3.246), (3.247)  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа — модуль упругости 1-го рода для стали;  $K_{\text{П}}$  — коэффициент, зависящий от типа подшипника ( $K_{\text{П}} = 70$  — для упорных роликовых подшипников);  $d_{\text{ШВ}} = d_2 + 0,5p$  — (2...5) мм — диаметр шейки вала под подшипник; длина  $l$  и внутренний диаметр резьбы винта  $d_1$  — в миллиметрах; сила  $F_a$  — в ньютонах.

Во многих случаях  $\Delta_{\text{ОП}} \ll \Delta_B$ , и величиной  $\Delta_{\text{ОП}}$  можно пренебречь. С учетом этого, а также при отсутствии зазоров в подшипниках формула (3.245) существенно упрощается:

$$J_{t\text{max}} = \{b' + [(b'' - b')^2 + b^2]^{0,5}\} \text{tg}\psi + 0,0061 F_a l / d_1^2, \text{ мкм}. \quad (3.248)$$

Степени точности и отклонения диаметров резьбы гайки и винта можно принимать в различных сочетаниях.

Мертвый ход передачи по вероятностному методу

$$J_{tp} = K_p J_{tmax} = 0,86 J_{tmax}. \quad (3.249)$$

### Шарико-винтовая передача

Максимальное значение кинематической погрешности шарико-винтовой передачи равно

$$F'_{iоmax} = e_p + 0,5V_{пр}, \quad (3.250)$$

где  $e_p$  — кинематическая погрешность, мкм;  $V_{пр}$  — ширина полосы колебаний кинематической погрешности, мкм.

Как  $e_p$ , так и  $V_{пр}$  зависят от рабочей длины винта  $l_p$  (табл. 3.51).

Вероятностное значение кинематической погрешности определяют по формуле (3.244).

Таблица 3.51

Максимальные значения  $e_p$  и  $V$ , мкм

Рабочая длина $l_p$ , мм	Класс точности							
	П1		П2		П3		П4	
	$e_p$	$V_{пр}$	$e_p$	$V_{пр}$	$e_p$	$V_{пр}$	$e_p$	$V_{пр}$
До 315	6		12		23		52	
Св. 315 до 400	7	6	13	12	25		56	55
Св. 400 до 500	8	7	15	13	27	26	62	58
Св. 500 до 630	9	7	16	14	30	29	70	62
Св. 630 до 800	10	8	18	16	35	31	79	68
Св. 800 до 1000	11	9	21	17	40	35	91	74

Максимальное значение мертвого хода передачи

$$J_{tmax} = 2 \cdot 10^3 (0,01d_{III} - \Delta d_{III}) \sin \beta + \Delta_{BM} + \Delta_B + \Delta_{ОП}, \quad (3.251)$$

где  $\Delta d_{III}$  — отрицательное предельное отклонение диаметра шарика (табл. 3.52);  $\beta = 45^\circ$  — угол контакта шариков с винтом и гайкой;  $\Delta_{BM}$  — упругая деформация сопряжения винт-гайка;  $\Delta_B$ ,  $\Delta_{ОП}$  — см. п. 3.3.5.

Таблица 3.52

Значения  $\Delta d_{III}$ , мм

$d_{III}$ , мм	Класс точности		
	Высокий (В)	Нормальный (Н)	Повышенный (П)
До 3	-0,0025	-0,005	-0,01
Св. 3 до 6	-0,005	-0,01	-0,025

Упругая деформация сопряжения винт-шарики-гайка равна

$$\Delta_{BM} = 0,38F_a^{0,67}d_{III}^{0,56}/(d_o^{0,89}k_B^{0,67}k_R), \text{ мкм}, \quad (3.252)$$

где  $d_o$  — средний диаметр винта, мм;  $k_B$  — число рабочих витков;  $k_R$  — коэффициент, зависящий от класса точности передачи (для классов точности П1, П3, П5, П7  $k_R$  соответственно равен 1,2; 1,1; 1; 0,95).

Средний диаметр винта определяют по внутреннему диаметру  $d_B$  и диаметру шариков

$$d_o = d_B + d_{III} + 0,5\Delta, \text{ мм}, \quad (3.253)$$

где  $\Delta$  — зазор в сопряжении (при отсутствии данных принимать  $\Delta = 0,04$  мм).

Значения  $\Delta_B$ ,  $\Delta_{OP}$  определяют по формулам (3.246), (3.247), причем в (3.246) вместо  $d_1$  подставляют  $d_B$ , а в (3.247) —  $d_{III} \approx d_o$ .

Во многих случаях  $\Delta_{BM}$  и  $\Delta_{OP}$  пренебрежимо малы по сравнению с  $\Delta_B$ , и формула (3.251) существенно упрощается:

$$J_{tmax} = 1410(0,01d_{III} - \Delta d_{III}) + 0,0061F_a l / d_B^2, \text{ мкм}. \quad (3.254)$$

Мертвый ход по вероятностному методу расчета определяют по формуле (3.249).

### 3.3.8. Определение кинематической погрешности и мертвого хода многоступенчатого преобразователя движения

Пусть преобразователь движения состоит из  $N$  ступеней, максимальные погрешности которых  $F'_{i_{omax1}}$ ,  $F'_{i_{omax2}}$ , ...,  $F'_{i_{omaxN}}$ , а передаточные отношения —  $u_1, u_2, \dots, u_N$ .

Максимальная кинематическая погрешность многоступенчатой передачи равна

$$F'_{i_{\max}} = F'_{i_{\max N}} + F'_{i_{\max N-1}}/u_N + \dots + F'_{i_{\max 1}}/(u_N u_{N-1} \dots u_2). \quad (3.255)$$

Аналогично — мертвый ход равен

$$J_{t_{\max}} = J_{t_{\max N}} + J_{t_{\max N-1}}/u_N + \dots + J_{t_{\max 1}}/(u_N u_{N-1} \dots u_2). \quad (3.256)$$

По вероятностному методу кинематическая погрешность и мертвый ход определяются проще в тех случаях, когда все ступени преобразователя представляют собой однотипные передачи (например, двухступенчатый зубчатый редуктор):

$$F'_{i_{op}} = K_p F'_{i_{\max}}; \quad (3.257)$$

$$J_{tp} = K_p J_{t_{\max}}. \quad (3.258)$$

Если степень риска для каждой ступени одна и та же и равна  $\gamma_1$ , то вероятность реализации полученных значений  $F'_{i_{op}}$  и  $J_{tp}$  равна

$$P_p = (1 - \gamma_1)^N. \quad (3.259)$$

В частности, для двухступенчатого редуктора при  $\gamma_1 = 4,5\%$

$$P_p = (1 - 0,045)^2 = 0,912.$$

В диапазоне  $\gamma_1 \leq 10\%$  для двух- и трехступенчатых передач можно приблизительно считать, что степень риска равна

$$\gamma = N\gamma_1. \quad (3.260)$$

Для случаев, когда ступени преобразователя движения являются передачами различных типов, определение  $F'_{i_{op}}$  и  $J_{tp}$  следует выполнять по методике, изложенной в [17].

При больших значениях передаточных чисел ступеней влияние каждого последующего слагаемого в формулах (3.255) и (3.256) резко уменьшается по сравнению с предыдущим. Практически это означает, что при вычислении ориентировочных значений  $F'_{i_{op}}$  и  $J_{tp}$  четырехступенчатой передачи погрешность первой (быстроходной) ступени можно не учитывать.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 1.1.7. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

### ВОПРОСЫ

3. Предварительный выбор преобразователя движения по специальным критериям с различными видами передач.
4. Выборка мертвого хода в зубчатых и винтовых преобразователях движения.

### 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.
8. Таугер В.М. Конструирование мехатронных модулей: учеб.пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 336 с. (Л4 с. 161-184).

### **1. Предварительный выбор преобразователя движения по специальным критериям с различными видами передач**

#### **Подход к решению задачи**

Сами по себе расчетные формулы, лежащие в основе приведенных в п. 3.2 методов определения кинематических погрешностей и мертвого хода, с точки зрения вычислений достаточно просты. Но использовать их в полной мере можно лишь тогда, когда основные размеры звеньев передачи уже известны. Другими словами, передачу сначала нужно рассчитать, и только после этого она может быть оценена по рассматриваемому критерию.

Расчет передачи занимает достаточно много времени. Произведя расчет и определив необходимые размеры и допуски на них, конструктор затем производит оценку точности отработки перемещений рабочего органа, убеждается, что выбранная передача не удовлетворяет требованиям технического задания по этому критерию, и приступает к

расчету передачи другого типа. Время на расчет и проверку первой передачи затрачено впустую.

Разумеется, совсем не обязательно, что конструктор при выборе передачи ошибется. Вполне возможно, что, опираясь на свои знания и опыт, он «угадает». Однако вероятность ошибки все-таки велика, особенно для молодого специалиста.

Излагаемый ниже метод предварительного выбора преобразователя движения ММ состоит в следующем:

- а) по общим критериям принять тип передачи;
- б) по предельно упрощенным и обобщенным формулам определить минимальное необходимое число главных параметров;
- в) по предельно упрощенным и обобщенным формулам, включающим в себя только найденные в пункте «б» главные параметры, определить кинематическую погрешность, а при реверсивной нагрузке — и мертвый ход передачи;
- г) сравнить полученный результат с техническим заданием и сделать вывод о пригодности передачи принятого типа.

Необходимо подчеркнуть, что метод дает возможность предварительно выбрать передачу. Далее следует произвести ее проверочный расчет и, опираясь на его результаты, уточнить значения кинематической погрешности и мертвого хода по полным формулам. Вероятность отбраковки передачи, прошедшей предварительный отбор, снижается до минимума.

Ниже дано руководство по применению метода для оценки конкретных передач.

### **Цилиндрическая зубчатая передача**

Основным геометрическим параметром, определяющим размеры передачи в целом, является межосевое расстояние.

Межосевое расстояние косозубой передачи может быть оценено по формулам

$$a_w \approx 9,56(u \pm 1)(T_T/u^2)^{1/3}, \text{ мм}; \quad (3.261)$$

$$a_w \approx 7,57(u \pm 1)(T_T/u^2)^{1/3}, \text{ мм}, \quad (3.262)$$

где  $T_T$  — крутящий момент на тихоходном валу, Нм; знак «+» — для передачи внешнего зацепления; знак «-» — для передачи внутреннего зацепления.

Формула (3.261) справедлива для нормализованных и улучшенных сталей, формула (3.262) — для упроченных объемной или поверхностной закалкой.

При проектировании двухступенчатого трехосного редуктора определяют межосевое расстояние тихоходной ступени:

$$a_{wT} \approx 9,56(u_T \pm 1)(T_T/u_T^2)^{1/3}, \text{ мм}; \quad (3.263)$$

$$a_{wT} \approx 7,57(u_T \pm 1)(T_T/u_T^2)^{1/3}, \text{ мм}, \quad (3.264)$$

а затем межосевое расстояние быстроходной ступени  $a_{wB} = 0,714a_{wT}$ .

В тех случаях, когда это не противоречит техническому заданию, следует принимать межосевые расстояния, ближайšie к расчетным, из стандартного ряда: ...80; 90; 100; 112; 120; 140; 160; 180; 200; 224; 250; 280; 315; 355; 400...

В соосном редукторе межосевые расстояния ступеней равны между собой, и их определяют по (3.263) или (3.264).

Далее рассматриваются передачи внешнего зацепления как наиболее часто применяемые.

Делительные диаметры шестерни  $d_1$  и колеса  $d_2$  ориентировочно могут быть найдены по формулам

$$d_1 = 2a_w/(u + 1); \quad (3.265)$$

$$d_2 = ud_1, \quad (3.266)$$

для быстроходной ступени двухступенчатого редуктора

$$d_{1Б} = 2a_{wБ}/(u_B + 1); \quad (3.267)$$

$$d_{2Б} = u_B d_{1Б}, \quad (3.268)$$

для тихоходной ступени двухступенчатого редуктора

$$d_{1Т} = 2a_{wТ}/(u_T + 1); \quad (3.269)$$

$$d_{2Т} = u_T d_{1Т}. \quad (3.270)$$

Подробное рассмотрение параметров, входящих в формулу (3.181), дает возможность выполнить следующие преобразования.

Значения допусков на накопленную погрешность шага  $F_p$  хорошо аппроксимируются формулами:

для 6-й степени точности

$$F_p = 7,52d^{1/3}, \text{ мкм}; \quad (3.271)$$

для 7-й степени точности

$$F_p = 10,9d^{1/3}, \text{ мкм}; \quad (3.272)$$

для 8-й степени точности

$$F_p = 15d^{1/3}, \text{ мкм}. \quad (3.273)$$

В формулах (3.271) — (3.273)  $d$  — в миллиметрах.

Анализ данных табл. 3.25 показывает, что допуски на погрешность профиля зуба в диапазоне модулей  $1 \leq m_n \leq 6$  мм и делительных диаметрах до 560 мм можно принимать: для 6-й степени точности  $f_f \approx 10$  мкм; для 7-й степени точности —  $f_f \approx 14$  мкм; для 8-й степени точности —  $f_f \approx 19$  мкм.

Монтажное радиальное биение шестерни и колеса в тех же пределах  $m_n$  и  $d$ , что и для  $f_\beta$  можно принимать: для 6-й степени точности  $F_r \approx 33$  мкм; для 7-й степени точности —  $F_r \approx 47$  мкм; для 8-й степени точности —  $F_r \approx 58$  мкм.

С учетом конкретных значений величин получаются значения: для 6-й степени точности  $E_{\Sigma M} \approx 16$  мкм; для 7-й степени точности —  $E_{\Sigma M} \approx 20$  мкм; для 8-й степени точности —  $E_{\Sigma M} \approx 23$  мкм.

Подстановка конкретных числовых величин в (3.181) и несложные алгебраические преобразования дают формулы для оценки передач по рассматриваемому критерию:

для 6-й степени точности

$$F'_{i\text{оmax}} \approx 7,52K[(d_1^{2/3} + 4,52)^{0,5} + (d_2^{2/3} + 4,52)^{0,5}]; \quad (3.274)$$

для 7-й степени точности

$$F'_{i\text{оmax}} \approx 10,9K[(d_1^{2/3} + 3,36)^{0,5} + (d_2^{2/3} + 3,36)^{0,5}]; \quad (3.275)$$

для 8-й степени точности

$$F'_{i\text{оmax}} \approx 15K[(d_1^{2/3} + 2,23)^{0,5} + (d_2^{2/3} + 2,23)^{0,5}]. \quad (3.276)$$

В (3.274) — (3.276)  $d_1, d_2$  — в миллиметрах,  $F'_{i\text{оmax}}$  — в микрометрах.

Далее по формулам (3.186), (3.187), (3.188) следует вычислить максимальную кинематическую погрешность передачи по вероятностному методу расчета.

Анализ составляющих формулы (3.189) для определения максимального значения мертвого хода показал следующее.

Зависимость  $E_{HS}$ , мкм, от делительного диаметра аппроксимируется формулами:

для 6-й степени точности

$$E_{HS} = 66,2 + 0,196d; \quad (3.277)$$

для 7-й степени точности

$$E_{HS} = 60 + 0,25d; \quad (3.278)$$

для 8-й степени точности

$$E_{HS} = 68 + 0,28d. \quad (3.279)$$

В (3.277) — (3.279) значения диаметра — в миллиметрах.  
 Зависимость  $f_a$  от  $a_w$  аппроксимируется формулой

$$f_a = 26,2 + 0,11a_w. \quad (3.280)$$

На этапе предварительного выбора передачи следует хотя бы ориентировочно оценить величины суммарных зазоров в опорах вращения. Для этого приблизительно определяют диаметры валов под подшипники по формулам

$$d_{П1} \approx 11T_B^{1/3}(0,2[\tau])^{-1/3} = 6,93(T_T/u)^{1/3}; \quad (3.281)$$

$$d_{П2} \approx 11T_T^{1/3}(0,2[\tau])^{-1/3} = 6,93T_T^{1/3}, \quad (3.282)$$

где  $d_{П1}$ ,  $d_{П2}$  — внутренние диаметры подшипников соответственно быстроходного и тихоходного валов;  $T_B$  — крутящий момент на быстроходном валу, Нм;  $[\tau] = 20$  МПа — допускаемое касательное напряжение, используемое при проектировании редукторных валов.

При точном конструировании полученные значения диаметров следует округлить до ближайших величин, соответствующих стандартам на подшипники, однако для оценки зазоров это делать необязательно.

Далее находят приближенные значения радиальных зазоров, используя аппроксимирующие формулы:

$$G'_{r1} \approx 31 + 0,8d_{П1}, \text{ мкм}; \quad (3.283)$$

$$G'_{r2} \approx 31 + 0,8d_{П2}, \text{ мкм}. \quad (3.284)$$

После подстановки (3.277) — (3.280), (3.283), (3.284), а также средних значений  $T_H$  в (3.189) и алгебраических преобразований полу-

чены выражения для оценки максимальной величины мертвого хода зубчатой передачи:

для 6-й степени точности

$$J_{t\max} = 92,7 + 0,274a_w + [11025 + 2(26,2 + 0,11a_w)^2 + (31 + 0,8d_{\Pi 1})^2 + (31 + 0,8d_{\Pi 2})^2]^{0,5}; \quad (3.285)$$

для 7-й степени точности

$$J_{t\max} = 84 + 0,35a_w + [16900 + 2(26,2 + 0,11a_w)^2 + (31 + 0,8d_{\Pi 1})^2 + (31 + 0,8d_{\Pi 2})^2]^{0,5}; \quad (3.286)$$

для 8-й степени точности

$$J_{t\max} = 95,2 + 0,39a_w + [25600 + 2(26,2 + 0,11a_w)^2 + (31 + 0,8d_{\Pi 1})^2 + (31 + 0,8d_{\Pi 2})^2]^{0,5}. \quad (3.287)$$

В (3.285) — (3.287) значения  $a_w$ ,  $d_{n1}$ ,  $d_{n2}$  — в миллиметрах,  $J_{t\max}$  — в микрометрах.

Мертвый ход по вероятностному методу определяют по формулам (3.192), (3.193).

### Коническая зубчатая передача

Внешний делительный диаметр шестерни приближенно определяют по формуле

$$d_{e1} = K_d(T_2 K_{H\beta} / u^2)^{1/3}, \text{ мм}, \quad (3.288)$$

где  $K_d$  — коэффициент, зависящий от вида зубьев и термообработки (прямые нормализованные или улучшенные зубья —  $K_d = 27$ ; круговые нормализованные или улучшенные —  $K_d = 22,5$ ; прямые закаленные —  $K_d = 19,7$ ; круговые закаленные —  $K_d = 16,5$ );  $T_2$  — крутящий момент на колесе, Нм;  $K_{H\beta}$  — коэффициент неравномерности распределения нагрузки по длине зуба (для прямых, а также для круговых закаленных зубьев — см. рис. 3.13; для круговых нормализованных или улучшенных зубьев —  $K_{H\beta} = 1$ ).

Затем следует определить внешнее конусное расстояние

$$R_e = 0,5d_{e1}(u^2 + 1)^{0,5}, \quad (3.289)$$

убедиться, что  $R_e$  попадает в рассматриваемый интервал (см. п. 3.2.1), и, следовательно, приведенные ниже формулы кинематической погрешности и мертвого хода применимы.

При выборе вида зубьев следует учитывать, что применение круговых зубьев нежелательно в передаче с реверсивной внешней нагрузкой.

С учетом изложенного максимальная кинематическая погрешность прямозубой передачи может быть оценена по формулам: для 6-й степени точности

$$F'_{i\text{оmax}} = 3,15K[d_{m1}^{0,5}(1 + u^{0,5}) + 17,5], \text{ мкм}; \quad (3.290)$$

для 7-ой степени точности

$$F'_{i\text{оmax}} = 4,45K[d_{m1}^{0,5}(1 + u^{0,5}) + 17], \text{ мкм}; \quad (3.291)$$

для 8-ой степени точности

$$F'_{i\text{оmax}} = 6,23K[d_{m1}^{0,5}(1 + u^{0,5}) + 14,5], \text{ мкм}. \quad (3.292)$$

$K_{H\beta}$  \_\_\_\_\_

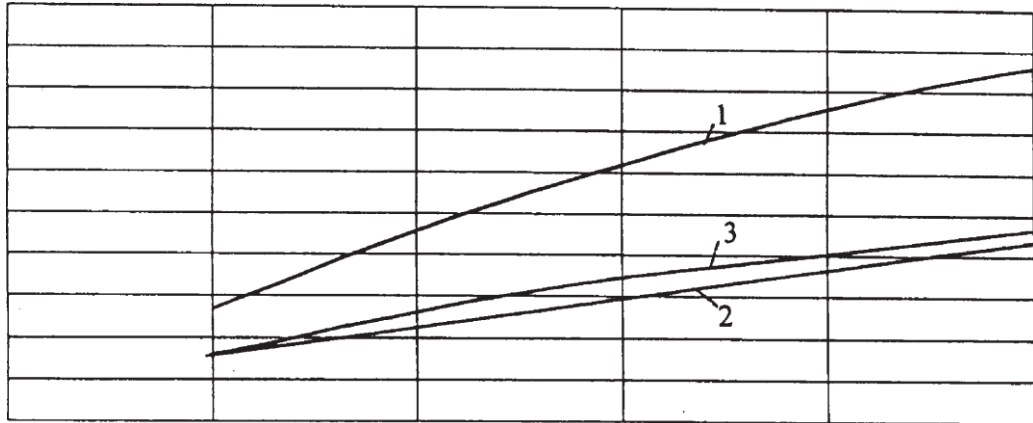


Рис. 3.13. Значения коэффициента  $K_{ц}$  (валы на роликовых подшипниках):  
 1 — прямые зубья, закалка; 2 — прямые зубья, нормализация или улучшение; 3 — круговые зубья, закалка

Аналогично для передачи с круговым зубом:  
 для 6-й степени точности

$$\begin{aligned}
 F'_{i0\max} = & 3,15K[(d_{m1} + 23,5d_{m1}^{0,5} + 40)^{0,5} + \\
 & + (d_{m1}u + 23,5d_{m1}^{0,5}u^{0,5} + 40)^{0,5}], \text{ мкм}; \quad (3.293)
 \end{aligned}$$

для 7-й степени точности

$$F'_{i\text{оmax}} = 4,45K[d_{m1}^{0,5}(1 + u^{0,5}) + 9,4], \text{ мкм}; \quad (3.294)$$

для 8-й степени точности

$$F'_{i\text{оmax}} = 6,23K[d_{m1}^{0,5}(1 + u^{0,5}) + 8,4], \text{ мкм}. \quad (3.295)$$

В (3.293) — (3.294)  $d_{m1}$  — в миллиметрах.

Далее определяют максимальную кинематическую погрешность по вероятностному методу в микрометрах и (или) в радианах по формулам (3.186), (3.187), (3.188).

Даже с учетом того, что регулировка подшипников позволяет устранить зазоры в опорах шестерни и колеса, формула (3.202) для определения мертвого хода конической передачи остается достаточно громоздкой. Кроме того, зависимости входящих в нее величин от различных параметров не поддаются удобной для оценочных расчетов аппроксимации. Поэтому были выполнены расчеты по граничным значениям параметров. Их результаты сведены в табл. 3.53 и рекомендуются конструкторам для принятия решения о возможности использования конической зубчатой передачи в проектируемом ММ.

Мертвый ход по вероятностному методу расчета определяют по формулам (3.192), (3.193); значения  $K_p$  — по табл. 3.26.

Оценки  $J_{\text{тmax}}$ , мкм, конической зубчатой передачи

Таблица 3.53

**Оценки  $J_{\text{тmax}}$ , мкм, конической зубчатой передачи**

Сопряжение	Степень точности					
	6		7		8	
	$50 \leq R_e \leq 63$	$63 \leq R_e \leq 100$	$50 \leq R_e \leq 63$	$63 \leq R_e \leq 100$	$50 \leq R_e \leq 63$	$63 \leq R_e \leq 100$
C	170	210	210	250	230	280
B	220	260	270	330	310	370
Значения $R_e$ — в миллиметрах						

### Реечная передача

Ориентировочное значение максимальной кинематической погрешности реечной передачи с отношением рабочей длины рейки к

диаметру шестерни  $l/d < 3,5$  может быть определено по формулам:  
 для 6-й степени точности

$$F'_{i_{\max}} = [5,04 + 0,9 (l/d - 1)] [(d^{2/3} + 3,47)^{0,5} + 1,05l^{1/3} + 1,86], \text{ мкм}; \quad (3.296)$$

для 7-й степени точности

$$F'_{i_{\max}} = [7,37 + 1,3(l/d - 1)] [(d^{2/3} + 3,04)^{0,5} + l^{1/3} + 1,74], \text{ мкм}. \quad (3.297)$$

При  $l/d > 3,5$  формулы принимают следующий вид:  
 для 6-й степени точности

$$F'_{i_{\max}} = 7,52[(d^{2/3} + 3,47)^{0,5} + 1,05l^{1/3} + 1,86], \text{ мкм}; \quad (3.298)$$

для 7-й степени точности

$$F'_{i_{\max}} = 11[(d^{2/3} + 3,04)^{0,5} + l^{1/3} + 1,74], \text{ мкм}. \quad (3.299)$$

В (3.296) — (3.299)  $l$  и  $d$  — в миллиметрах.

Вычисление  $J_{t_{\max}}$  по формуле (3.206) не представляет сложности даже без введения аппроксимирующих выражений входящих в нее величин.

Кинематическая погрешность и мертвый ход по вероятностному методу определяются по формулам (3.205) и (3.207).

### Червячная передача

Межосевое расстояние передачи с архимедовым червяком может быть приближенно найдено по формуле

$$a_w = 18T_2^{1/3}, \text{ мм}, \quad (3.300)$$

с последующим округлением до ближайшего из ряда: 50; 56; 63; 71; 80; 90; 100; 112; 125; 140; 160; 180...

По передаточному числу определяют число витков червяка: для  $i = 8...14$   $z_1 = 4$ ; для  $i = 16...28$   $z_1 = 2$ ; для  $i > 31,5$   $z_1 = 1$ .

Затем вычисляют (с округлением до целого) число зубьев колеса

$$z_2 = z_1 u.$$

По рекомендации

$$m \approx 1,6 a_w / z_2, \text{ мм}, \quad (3.302)$$

ориентировочно находят модуль, после чего принимают ближайший из ряда: 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16.

Определяют делительный диаметр колеса

$$d_2 = m z_2 \quad (3.303)$$

и начальный диаметр червяка

$$d_{w1} = 2 a_w - d_2. \quad (3.304)$$

Необходимо подчеркнуть ориентировочный характер этих расчетов. Точность их достаточна для оценки кинематической погрешности и мертвого хода. В процессе проектного расчета передачи все параметры подлежат уточнению.

Обработка приведенных выше формул дает показанные на рис. 3.14 графики зависимостей  $F'_{iop}$  от  $d_2$  для различных степеней точности, позволяющие оценить погрешность передачи без громоздкого расчета.

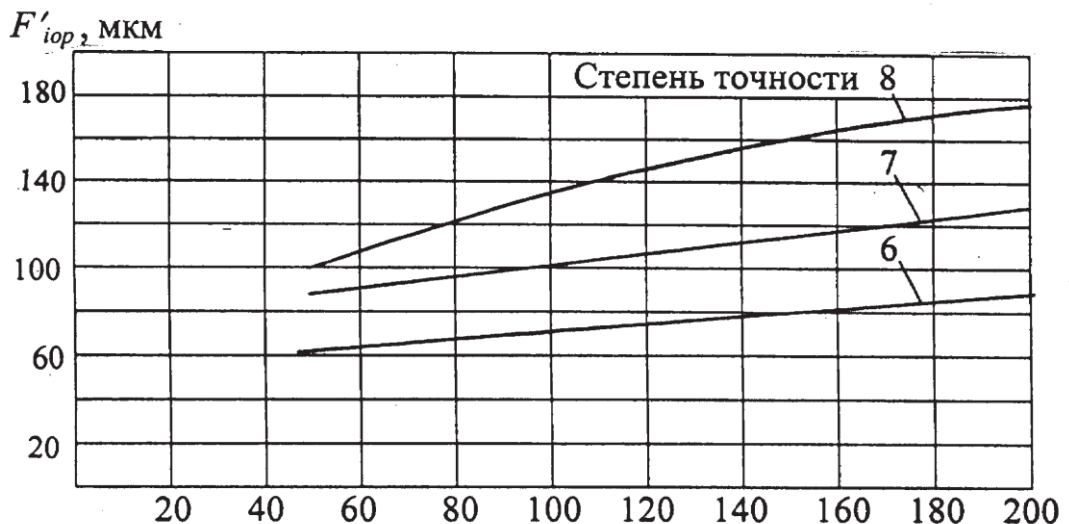


Рис. 3.14. Максимальная кинематическая погрешность червячной передачи по вероятностному методу

Исследование формулы (3.232) приводит к следующим выражениям для предварительного определения максимальных значений

мертвого хода передач, работающих в тяжелом режиме нагружения:  
 при  $a_w < 80$  мм

$$J_{t\max} = 0,94E_{SS3} + (0,9T_{S3}^2 + 1,56f_a^2 + 72300)^{0,5}, \text{ мкм}; \quad (3.305)$$

при  $80 \text{ мм} < a_w \leq 125 \text{ мм}$

$$J_{t\max} = 0,94E_{SS3} + (0,9T_{S3}^2 + 1,56f_a^2 + 111000)^{0,5}, \text{ мкм}; \quad (3.306)$$

при  $125 \text{ мм} < a_w \leq 180 \text{ мм}$

$$J_{t\max} = 0,94E_{SS3} + (0,9T_{S3}^2 + 1,56f_a^2 + 181000)^{0,5}, \text{ мкм}. \quad (3.307)$$

Максимальный мертвый ход передач с червяком, установленным, как на рис. 3.12, а также передач, работающих в легком режиме нагружения (с подшипниками, отрегулированными на нулевые зазоры):

при  $a_w \leq 80$  мм

$$J_{t\max} = 0,94E_{SS3} + (0,9T_{S3}^2 + 1,56f_a^2 + 3150)^{0,5}, \text{ мкм}; \quad (3.308)$$

при  $80 \text{ мм} < a_w \leq 125 \text{ мм}$

$$J_{t\max} = 0,94E_{SS3} + (0,9T_{S3}^2 + 1,56f_a^2 + 5210)^{0,5}, \text{ мкм}; \quad (3.309)$$

при  $125 \text{ мм} < a_w \leq 180 \text{ мм}$

$$J_{t\max} = 0,94E_{SS3} + (0,9T_{S3}^2 + 1,56f_a^2 + 6730)^{0,5}, \text{ мкм}. \quad (3.310)$$

Подстановка в (3.305) — (3.310) конкретных значений  $E_{SS3}$ ,  $T_{S3}$  и  $f_a$  трудностей не представляет, поэтому в дальнейших упрощениях формулы не нуждаются.

Определение кинематической погрешности и мертвого хода по вероятностной методике — см. (3.231), (3.239).

### Волновая зубчатая передача

Характерным размером волновой передачи является внутренний диаметр гибкого колеса. Приблизительно его можно определить по формуле

$$d_{\text{вн}} = 17T_2^{1/3}, \text{ мм}, \quad (3.311)$$

где  $T_2$  — крутящий момент на выходном звене, Нм.

Найденный  $d_{\text{вн}}$  позволяет оценить габаритные размеры редуктора:

длина

$$l = (2 \dots 2,5)d_{\text{вн}}; \quad (3.312)$$

высота и ширина

$$h = b = (1,5 \dots 2)d_{\text{вн}}. \quad (3.313)$$

Соотношения (3.312), (3.313) получены на основе анализа традиционных конструкций волновых редукторов. Возможно создание механизмов уменьшенных размеров. Особенно это касается длины. Известны специальные редукторы, длина которых приближается к минимальной ширине гибкого колеса, равной  $b_{\text{min}} \sim 0,5d_{\text{га}}$ .

Зависимости, приведенные в п. 3.3.5 для определения кинематической погрешности и мертвого хода волновой передачи, в упрощении не нуждаются.

### Передача винт-гайка скольжения

Как силовой, так и кинематический расчеты передачи ВГС трудности не представляют.

На стадии выбора преобразователя движения ММ конструктору могут помочь показанные на рис. 3.15 графики зависимости допускаемой осевой силы от внутреннего диаметра резьбы и длины винта,

отвечающие как условию износостойкости, так и условию прочности. При построении графиков учтена рекомендация [13], в соответствии с которой для обеспечения гарантированной устойчивости должно

соблюдаться условие  $[F_a] \leq 0,25[F_a]_{уст}$ , где  $[F_a]_{уст}$  — предельная осевая нагрузка по критерию устойчивости.

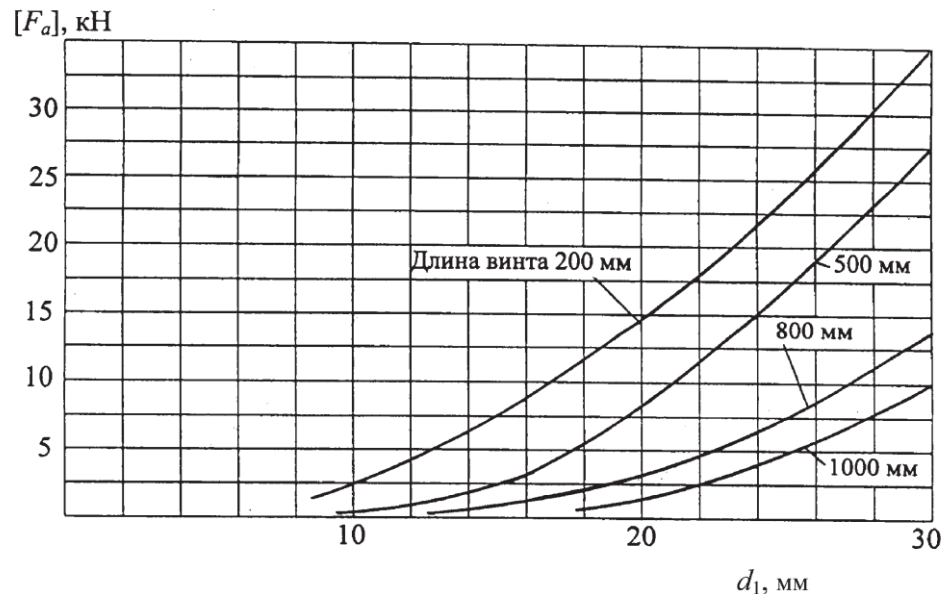


Рис. 3.15. Допускаемая осевая сила для передачи винт-гайка скольжения (материал винта — сталь с  $\sigma_t > 380$  МПа)

### Шарико-винтовая передача

Аналогично расчету ВГС силовой и кинематический расчеты ШВП в упрощении не нуждаются. При ориентировочном выборе геометрических параметров ШВП конструктор может руководствоваться графиками по рис. 3.15, принимая вместо  $d_1$  величину внутреннего диаметра винта  $d_B$ .

### Люфтовыбирающие механизмы

#### Выборка мертвого хода в зубчатых преобразователях движения

В тех случаях, когда мертвый ход преобразователя движения больше допускаемой техническими требованиями величины, в конструкцию передачи вводят специальное устройство, называемое **люфтовыбирающим механизмом**.

В ММ используют механизмы выборки бокового зазора между зубьями колес зубчатых передач двух типов: автономные и с дополнительной кинематической цепью (замкнутым энергетическим потоком) [1].

В **автономных механизмах выборки мертвого хода** используют метод раздвоения ведомого колеса, который в качестве силовых элементов предполагает использование пружин.

На рис. 3.16 приведена конструктивная схема такого механизма. Основная половина *1* раздвоенного зубчатого колеса закреплена на валу, а вторая половина *2* образует со втулкой основной половины подвижное соединение, и ее фиксируют от осевого смещения шайбой *3*. Под влиянием пружины *4*, закрепленной одним концом на половине *1* колеса, а другим — на половине *2*, половины колес поворачиваются относительно друг друга в разные стороны и выбирают боковой зазор между зубьями ведущего и ведомого колес. Пружину *4* устанавливают во время сборки механизма с предварительным натяжением, достаточным для выборки мертвого хода в данной зубчатой паре и передаче крутящего момента при реверсе.

Нарезание зубьев на половинках *1* и *2* раздвоенного колеса производят одновременно, зафиксировав их между собой шайбой *3* и двумя цилиндрическими штифтами *5*, которые после нарезания зубьев удаляют.

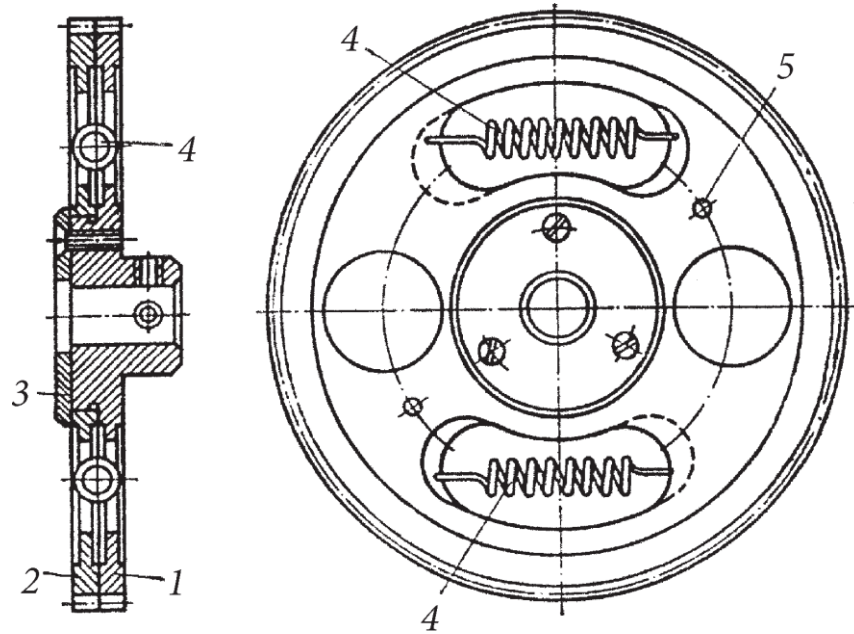


Рис. 3.16. Автономный механизм для выборки люфта в зубчатой передаче  
Сила  $F_{\text{пр}}$  пружины 4 (рис. 3.17) может быть найдена из условия

$$Fr = \frac{F_{\text{пр}} r_{\text{пр}} n}{\beta}, \quad (3.314)$$

где  $F = T/r$  — окружная сила, действующая на зубья одной из половинок колеса;  $T$  — момент сопротивления на раздвоенном колесе;  $r$  — радиус делительной окружности раздвоенного зубчатого колеса;  $r_{\text{пр}}$  — радиус окружности, на которой установлены пружины;  $\beta = 1,25 \dots 1,5$  — коэффициент запаса силы пружины;  $n$  — число пружин.

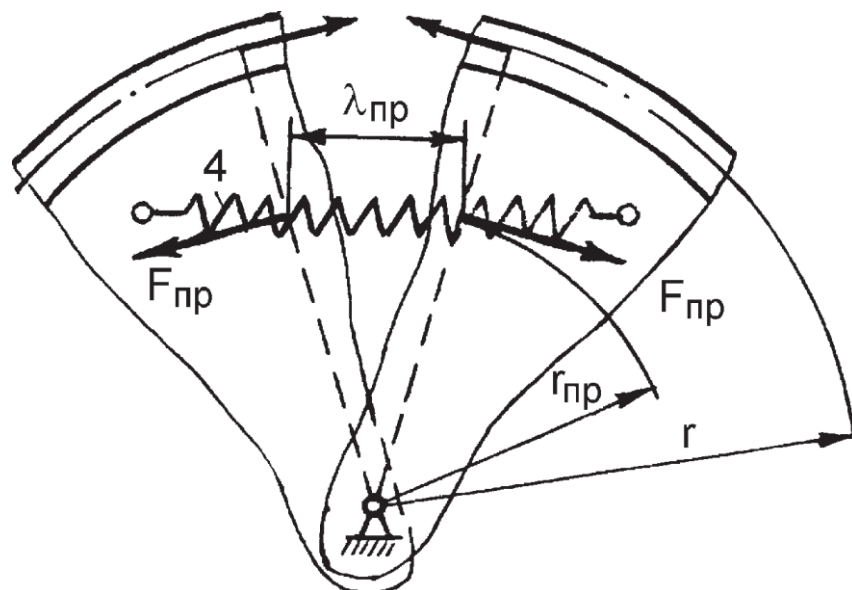


Рис. 3.17. Схема сил, действующих на пружину

Из (3.314)

$$F_{\text{пр}} = \frac{\beta Fr}{r_{\text{пр}} n} = \frac{\beta T}{r_{\text{пр}} n}. \quad (3.315)$$

Но сила пружины пропорциональна ее деформации  $\lambda_{\text{пр}}$

$$F_{\text{пр}} = C_{\text{пр}} \lambda_{\text{пр}}, \quad (3.316)$$

где  $C_{\text{пр}}$  — жесткость.

Из (3.315) и (3.316)

$$C_{\text{пр}} = \frac{\beta T}{r_{\text{пр}} \lambda_{\text{пр}} n}. \quad (3.317)$$

Из соотношения

$$\frac{\lambda_{\text{пр}}}{r_{\text{пр}}} = \frac{\pi m z'}{r} \quad (3.318)$$

находят величину деформации пружины

$$\lambda_{\text{пр}} = \frac{\pi m z' r_{\text{пр}}}{r}, \quad (3.319)$$

где  $m$  — модуль зубьев;  $z'$  — число зубьев, на которое поворачиваются половины колеса друг относительно друга.

Следовательно, жесткость пружины будет равна

$$C_{\text{пр}} = \frac{\beta Tr}{\pi m z' r_{\text{пр}}^2 n} \quad (3.320)$$

Кроме выборки мертвого хода при помощи пружин, используют жесткую фиксацию, заключающуюся в предварительном относительном смещении половин раздвоенного зубчатого колеса и их жестком закреплении при помощи винтов, болтов, клеммовых соединений и т. д. На рис. 3.18 показана червячная передача с раздвоенным червячным колесом. Зубья половин 1 и 2 колеса прижимают поворотом эксцентрика 4 к разным сторонам зубьев червяка, после чего жестко фиксируют затяжкой болта 3. Фиксация осуществляется за счет сил трения.

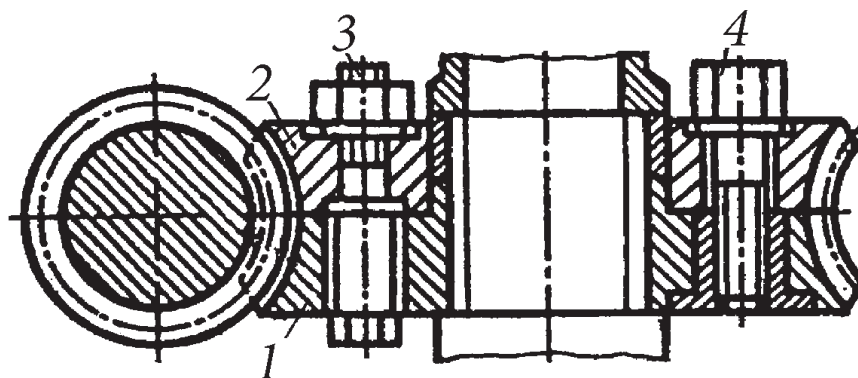


Рис. 3.18. Люфтовывирающее устройство в червячной передаче

Основными недостатками описанного люфтовывирающего устройства являются наличие большого числа дополнительных элементов (пружин, зубчатых колес, винтов и т. д.); увеличенные потери и ускоренный износ зубьев в зацеплении, обусловленные трением как на рабочей стороне зуба, так и на нерабочей; пониженная нагрузочная способность преобразователя движения, так как в передаче крутящего момента участвует половина венца колеса.

Указанные недостатки частично могут быть устранены в механизмах выборки мертвого хода с дополнительной кинематической цепью (**безлюфтовые механизмы с замкнутым энергетическим**

**потоком**). Они позволяют осуществить полный выбор люфтов во всех составляющих звеньях путем принудительного разворота в противоположные стороны двух соосно расположенных элементов одной из передач. Обычно для образования замкнутого контура к исходной кинематической цепи добавляют точно такую же параллельно расположенную кинематическую цепь, однако это необязательно. Иногда замыкающая кинематическая цепь может представлять собой цепь иного рода, чем исходная.

На рис. 3.19 приведена схема безлюфтового планетарного механизма. Исходная кинематическая цепь состоит из центрального колеса 1, сателлита 3, закрепленного на водиле Н, и неподвижного центрального колеса 5.

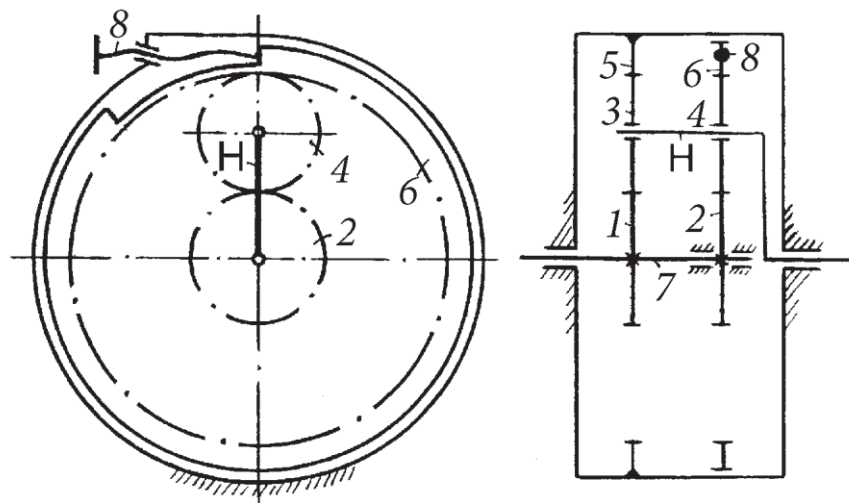


Рис. 3.19. Схема безлюфтового планетарного механизма

Для выборки люфтов устанавливают дополнительную кинематическую цепь, состоящую из центрального колеса 2, соединенного с центральным колесом 1 при помощи упругого элемента (торсиона, пружины) 7, сателлита 4, подвижного центрального колеса 6 с внутренним зацеплением и винта 8.

При завинчивании винта 8 подвижное центральное колесо 6 поворачивается и выбирает зазор в паре зубчатых колес 6—4. Затем начинается поворот сателлита 4, и выбирается зазор в паре 4—2. Далее через торсион 7 поворот передается центральному колесу 1, выбирается зазор в паре 1—3, и далее поворот сателлита 3 приводит к выборке зазора в паре 3—5. После выборки всех зазоров во всей кинематической цепи происходит дополнительная закрутка торсиона 7, что обеспечивает постоянный натяг в цепи и исключает появление люфта при износе элементов отдельных передач.

Диаметр торсиона, мм, определяют из условия прочности на кручение

$$d_T = \sqrt[3]{\frac{T}{0,2[\tau]}}, \quad (3.321)$$

где  $T$  — вращающий момент на торсионе, Нмм;  $[\tau]$  — допускаемое касательное напряжение материала торсиона при кручении, МПа, равное

$$[\tau] = \frac{\tau_T}{[n]_T}, \quad (3.322)$$

$\tau_T$  — предел текучести материала торсиона при кручении, МПа;  $[n]_T$  — допустимый (требуемый) коэффициент запаса прочности. Принимают  $[n]_T = 1,5 \dots 2,5$ .

В проектных расчетах при отсутствии значений предела текучести  $\tau_T$  материала торсиона можно принимать  $[\tau]_T = 450 \dots 500$  МПа.

Длину торсионного вала, мм, находят из условия

$$l = \varphi G J_p / T, \quad (3.323)$$

где  $\varphi$  — угол закручивания торсионного вала, рад (обычно принимают  $\varphi = 0,09 \dots 0,18$  рад ( $5^\circ \dots 10^\circ$ ));  $G$  — модуль упругости второго рода материала торсиона, МПа;  $J_p$  — полярный момент инерции поперечного сечения торсионного вала, мм<sup>4</sup>.

Торсионы изготавливают из хромованадиевых сталей марок 60 С2ХФА, 50 ГФА и углеродистых сталей марок 60, 65, 70, 85.

## 2. Выборка мертвого хода в винтовых преобразователях движения

Различают два способа выборки бокового зазора в винтовых механизмах — радиальное и осевое смещение гайки относительно винта. Радиальное смещение осуществляют сжатием гайки в радиальном направлении, а осевое — смещением гайки относительно винта в осевом направлении.

При одинаковом значении нормальной составляющей  $AS_n$  бокового зазора (рис. 3.20) радиальные составляющие бокового зазора равны:

— для метрической резьбы с углом профиля  $\alpha_M = 60^\circ$

$$\Delta S_p^M = \frac{\Delta S_n}{\sin \frac{\alpha_M}{2}} = \frac{\Delta S_n}{\sin 30^\circ} = 2\Delta S_n; \quad (3.324)$$

для трапецеидальной резьбы с углом профиля  $\alpha_T = 30^\circ$

$$\Delta S_p^T = \frac{\Delta S_n}{\sin \frac{\alpha_T}{2}} = \frac{\Delta S_n}{\sin 15^\circ} = 3,86 \Delta S_n. \quad (3.325)$$

Осевые составляющие бокового зазора:  
для метрической резьбы

$$\Delta S_{oc}^M = \frac{\Delta S_n}{\cos \frac{\alpha_M}{2}} = \frac{\Delta S_n}{\cos 30^\circ} = 1,15 \Delta S_n; \quad (3.326)$$

для трапецеидальной резьбы

$$\Delta S_{oc}^T = \frac{\Delta S_n}{\cos \frac{\alpha_T}{2}} = \frac{\Delta S_n}{\cos 15^\circ} = 1,04 \Delta S_n. \quad (3.327)$$

Следовательно, способ устранения мертвого хода радиальным смещением целесообразно применять для метрических резьб (рис. 3.20, *а*), т. е. для резьб с большим углом  $\alpha$  профиля, а осевым смещением — для трапецеидальных резьб (рис. 3.20, *б*) и упорных резьб, а также для нестандартных резьб с прямоугольным или квадратным профилем витка.

Устройства, обеспечивающие выборку радиальной составляющей бокового зазора, представляют собой разрезные гайки. Конструкция люфтовывбирающего механизма с разрезной гайкой показана на рис. 3.21.

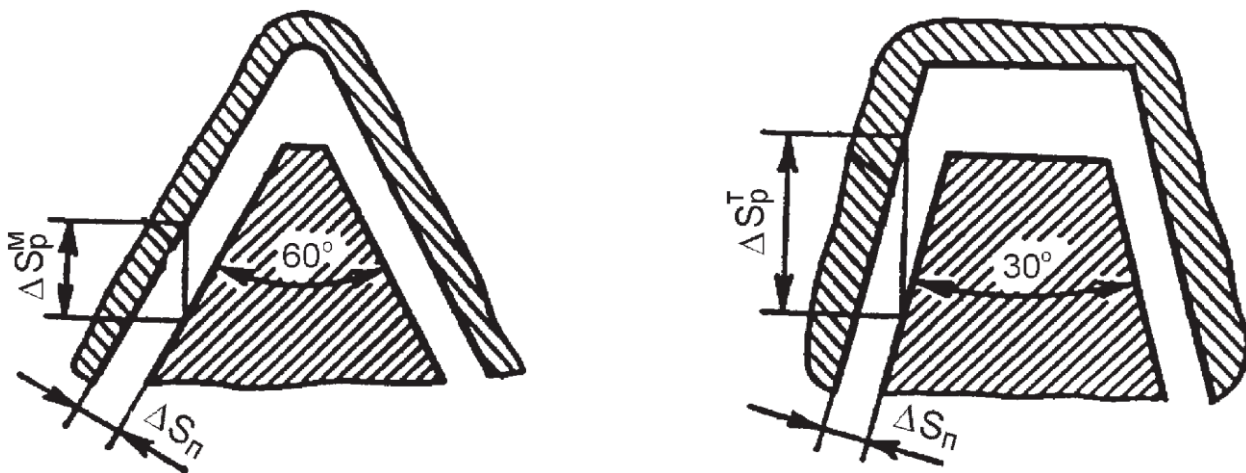


Рис. 3.20. Радиальные составляющие зазора в резьбах

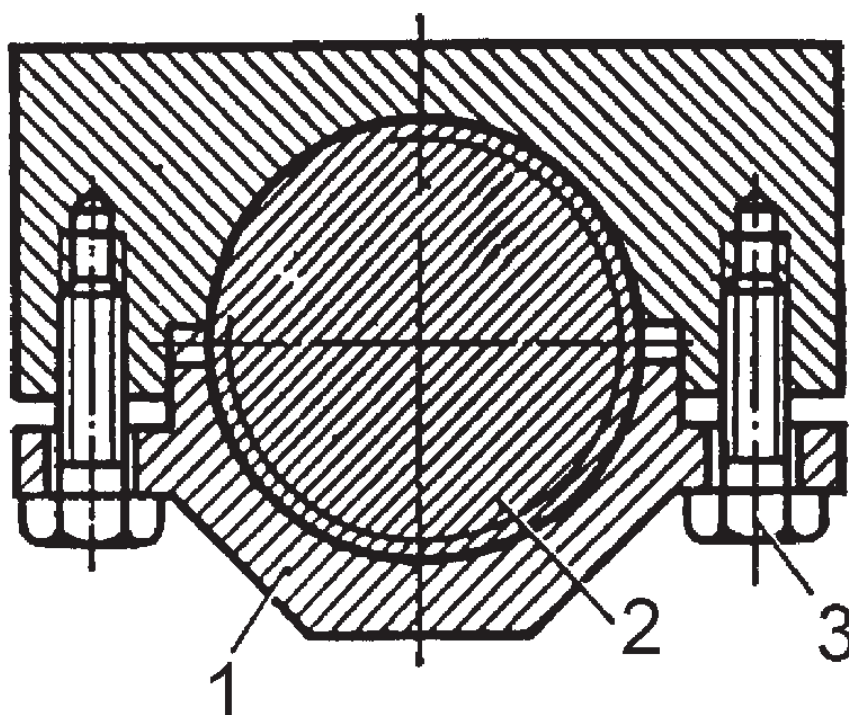


Рис. 3.21. Люфтовывирающий механизм с разрезной гайкой

Две части гайки *1* стягиваются винтами *3* и обжимают винт *2*.

Недостаток устройства — неравномерное обжатие винта и, как следствие, неравномерный износ резьбы гайки.

На рис. 3.22, *а, в, г, д* и на рис. 3.23, *а — г* приведены механизмы выборки радиальной составляющей бокового зазора, в которых необходимо периодически осуществлять подрегулирование. В устройстве на рис. 3.22, *б* подрегулирование происходит автоматически за счет пружин.

Устройства с разрезной гайкой и цанговым зажимом (рис. 3.22, г и рис. 3.23, б, в, г) обеспечивают более равномерное обжатие винта, что способствует равномерному его износу.

На рис. 3.24, а показана конструктивная схема люфтовыбирающего механизма на основе гайки с жесткой регулировкой осевого зазора, в котором выборку осевой составляющей бокового зазора осуществляют поворотом гайки 1. При этом обеспечивается одновременный контакт правых профилей резьбы винта 2 и левых профилей гайки 1, а также левых профилей резьбы винта 2 и правых профилей резьбы гайки 3 при сжатии витков винта (рис. 3.24, в).

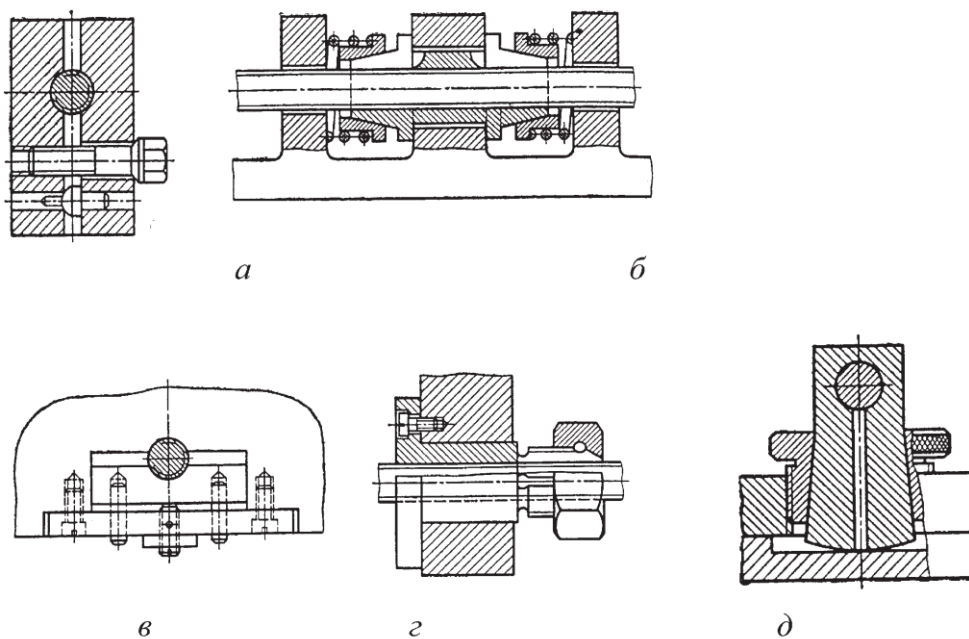


Рис. 3.22. Варианты конструкций люфтовыбирающих механизмов

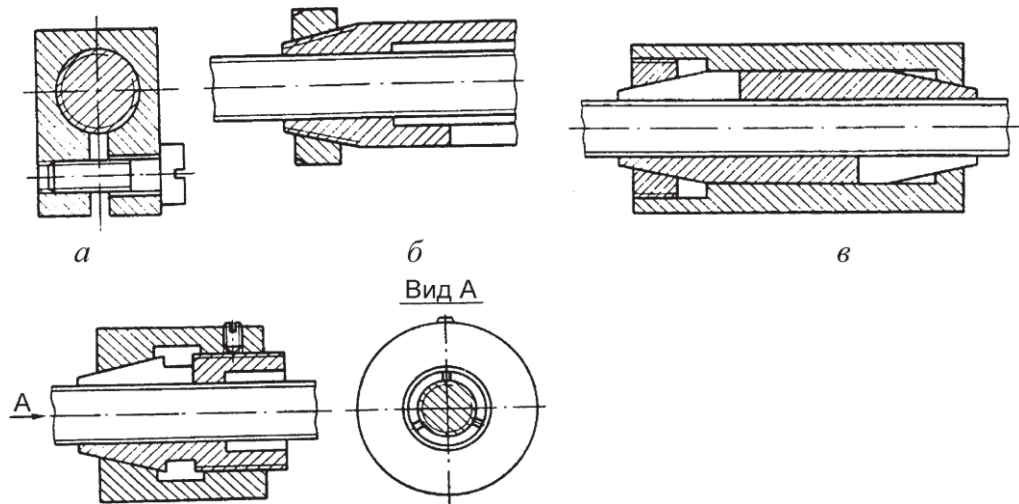


Рис. 3.23. Люфтовывбирающие механизмы с разрезными гайками

Люфтовывбирающий механизм на основе гайки с эластичной регулировкой осевого зазора показан на рис. 3.24, б. Выборку осевой составляющей бокового зазора осуществляет пружина 2, отжимая гайку 1 от гайки 4, обеспечивая двухпрофильный контакт резьбы винта 3 с резьбами гаек 1 и 4 (рис. 3.24, г).

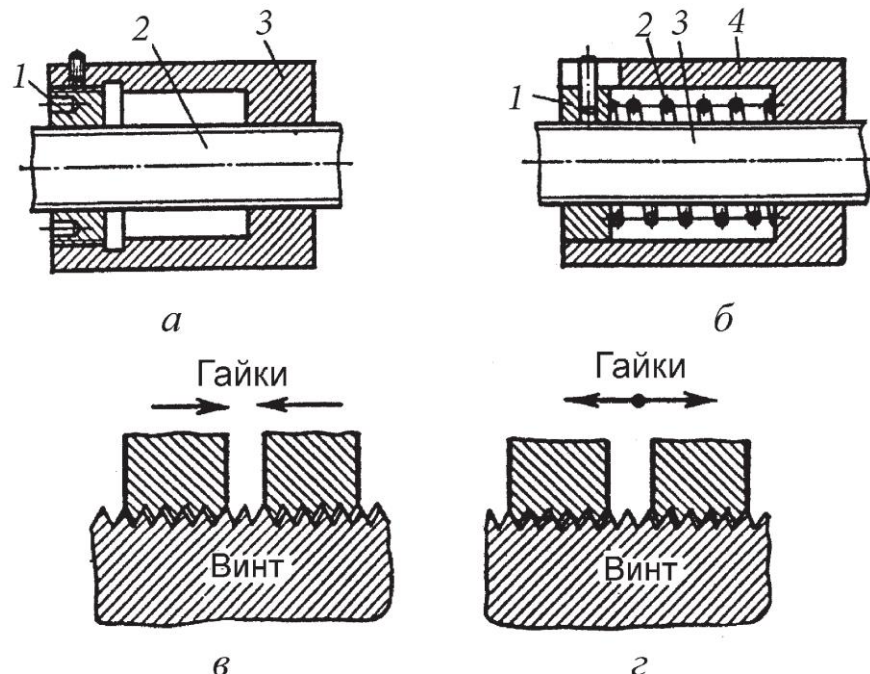


Рис. 3.24. Механизмы для выборки осевой составляющей бокового зазора

Механизмы выборки мертвого хода на основе гаек с жесткой и эластичной регулировкой осевой составляющей бокового зазора обес-

печивают высокую точность относительного перемещения винта и гайки при их движении как в прямом, так и в обратном направлениях.

Конструктивные схемы механизмов для выборки осевой составляющей бокового зазора с периодическим подрегулированием путем затяжки дополнительных винтов *1* приведены на рис. 3.25, *а, б, в, и*, путем перемещения дополнительных гаек *1* по дополнительным резьбам — на рис. 3.25, *г, д* и с автоматическим подрегулированием за счет упругих элементов — пружин *1*, резиновых шайб — на рис. 3.25, *е, ж, к*.

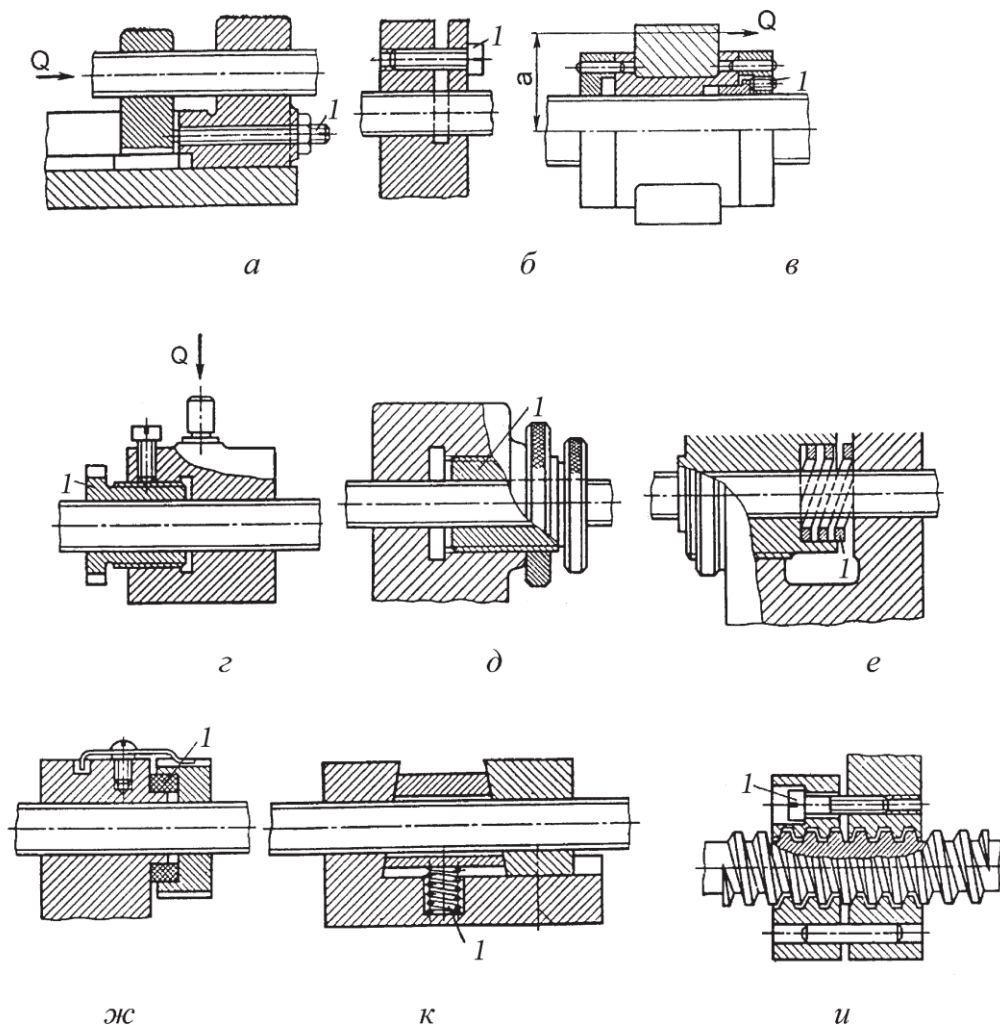


Рис. 3.25. Механизмы для выборки осевой составляющей бокового зазора с периодическим подрегулированием

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ПО ТЕМЕ 1.2.4. ВЫБОР ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 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.3 п.3.3).

### 3.3. Выбор исполнительного двигателя ЭММ

Наибольшая мощность ИЭ требуется в режиме позиционирования при переходном процессе разгона и торможения. При предварительном расчете требуемой мощности ИЭ динамическое взаимодействие степеней подвижности ПР обычно не учитывается, и переходной процесс считают равноускоренным или равнозамедленным. Необходимая мощность ИЭ отдельной степени подвижности вращательного движения для обеспечения расчетного переходного процесса может быть определена согласно рис. 3.6,а.

$$P_B = \Omega_r \frac{M_D + M_C}{\eta \lambda}, \quad (3.9)$$

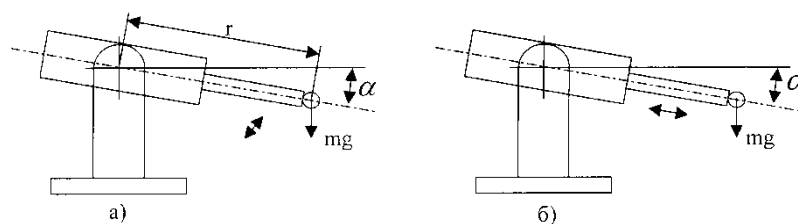


Рис.3.6. Расчетная схема механизма манипулятора с вращательным (а)  
 и прямолинейным (б) движением отдельной степени подвижности

Для прямолинейного движения отдельной координаты степени подвижности - соответственно рис. 3.6, б и выражению

$$P_{II} = v_{Г} \frac{P_{д} + P_{с}}{\eta \lambda} . \quad (3.10)$$

Здесь  $\Omega_{Г}, v_{Г}$  - скорость вращения и линейная скорость перемещения нагрузки  $\Omega_{н}$  по координате данной степени подвижности;  $M_{д}, P_{д}$  - соответственно динамический момент и сила, необходимые для перемещения инерционной массы степени подвижности манипулятора в периоды разгона и торможения;  $M_{с}, P_{с}$  - момент и сила, необходимые для перемещения неуравновешенных масс, включая переносимый груз;  $\eta$  - коэффициент полезного действия, который для наиболее часто применяемых цилиндрических и червячно-цилиндрических редукторов принимается в предварительных расчетах 0,75-0,85;  $\lambda$  - коэффициент форсировки электродвигателя по моменту, который для электродвигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением принимают 1,5 – 3, а для электродвигателей с постоянными магнитами и переменного тока – 2 – 5.

Динамический момент  $M_{д}$  и сила  $P_{д}$  при разгоне и торможении определяются из следующих выражений:

$$M_{д} = \dot{\Omega}_{Г} (I_{К} + I_{Г}), \quad (3.11)$$

$$P_{д} = \varepsilon_{Г} (m_{К} + m_{Г}), \quad (3.12)$$

где  $\dot{\Omega}_Г, \varepsilon_Г$  - угловое и линейное ускорения, ускорение нагрузки  $\varepsilon_H$ , величина которых задается или принимается, исходя из требуемых величин перемещения и максимальной скорости;  $I_K, I_Г$  - момент инерции вращающихся элементов конструкции манипулятора и груза;  $m_K$  - масса подвижных элементов конструкции манипулятора;  $m_Г, r, q$  - масса неуравновешенных частей манипулятора, включая груз, максимальный радиус действия манипулятора и ускорение свободного падения.

Требуемая мощность ИЭ при вращательном движении степени подвижности определяется по выражению:

$$P_B = \Omega_Г \frac{(I_K + I_Г) \dot{\Omega}_Г + m_Г q r \sin \alpha}{\eta \lambda}, \quad (3.13)$$

а требуемая мощность ИЭ при поступательном движении степени подвижности составит:

$$P_{II} = V_Г \frac{(m_{II} + m_Г) \varepsilon_Г + m_Г q \sin \alpha}{\eta \lambda}, \quad (3.14)$$

где  $\alpha$  - угол наклона к горизонтали.

В соответствии с полученным значением требуемой мощности выбираются подходящие по мощности ИЭ с лучшими массо-габаритными показателями.

Тип электродвигателя выбирают по стандартам. При выборе типа электродвигателя необходимо также учитывать конструктивные особенности электродвигателей, которые находят применение в МС и наиболее полно удовлетворяют массогабаритным показателям. Такие электродвигатели можно условно разделить на три группы:

1. Электродвигатели с пазовым якорем и электромагнитным возбуждением. Характеризуются следующими массогабаритными показателями:

$$\frac{T_{НОМ}}{m_H} < 0,1 \frac{Н \cdot м}{кг}; \quad \frac{T_{НОМ}}{V} < 0,2 \frac{Н \cdot м}{дм^3},$$

где  $T_{НОМ}$  - номинальный момент на валу двигателя, Нм;  $V$  – объем движущихся звеньев исполнительного устройства промышленного робота и объекта, дм<sup>3</sup>.

К этой группе электродвигателей относят электродвигатели серий МИ, ДИ, П, СЛ, СД, Д. Чаще всего для работы в приводах промышленных роботов применяют электродвигатели серии СЛ.

2. Высокомоментные электродвигатели со временем разгона до 0,2 с. Они характеризуются высоким быстродействием, большой нагрузочной способностью (7...14 – кратными перегрузками по току), хорошим демпфированием возмущающих моментов со стороны нагрузки и приемлемыми массогабаритными показателями:

$$\frac{T_{НОМ}}{m_H} > 0,2 \frac{Н \cdot м}{кг}; \quad \frac{T_{НОМ}}{V} \geq 0,2 \frac{Н \cdot м}{дм^3}.$$

Использование этих электродвигателей предпочтительно на транспортных координатах при  $T > 10$  Нм и  $P_{НОМ} \geq 0,5$  кВт. К этой группе относятся электродвигатели серий ДПР, ДПМ, ДП, ДПТ, ДВН.

3. Высокомоментные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов с гладким или дисковым якорем. Они обеспечивают высокоинтенсивные переходные процессы и целесообразны при  $T \leq 5$  Нм. К этой группе относятся электродвигатели серий МИГ, ПЯ, ПГ, ПГП.

Наиболее предпочтительными для использования в приводах роботов являются электродвигатели второй и третьей групп.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 1.2.6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭММ

### ВОПРОСЫ

1. Особенности расчета силового трансформатора.
2. Расчет параметров схемы и выбор тиристорov.
3. Расчет параметров контура нагрузки и нагрузочных характеристик 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.4.3, 4.4, 4.6, 4.7).

### 1. Особенности расчета силового трансформатора

Фазную ЭДС вторичной обмотки силового трансформатора можно определить по формуле

$$E_2 = U_\phi \cdot K_c \cdot K_r \cdot K_\alpha, \quad (4.2)$$

где  $U_\phi$  - теоретическое значение эффективного напряжения фазы вторичной обмотки трансформатора;  $K_c$  - коэффициент запаса, учитывающий возможное снижение напряжения сети;  $K_r$  - коэффициент, учитывающий падение напряжения на тиристорах и обмотках трансформатора, а также снижение напряжения вследствие перекрытия анодов в процессе комму-

тации. Теоретическое значение напряжения  $U_\phi$  определяется требуемой выпрямленной ЭДС  $E_{do}$  при угле управления равном нулю;  $K_\alpha$  - коэффициент, учитывающий неполное открытие вентилях при максимальном управляющем сигнале.

Численное значение коэффициента запаса  $K_c$  обычно принимают равным 1,1, что обеспечивает нормальную работу привода МС при снижении напряжения сети до значения  $0,8 U_n$ . При отсутствии требований к поддержанию номинальной скорости привода при снижении напряжения сети коэффициент  $K_c$  следует принимать равным 1,05, так как при этом существенно улучшается КПД и особенно коэффициент мощности, снижается типовая мощность и габариты силового трансформатора.

Коэффициент  $K_r$  принимается равным 1,05, и для его определения необходимо располагать параметрами силового трансформатора и тиристор-ров.

Численное значение коэффициента  $K_\alpha$  для нереверсивных схем принимается равным единице из-за отсутствия необходимости во введении некоторого запаса по углу управления тиристора. Для реверсивных схем следует иметь определенный запас по минимальному углу опережения инверторной группы, превышающем угол коммутации, и по времени восстановления тиристора, что вызывает необходимость в ограничении минимального угла управления тиристор-ной группы выпрямительной группы. Необходимое значение коэффициента  $K_\alpha$  можно определить, если вычислить угол коммутации по параметрам схемы. При расчете целесообразно принимать значение этого коэффициента с некоторым запасом  $K_\alpha=1,2$ , для любых реально возможных параметрах силового трансформатора.

Трансформаторы служат для согласования уровней напряжения питающей сети и преобразовательной части энергетического канала электропривода и должны соответствовать требованиям ГОСТ 11667-85.

По виду охлаждения применяемые трансформаторы могут быть с естественным воздушным охлаждением (типа ТС, ТСЗ, ТСЗР, ТСЗП), в открытом и защищенном исполнении. Типовое обозначение трансформаторов содержит следующие данные: **Т** – число фаз (трехфазный); **С, СЗ, М** – вид охлаждения (соответственно естественное воздушное при открытом исполнении, тоже при защищенном исполнении, естественное масляное); **П** – преобразовательные; **Г** – герметизированные; **Р** – изоляция типа “Резиблок”.

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора определяется выражением:

$$I_2 = I_d \cdot K_{i2} \cdot K_i, \quad (4.3)$$

где  $I_d$  – среднее значение выпрямленного тока;  $K_{i2}$  – схемный коэффициент вторичного тока;  $K_i$  – коэффициент непрямоугольности, учитывающий отклонение формы кривой тока от прямоугольной, принимается равным 1,05 – 1,1.

Действующее значение первичного тока трансформатора находится по формуле:

$$I_1 = \left( \frac{1}{K_{TP}} \right) \cdot K_{i1} \cdot I_d, \quad (4.4)$$

где  $K_{i1}$  – схемный коэффициент первичного тока;  $K_{TP}$  – коэффициент трансформации трансформатора при номинальном напряжении сети  $U_n$ .

Теоретическое значение типовой мощности  $S_{1H}$  трансформатора (табл. 4.2) для идеального выпрямителя определяют по выражению:

$$S_T = K_T \cdot U_n \cdot I_d, \quad (4.5)$$

где  $K_T$  - схемный коэффициент типовой мощности трансформатора.

Таблица 4.2

**Технические данные силовых трансформаторов**

Тип трансформатора	$S_{1H}$ , кВА	$U_{2H}$ , В	$U_{K3}$ , %	$\Delta P_{K3} / S_{1H}$ , %
ТС-1	1	170	10	5
ТС-1,6	1,6	170	10	4
ТС-6	6	208	10	3
ТС-8	8	460	10	2,0
ТС-11	11	400	10	2,6
ТС-14	14	208	10	2,5
ТС-19	19	260	10	2,5
ТС-25	25	400	10	2,5
ТС-3	3	230	6	3
ТС-6	6	230	5	3
ТС-10	10	230	4,5	3
ТС-16	16	230	4,2	3
ТС-25	25	230	4,3	3
ТС-40	40	230	4,3	2,2
ТС-63	63	230	4,3	2,2

Расчетная типовая мощность трансформатора:

$$P_T = K_c \cdot K_\alpha \cdot K_r \cdot K_T \cdot S_T \quad (4.6)$$

Мощность трансформатора с двумя вторичными обмотками (при использовании перекрестной схемы реверсивного преобразователя) принимается равной

$P'_T = 1,3 \cdot P_T$ . Для трехфазной схемы с двумя вторичными обмотками трансформатора типовая мощность теоретически должна быть увеличена

на 50%. Учитывая, что при двух обмотках лишь одна из них проводит ток, условия обеспечения тепловых режимов, охлаждения трансформатора можно улучшить. Для вторичных обмоток можно принять несколько большую плотность тока при условном увеличении мощности трансформатора  $P_T$  только на 30% [14].

По расчетной мощности трансформатора выбирают тип используемого трансформатора и его параметры (см.табл.4.2). Если в табл.4.2 отсутствует тип трансформатора с необходимой мощностью и напряжением вторичной обмотки, необходимо принять в качестве исходных параметров мощность и линейное вторичное напряжение согласно выполненному расчету, а значения  $U_{кз}$  и  $\Delta P_{кз}/S_{1H}$  (%) можно задать из табл.4.2 в соответствии с расчетной мощностью силового трансформатора.

## 2. Расчет параметров схемы и выбор тиристоров

Среднее значение тока тиристора определяется соотношением:

$$I_{TC} = K_{ic} \cdot I_d, \quad (4.7)$$

где  $K_{ic}$  - коэффициент, зависящий от схемы преобразователя (см.табл. 4.1).

Максимальная величина обратного напряжения рассчитывается по формуле:

$$U_{T \max} = K_o \cdot K_c \cdot K_\alpha \cdot E_{do}, \quad (4.8)$$

где  $K_o$  - коэффициент, определяемый из табл. 4.1;  $K_c$  - коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможное снижение напряжения в сети;  $K_\alpha$  - коэффициент запаса по углу управления тиристором ( $K_\alpha = 1,18 - 1,25$ );  $E_{do}$  - выпрямленная ЭДС преобразователя, равная номинальному напряжению двигателя.

Кратковременный допустимый ток, проходящий через тиристор, не должен превышать 15-кратного значения номинального тока тиристора  $I_{TH}$  :

$$I_{TH} > I_{KЗ}/15, \quad (4.9)$$

где  $I_{KЗ}$  - величина тока, проходящего через тиристор при коротком замыкании на стороне постоянного тока;

$$I_{KЗ} = 100 \cdot I_H / U_{KЗ}, \quad (4.10)$$

где  $I_H$  - номинальный ток двигателя;  $U_{KЗ}$  - напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Тип тиристора выбирается по среднему току вентиля и максимальному обратному напряжению. При выборе класса тиристорov следует учитывать возможное увеличение фактического напряжения на тиристорах, связанное с переходными процессами при их коммутации.

Для снижения коммутационных перенапряжений используются защитные RC-цепочки, включенные параллельно тиристорам. Однако они не могут полностью исключить перенапряжения, поэтому максимальное напряжение для выбора класса тиристорov принимается равным

$$U_T \geq U_{T \max} / K_{РП}, \quad (4.11)$$

где  $K_{РП}$  – коэффициент ограничения расчетного параметра и в соответствии с рекомендациями [18] принимается равным 0,5 – 0,7.

### 3. 1. Расчет параметров контура нагрузки тиристорного преобразователя

Расчетное эквивалентное сопротивление цепи якоря двигателя, питаемого от тиристорного преобразователя через силовой трансформатор, равно

$$R_{\Sigma} = R_{\text{Я}} + R_{\text{T}} + R_{\text{X}} + R_{\text{Щ}} + R_{\text{УР}}, \quad (4.17)$$

где  $R_{\text{Я}}$  - сопротивление обмотки якоря с учетом ее нагрева;  $R_{\text{T}}$  - сопротивление обмоток силового трансформатора;  $R_{\text{X}}$  - сопротивление, обусловленное процессами коммутации тиристоров;  $R_{\text{Щ}}$  - сопротивление щеточного контакта двигателя;  $R_{\text{УР}}$  - сопротивление уравнительного реактора.

Приведенные к цепи постоянного тока параметры силового трансформатора и тиристорного преобразователя определяются по формулам с учетом данных табл.4.2:

$$R_{\text{T}} = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot U_{2\text{л}}^2}{S_{\text{H}}^2}; \quad x_{\text{m}} = \sqrt{z - R_{\text{T}}^2};$$

$$I_{\phi 2} = \frac{S_{1\text{n}}}{U_{2\text{л}} \cdot \sqrt{3}}; \quad z = \frac{U_{\text{кз}} \cdot U_{2\text{л}}}{100 \cdot I_{\phi 2} \cdot \sqrt{3}}; \quad (4.18)$$

$$L_{\text{T}} = \frac{x_{\text{m}}}{2\pi \cdot f}.$$

Здесь  $U_{\text{кз}}$  - напряжение короткого замыкания силового трансформатора;  $\Delta P_{\text{кз}}$  - мощность активных потерь при коротком замыкании.

Сопротивление обмотки якоря двигателя выбирается по каталогу или определяется из следующих выражений:

$$R_{\text{Я}} = 0,5 \cdot (1 - \eta_{\text{H}}) \cdot \frac{U_{\text{H}}}{I_{\text{H}}}, \quad (4.19)$$

где  $\eta_{\text{H}}$  - коэффициент полезного действия ИЭ, определяемый по формуле:

$$\eta_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{U_{\text{H}} \cdot I_{\text{H}}}. \quad (4.20)$$

Сопротивление, вносимое за счет коммутации тиристоров в схеме

$$R_x = \frac{m \cdot x_m}{2 \cdot \pi} \quad (4.21)$$

Сопротивление щеточного контакта обычно принимается равным

$$R_{щ} = \frac{2}{I_H} \quad (4.22)$$

Сопротивление уравнительного и сглаживающего дросселей принимают при расчетах в пределах 0,1 – 0,3 Ом.

Расчетная (эквивалентная) индуктивность якорной цепи определяется по формуле:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{я}} + L_T + L_{\text{ур}}, \quad (4.23)$$

где  $L_{\text{я}} = C \cdot U_H / (p \cdot I_H \cdot \Omega_H)$ ,  $p$  - число пар полюсов;  $C=0,6$  - для компенсированной машины;  $C=0,25$  - для некомпенсированной машины;  $\Omega_H$  - номинальная частота вращения исполнительного электродвигателя;  $U_H, I_H$  - номинальные напряжение и ток исполнительного двигателя ЭММ.

### 3.2. Расчет нагрузочных характеристик тиристорного преобразователя

В случае применения тиристорного преобразователя с отдельным управлением тиристорными группами в реверсивном и нереверсивном ЭММ естественные статические характеристики будут включать в себя зоны прерывистых и непрерывных токов. Большинство современных автоматизированных ЭММ МС имеют преобразователи, построенные на принципах отдельного управления, и в качестве исполнительных электродвигателей используют высокомоментные двигатели постоянного тока, допускающие ускоренное вращение за счет повышения напряжения на якоре двигателя (обычно в 1,5 – 2 раза по сравнению с номинальным напряжением). Зона

прерывистых токов для таких ЭММ достаточно велика и должна быть аналитически рассчитана. С учетом эквивалентного сопротивления цепи якоря  $R_{\text{я}}$  расчет механических характеристик разомкнутого привода по системе «тиристорный преобразователь – двигатель» в зоне прерывистых токов можно выполнить по формулам:

$$\Omega_{\partial} = \frac{U_m \cdot \cos(\Theta)}{\tilde{N}} \cdot \frac{\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \Theta\right) - \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \lambda - \Theta\right) \cdot e^{\frac{\lambda}{\tau_{\text{я}}(\Theta)}}}{1 - e^{\frac{\lambda}{\tau_{\text{я}}(\Theta)}}}, \quad (4.24)$$

ток якоря двигателя

$$I = \frac{U_m}{R_{\text{я}}} \cdot \frac{m}{2 \cdot p} \left[ \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}\right) - \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \lambda\right) - \frac{\Omega_{\partial} \cdot C}{U_m} \cdot \lambda \right], \quad (4.25)$$

где  $\Theta = \arctg(\omega \cdot T_{\text{я}})$  - параметр нагрузки;  $T_{\text{я}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}}$  - постоянная времени якорной цепи;  $U_m$  - амплитуда линейного напряжения на входе преобразователя для трехфазной мостовой схемы и амплитуда фазного напряжения для трехфазной нулевой схемы;  $\lambda$  - угол проводимости тиристоров, изменяющийся в пределах от 0 до  $6,28/m$  рад;  $C$  – постоянная двигателя при номинальном магнитном потоке;  $\alpha$  - угол управления тиристоров, рад.

При расчете характеристик минимальное значение  $\alpha$  следует выбирать на менее 12 град. эл. для мостовой трехфазной схемы и не менее 21 град. эл. для трехфазной нулевой схемы [14, 19-21].

В зоне непрерывных токов расчет электромеханической характеристики выполняется по формуле:

$$E_n = \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{m}{\pi} \cdot U_m \cdot \cos \alpha,$$

$$\Omega_{\partial} = \frac{E_n - I \cdot R_{\text{я}}}{C}, \quad (4.26)$$

где  $\frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot U_m = E_{do}$ ,  $R_{\Delta}$  - сопротивление якорной цепи;  $E_{do}$  - ЭДС тиристорного преобразователя при угле управления  $\alpha=0$ .

Изменяя значения тока якоря двигателя от граничного до номинального и вычисляя угловую скорость, можно определить координаты электро-механической характеристики для построения искомой зависимости.

По полученным в результате расчета характеристикам определяют относительный перепад скорости или статизм нагрузочной характеристики разомкнутой системы «тиристорный преобразователь – двигатель» проектируемого ЭММ

$$\frac{\Delta\Omega}{\Omega_H} = \frac{\Delta\Omega_1 + \Delta\Omega_2}{\Omega_H}, \quad (4.27)$$

где  $\Delta\Omega_1$  - падение скорости в зоне прерывистых токов;  $\Delta\Omega_2$  - падение скорости в зоне непрерывных токов.

Расчет статических характеристик замкнутой системы управления ведется с учетом заданного статизма и влияния на него предполагаемых обратных связей.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 1.2.8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ИМПУЛЬСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

### ВОПРОСЫ

1. Расчет импульсного преобразователя на тиристорах.
2. Выбор аппаратуры защиты от аварийных токов.

### 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.5 п.5.4-5.5).

#### 1. Расчет импульсного преобразователя на тиристорах

Для определения основных параметров силовых элементов однофазного двухоперационного преобразователя постоянного напряжения в импульсное напряжение на якоре исполнительного электродвигателя (рис.5.4) должны быть заданы следующие исходные величины: постоянное входное напряжение  $U$ , номинальный ток якоря электродвигателя  $I_{я.н.} \approx I_O$ , время восстановления запирающих свойств тиристоров  $t_B$  при обратном напряжении, равном нулю; входная индуктивность преобразователя  $L_{вх}$ ; допустимая скорость нарастания тока тиристора  $(di_T/dt)_{доп}$ , активное сопротивление  $r$  контура перезаряда коммутирующего конденсатора.

При проектировании ЭММ определение параметров элементов силовой цепи преобразователя производят в следующем порядке.

1. Необходимая индуктивность дросселя цепи перезаряда для ограничения скорости нарастания тока в тиристоре VS1 до допустимой величины находится из выражения

$$L \geq \frac{U}{(di_{T1}/dt)_{доп}}, \quad (5.8)$$

где  $(di_{T1}/dt)$  следует принять по справочнику [18] для выбранного тиристора.

2. Продолжительность интервала одновременного пропускания тока тиристором VS1 и диодом VD $\sigma$  составляет [23, 24]:

$$\lambda_1 = I_{я.н.} \cdot L / U. \quad (5.9)$$

3. Предварительный выбор емкости коммутирующего конденсатора производят из условия, когда время, предоставляемое схемой  $t_c$  и время восстановления запирающих свойств тиристора  $t_B$  находятся в соотношении  $t_c \geq t_B$ , а их значения согласно выражению [23]:

$$t_c = 2\sqrt{LC} \arccos \frac{I_{я.н} \sqrt{L/C}}{U} \geq t_B, \quad (5.10)$$

где значение коммутирующего конденсатора  $C$  подбирают с соблюдением условия (5.10).

4. Напряжение на конденсаторе  $C$  по окончании коммутационных процессов в прерывателе преобразователя составит (для первого полупериода)

$$U_{c1} = U - \Delta U_c = U - I_{я.н} \sqrt{L_{ex}/C}. \quad (5.11)$$

5. Ожидаемое значение тока в цепи контура  $r$ - $L$ - $C$  определяют по уравнению

$$i_c = \frac{U_{c1}}{w_0 L} e^{-\delta t} \sin w_0 t, \quad (5.12)$$

где  $w_c = \sqrt{w_0^2 - \delta^2}$ ;  $T_c = 2\pi/w_c$ ;  $\delta = r/2L$ ;  $w_0 = 1/\sqrt{LC}$ .

Для определения амплитуды тока в первом и втором полупериодах перезаряда конденсатора  $C$  следует принять:  $t = T_c/4$ , ( $wct = \pi/2$ ); и  $t = 3T_c/4$ , ( $wct = 3\pi/2$ ), тогда

$$I_{c1m} = \frac{U_{c1}}{w_0 L} e^{-\delta/w_c \cdot \frac{\pi}{2}}, \quad (5.13)$$

$$I_{c2m} = -\frac{U_{c1}}{w_0 L} e^{-\delta/w_c \cdot 3\pi/2}. \quad (5.14)$$

6. В соответствии с условием  $t_c \geq t_B$  для конкретного значения конденсатора  $C$  из (5.10) производится пере проверка:

$$t_c = \frac{2}{w_c} \arccos \frac{I_0}{I_{c2m}} \geq t_B. \quad (5.15)$$

Если условие  $t_c \geq t_B$  по (5.15) не выполняется, то значение емкости  
 Следует увеличить в 1,5 - 2,5 раза и определить новые значения  $U_C$ ,  
 $U_{C2}$  по выражениям:

$$U_C = U_{C1} \left\{ \frac{w_C^2}{w_0^2} \left[ 1 - e^{-\delta t} \left( \frac{\delta}{w_C} \sin w_C t + \cos w_C t \right) \right] - 1 \right\}, \quad (5.16)$$

$$U_{C2} = U_{C1} \left[ \frac{w_C^2}{w_0^2} (1 + e^{-\delta/w_C \cdot \pi}) - 1 \right]. \quad (5.17)$$

7. Для выбора ограничительного сопротивления  $r_{II}$  конденсатора  
 $C_I$  схемы прерывателя задаются допустимой величиной напряжения  
 на главном тиристоре ( $U_{VS1 \text{ доп}}$ ) по условию

$$U_{VS1 \text{ доп}} \geq U_{VS1 \text{ макс}}. \quad (5.18)$$

8. Максимальное напряжение на главном тиристоре  $U_{VS1}$  находят  
 из уравнения

$$U_{VS1 \text{ макс}} = U_{CK} \left\{ 1 - e^{-\delta_1 t_{M1}} \left( \cos w_{C1} t_{M1} - \frac{\delta_1}{w_{C1}} \sin w_{C1} t_{M1} \right) \right\}, \quad (5.19)$$

где  $U_{CK}$  — напряжение на коммутирующем конденсаторе при втором пе-  
 резаряде, когда ток конденсатора достигает значения тока  
 нагрузки

$$U_{CK} = U \left\{ \frac{w_C^2}{w_0^2} \left[ 1 - e^{-\delta \left( \frac{3T_C + t_C}{4} \right)} \cdot \left( -\frac{\delta}{w_C} \cos w_C t_C / 2 + \sin w_C t_C / 2 \right) \right] - 1 \right\}; \quad (5.20)$$

$\delta_1 = r_I / 2L$ ;  $t_{M1}$  — момент времени, при котором напряжение на тиристо-  
 ре  $VS_I$  достигает амплитудного значения, определяется из выра-  
 жения:

$$t_{M1} = \frac{1}{w_{C1}} \left( \pi - \arctg \frac{2\delta_1}{w_{C1} - \delta_1^2 / w_{C1}} \right). \quad (5.21)$$

$$w_{C1} = \sqrt{w_0^2 - \delta_1^2}; \quad w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_1}}; \quad (5.22)$$

значения разрядного резистора  $r_1$  в расчетах принимают от 10 до 75 Ом. Мощность резистора  $r_1$  может быть определена согласно выражению

$$P_{r1} \geq U_{C1}^2 C_1 f, \quad (5.23)$$

где  $U_{C1}$  – расчетное напряжение конденсатора принимается равным  $U_{VS1 \text{ макс}} f$  – задающая частота работы прерывателя. Значение емкости конденсатора  $C_1$  при проектировании узла защиты тиристора  $VS1$  принять равным 0,3 – 0,5 мкФ.

Для ограничения амплитуды и скорости нарастания напряжения на тиристорах в схемах прерывателей могут быть использованы также дроссели насыщения  $ДН$ , включаемые последовательно с индуктивностью  $L$  в контур перезаряда конденсатора  $C$  по схеме  $C - VS1 - L - ДН - VD2 - C$ .

Если резистор  $r_2$  шунтирован диодом  $VD3$ , то мощность резистора  $r_2$  может быть принятой как  $0,5P_{r1}$ . Тиристоры  $VS1$ ,  $VS2$  и диоды  $VD1$ ,  $VD2$  выбираются на напряжение равное  $U_{VS1} + \Delta U_C$ , где  $\Delta U_C = I_0 \sqrt{L_{ex} / C}$ . В тоже время шунтирующие диоды  $VD_0$ ,  $VD_1$ ,  $VD_2$ , выбираются на напряжение равное  $2U$ . Главные тиристоры прерывателя и диоды  $VD1$ ,  $VD2$  при проектировании электромеханического модуля следует выбирать на полный ток нагрузки  $I_{я.н.}$

## 2. Выбор аппаратуры защиты от аварийных токов

При функционировании ЭММ могут возникать аварийные процессы в энергетическом канале, сопровождаемые значительными токами. В

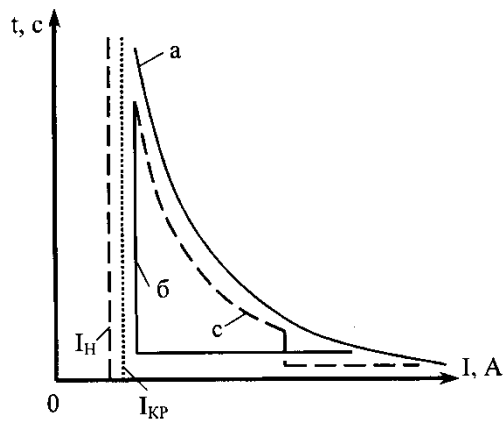


Рис. 5.5. Ампер-секундные характеристики

аппаратов защиты: зависимые (а), независимые (б)

и зависимые с отсечкой по току (с)

качестве защитной аппаратуры в ЭММ предусматривают установку тепловых автоматов максимально-токовой защиты или предохранители с плавкими вставками. Такая защита реагирует на значение тока и отключает энергетический канал от сети питания (источника электроэнергии) с определенной выдержкой времени. Выбор максимально-токовой защиты обуславливается сравнением ампер-секундных (или времятоковых) характеристик защищаемого участка энергетического канала ЭММ и защитного аппарата. На рис.5.5 приведены различные ампер-секундные характеристики аппаратов защиты: зависимые, независимые и зависимые с отсечкой по току. Выбор защитной аппаратуры осуществляется с учетом режима работы ЭММ, характеристик монтажных проводов и элементов энергетического канала, условий эксплуатации МС, а также функционального назначения аппарата защиты, рода напряжения и тока, величины преобразуемой мощности. При модульном построении МС следует учитывать все перечисленные факторы и окончательное конструктивное оформление ЭММ выполнять после проведения предварительного теплового расчета. Протекание значительных токов в энергетическом канале ЭММ связано с возникновением короткого замыкания, вызванного повреждением изоляции участка цепи, выходом из строя силового полупроводникового прибора (СПП) и т.д. Токи проходят

по неповрежденным участкам цепи: проводам, шинам и токоведущим частям электрических аппаратов за сравнительно малый промежуток времени, в течение которого поврежденный участок отключается установленной защитой. Поэтому все электрические силовые элементы ЭММ должны быть выбраны так, чтобы токи короткого замыкания их не повреждали. Поскольку ЭММ комплектуются электрическими машинами, трансформаторами, электромагнитами и сглаживающими дросселями, то включение названных электромагнитных устройств сопровождается переходными процессами, также влияющими на выбор защитной аппаратуры. Обычно номинальное значение тока аппарата защиты принимается меньше критического (пограничного) значения  $I_{кр}$  (см.рис.5.5), при котором происходит срабатывание защиты, т.е.  $I_{н.з} = I_{кр} / K_з$ , где  $K$  – коэффициент запаса ( $K_з = 1,15-1,2$ ). Следовательно, основным критерием выбора аппарата защиты является соблюдение условия, что длительный ток нагрузки не должен превышать значения  $0,9 \cdot I_{н.з}$ . В настоящее время при проектировании ЭММ предпочтение отдают автоматическим выключателям в силу их большей надежности, многократности функционирования, универсальности и т.д. Выбор автоматического выключателя осуществляют по номинальным характеристикам (значениям напряжения и тока) с последующим определением тока уставки теплового и электромагнитного расцепителей [25]. Тепловой расцепитель автомата защищает схему ЭММ от длительной перегрузки по току, значение уставки которого принимается равным  $I_{кр}$ . Электромагнитный расцепитель автомата защищает электроустановку (ЭММ) от коротких замыканий в любой точке электрического канала. Ток уставки электромагнитного расцепителя определяют из условий: автомат не должен срабатывать от пусковых токов ( $I_{п}$ ) исполнительного двигателя

ИД, а ток срабатывания электромагнитного расцепителя  $I_{\Delta}$  выбирается кратным току срабатывания теплового расцепителя, т.е.  $I_{\Delta} = I_{кр} \cdot K_K$ , где  $K_K = (4,5-10)$  – коэффициент кратности.

Для силовой цепи ЭММ наиболее приемлемы зависимые характеристики, которые обеспечивают быстрое действие при больших токах короткого замыкания, и имеют определенную инерционность при кратковременных скачках нагрузки и пусковых токах, т. е. всегда должно удовлетворяться условие:

$$I_{н.з.} \geq I_{н.п.}, \quad t_A > t_{пп},$$

где  $I_{н.п.}$  – номинальный ток потребителя ЭММ,  $t_A$  – время срабатывания аппарата защиты,  $t_{пп}$  – время переходного процесса.

**ОБЫЧНО ВРЕМЯ  $T_{пп}$  ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ПО АМПЕР-СЕКУНДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ АППАРАТА ЗАЩИТЫ ДЛЯ РАСЧЕТНОГО СРЕДНЕКВАДРАТИЧНОГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЦЕПИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КАНАЛА:**

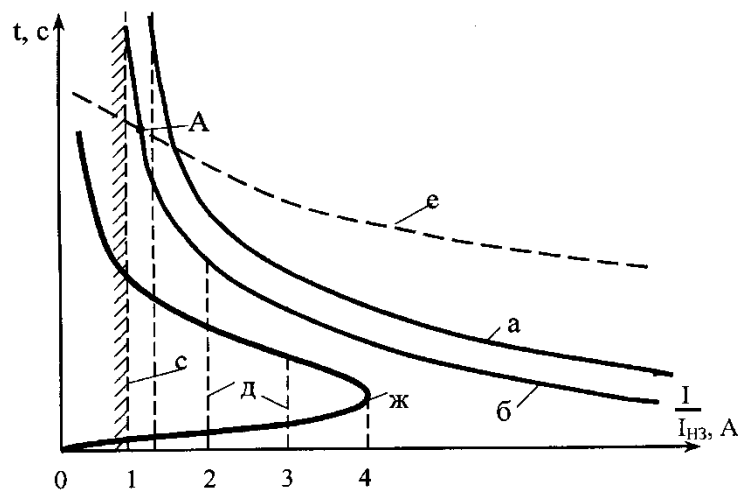
$$I_{ср.кв} = \sqrt{\frac{1}{t_{пп}} \cdot \int_0^{t_{пп}} i^2 dt}, \quad (5.24)$$

где  $i$  – действующее значение тока нагрузки (потребления).

Выбор аппарата по номинальному току завершается сопоставлением ампер-секундных характеристик аппарата защиты и цепи объекта защиты (ОЗ).

Если цепь ОЗ должна быть защищена во всем диапазоне токовых перегрузок, то ее ампер-секундная характеристика **а** (рис. 5.6) располагается выше области ампер-секундной характеристики **б** аппарата защиты. Если характеристика **е** объекта защиты имеет пересечение с ампер-секундной характеристикой **б** аппарата защиты в точке А, то эффект защиты возможен при токах перегрузки более  $1,5 I_{н.з.}$  Для обеспечения

надежной защиты ОЗ от тока перегрузки от  $I_{н.з}$  до  $1,5 I_{н.з}$  аппарат защиты следует заменить с другой ампер-секундной характеристикой, формирование которой осуществляется двумя легкоплавкими спаями инерционного предохранителя [26]. Чтобы исключить срабатывание предохранителей в момент включения нагрузки, часто задаются двухкратным запасом ампер-секундной характеристики по отношению к пусковой (кривая ж, например, при пуске трехфазного асинхронного двигателя). Важнейшей характеристикой аппаратов защиты является термическая устойчивость, заключающаяся в способности контактов аппарата отключать токи короткого замыкания без повреждений. При этом температура токоведущих частей не должна превышать допустимую, определяемую произведением  $(I^2 \cdot t)_{доп} \approx (300 \div 500) 10^3 \cdot A^2 \cdot c$ , т.е. термической устойчивостью аппарата защиты. Предельное значение  $I^2 t$  формируется током термической стойкости  $I_t$  за определенное время  $t$  (1,5 или 10 с).  
 При



с – линия ограничения по номинальному току аппарата защиты

Рис. 5.6. Ампер-секундные характеристики объекта защиты (а) и аппарата защиты (б)

этом считают, что ток термической стойкости представляет собой наибольший неизменный ток (действующее значение), протекание которого в течение заданного промежутка времени не приведет к повреждению электрического аппарата силовой цепи ЭММ. Если для выбранного аппарата в каталоге приведена величина тока  $I_t$ ,  $t$  – секундной термической стойкости, то выдержать тепловое действие тока короткого замыкания аппарат способен при условии [26]

$$I_{ср.кв}^2 t \leq (I^2 t)_{доп} \quad \text{или} \quad I_y^2 t_\phi \leq I_t^2 \cdot t, \quad (5.25)$$

где  $I_y$  – установившееся значение тока короткого замыкания,  $t_\phi$  – фиктивное время.

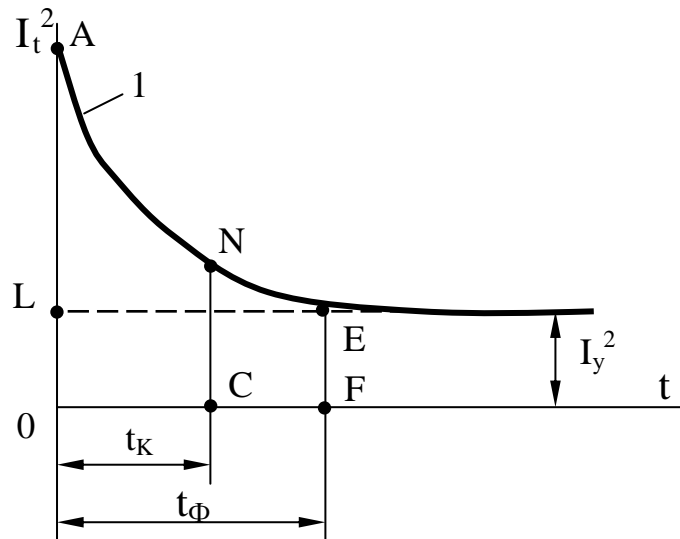


Рис. 5.7. Кривая квадратичного значения тока аппарата защиты

Фиктивным называется промежуток времени, в течение которого тепловое действие установившегося значения тока равно тепловому действию фактического изменяющегося тока короткого замыкания за время его существования  $t_K$  (рис. 5.7). Зависимость второй степени действующего значения тока короткого замыкания от времени  $I_t^2 = f(t)$  представлена кривой 1. С течением времени квадратичное значение тока стремится к установившемуся значению тока  $I_y^2$ , отключаемому автоматом защиты через промежуток времени  $t_K$ . Если заменить реальный процесс с изменяющимся током  $I_t$  другим (фиктивным) процессом, ток короткого замыкания которого с начального момента принимает установившееся значение  $I_y$ , то тепловое действие тока короткого замыкания и изменяющегося тока  $I_t$  можно представить равновеликостью площадей OANC и OLEF. Сопоставление указанных площадей и величин в (5.25) позволяет записать:

$$t_{\Phi} = \frac{1}{I_y^2} \int_0^{t_K} I_t^2 dt \quad (5.26)$$

Проверка электрических аппаратов на термическую стойкость с использованием фиктивного времени находит широкое применение

вследствие простоты и удобства расчетов при проектировании электро-энергетических систем [27]. Выбранный автоматический выключатель затем проверяется по чувствительности и отключающей способности. Автоматы с номинальным током до 100А должны срабатывать при условии, что  $I_{\Delta} = 1,41 \cdot I_{OK3}$ , где  $I_{OK3}$  – ток однофазного короткого замыкания. Автоматы с номинальным током более 100А должны срабатывать при  $I_{\Delta} = 1,26 \cdot I_{OK3}$ . Чувствительность выбранного автомата защиты, имеющего только тепловой расцепитель, определяется соотношением  $I_{T.P} = 3I_{OK3}$ . В тоже время отключающая способность автомата с электромагнитным расцепителем определяется величиной тока трехфазного короткого замыкания  $I_{T.K3}$  по условию  $I_{\Delta \text{ откл}} \geq I_{T.K3}$ . При отсутствии значений токов однофазного короткого замыкания последние обычно определяются в схемах с глухо-заземленной нейтралью [26 ] и нулевым проводом по формуле:

$$I_{O.K.3} = U_{\phi} / (z_{II} + z_T), A, \quad (5.27)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети, В;  $Z_{II}$  – сопротивление петли фаза-нуль, Ом;  $Z_{II} = \sqrt{R_{II}^2 + X_{II}^2}$ , где  $R_{II}$  – активное сопротивление контура короткого замыкания;  $X_{II}$  – индуктивное сопротивление контура, рассчитываемое исходя из удельного индуктивного сопротивления провода, равного 0,6 Ом / км.

Значение полного сопротивления фазной обмотки силового трансформатора сети питания промышленной частоты на стороне низкого напряжения составит:

$$Z_T = U_K \cdot U_H / \sqrt{3} \cdot I_H \cdot 100, \text{ Ом}, \quad (5.28)$$

где  $U_H$ ,  $I_H$  - номинальные значения напряжения и тока сетевого трансформатора;  $U_{K3}\%$  - напряжение короткого замыкания трансформатора[26].

При выборе аппарата защиты необходимо учитывать следующие требования:

- защита должна работать надежно без ложных отключений;
- чувствительность защиты должна обеспечивать срабатывание автомата при наименьших токах короткого замыкания и недопустимых перегрузках в цепи ЭММ;
- защита должна работать селективно по отключению участков короткого замыкания разветвленной цепи приемников электроэнергии;
- защита должна обладать необходимой устойчивостью к изменению температуры окружающей среды и электродинамическим воздействиям на коммутационную способность.

После выбора аппарата защиты по каталожным данным заводов-изготовителей (табл.5.1) и проверки его свойств следует разработать систему токовой защиты отдельных участков силовой цепи, если это предусматривает задание на проектирование ЭММ.

Таблица 5.1

**Автоматические выключатели серии АП50Б (двух- и трехполюсные)**

Испо	I <sub>НОМ</sub> , А	I <sub>доп</sub> КЗ при		
		пост.ток е 220В и	переменном токе и cosφ = 0,45 ±0,05	
			380 В	500 В

Л- нени е	расцепит еля	постоян ной времени цепи 0,01с±0, 005 макс. знач. А при разрыве цепи двумя полюсам и	Ампли -туда ударно го тока, А	Дейст- вующе е значен ие тока, А	Ампли -туда ударно го тока, А	Дейст- вующе е значен ие тока, А
3МТ	1,6	500	500	300	500	300
3М	2,5	2000	700	400	700	400
2МЗ ТН	4	1000	1000	600	1000	600
2МН	6,3	1400	1400	800	1400	800
2МЗ ТО	10	2500	3400	2000	2550	1500
2МЗ ТО	16	2500	3400	2000	2550	1500
3МЗ ТД	25	2500	5100	3000	6000	3500
- -	40	2500	8500	5000	6000	3500

- -	50	2500	8500	5000	6000	3500
- -	63	4000	10000	6000	6000	3500

Примечания. М – наличие в расцепителе электромагнитного элемента, мгновенно действующего при токе КЗ; Т – наличие теплового элемента, действующего при перегрузках с обратозависимой от тока выдержкой времени; О – наличие расцепителя максимального тока в нулевом проводе; Н – наличие расцепителя минимального напряжения; Д – наличие расцепителя дистанционного (независимого). Масса выключателя двухполюсного 1кг, трехполюсного - 1,3кг; в металлической оболочке - 3,5кг.

Селективность защиты обеспечивается последовательным соединением нескольких аппаратов защиты и соответствующим подбором их ампер-секундных характеристик: чем ближе аппарат защиты к источнику, тем больше время его срабатывания. Выбор аппаратов защиты для ЭММ следует производить с учетом также конструктивного оформления модуля, удобства производства профилактических работ по поддержанию надлежащего технического состояния ЭММ в эксплуатации.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 1.2.10. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДУЛЯ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ**

### ВОПРОСЫ

1. Принципы управления, постановка задачи и синтез ЭММ методом АЧХ.
2. ЭММ с обратными связями и его статический расчет.

### 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.7).

## 1.1. Принципы управления мехатронными системами

Для выполнения машинного технологического цикла (процесса) требуется согласование работы всех механизмов и выходных устройств МС, включая исполнительные, контролирующие и управляющие. Естественно, что в основе управления машинами лежат принципы механики, увязывающие их силовые, энергетические и массовые характеристики.

В общем представлении системы автоматического управления (САУ) движением в современных машинах могут быть построены с использованием следующих принципов:

- 1) управление по разомкнутому циклу;
- 2) управление по замкнутому циклу;
- 3) комбинированное управление.

Автоматическое управление с разомкнутой цепью воздействий характеризуется функциями управления, которые не зависят от действительного хода (протекания) технологического процесса и выполняются по разомкнутому циклу для получения определенного конечного результата (рис. 7.1.).

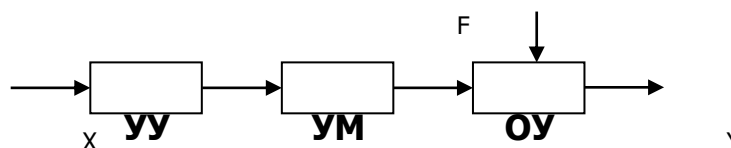


Рис. 7.1. Управление по разомкнутому циклу (жесткое управление)

Управление (X) от оператора через управляющее устройство (УУ), усилитель мощности (УМ) воздействует на объект управления (ОУ). F – возмущающее воздействие, возникающее в результате взаимодействия САУ с внешней средой и вызывающее непланируемые

изменения выходных координат.  $Y$  – предписанное значение выходной координаты, определяемое требуемым режимом работы.

К автоматическому управлению с разомкнутой цепью воздействий также относятся САУ по возмущению (рис. 7.2)

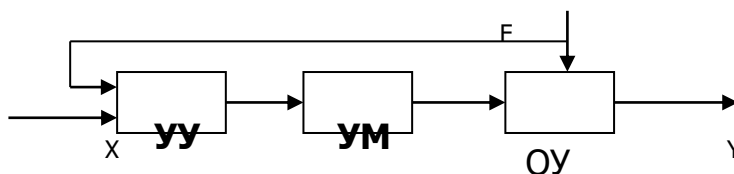


Рис. 7.2. Управление по возмущению

Сигнал датчика, измеряющего возмущение  $F$ , преобразуется в регулирующее воздействие на объекте управления  $ОУ$ . Поскольку природа возмущений  $F$  может быть различная, то регулирование по такой схеме затруднено и осуществляется только по основным возмущениям.

Управление по замкнутому циклу (рис 7.3) характеризуется тем, что значение требуемых показателей какого-либо процесса поддерживается за счет подачи на управляющее устройство  $УУ$  сигналов с учетом фактического протекания процесса путем введения обратных связей.

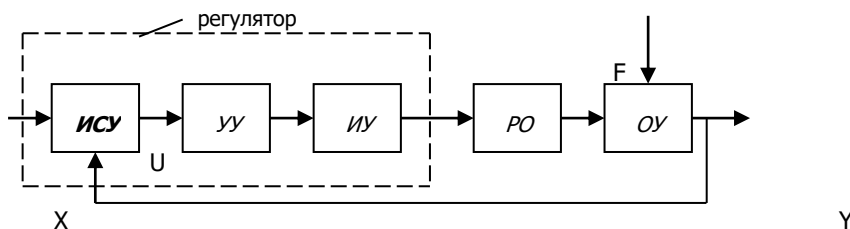


Рис. 7.3. Управление по замкнутому циклу

Замкнутая система включает  $ОУ$  (машину, агрегат), регулирующий орган ( $РО$ ), непосредственно осуществляющий изменение регули-

руемой величины в ОУ. Регулятор включает: измерительно-сравнивающее устройство ИСУ, измеряющее текущее значение регулируемой величины  $Y$  и вырабатывающее сигнал рассогласования  $U=X-Y$ ; управляющее устройство УУ, усиливающее и преобразующее по необходимому закону сигнал  $U$ ; исполнительное устройство ИУ, выдающее (осуществляющее) регулирующее воздействие на регулируемый орган РО.

Рассмотренная схема управления действует по принципу отклонения, в которой влияние возмущения ослабляется, но не устраняется.

В современных машинах широко используются системы программного управления, формирующие входные сигналы для программного движения машины.

При динамическом анализе и синтезе машин следует учитывать и свойства систем управления движением, образующих с выходными звеньями двигателя и механизмом машины единую мехатронную систему. С точки зрения конструктивного исполнения МС могут выполняться с последовательным соединением передаточного и исполнительного механизмов, параллельным соединением нескольких исполнительных механизмов (ИМ).

С учетом изложенного представить функциональную схему системы с управлением на входе исполнительного двигателя ИД можно в виде, как показано на рис. 7.4. Программный сигнал  $X$  подается на суммирующий узел А, где формируется сигнал управления  $U$ , определяемый как  $U=X-\Delta U$ .

Значение выходной координаты  $Y$  (или ее производной по времени  $Y'$ ) сравнивается с ее программным значением  $Y_n$  (или  $Y_n'$ ). Сигнал ошибки  $\psi=Y-Y_n$  подается на вход отрицательной обратной связи, которая преобразует его в сигнал  $-\Delta U$ . В зависимости от характера за-

дания программного закона движения  $Y_n(t)$  различают системы стабилизации скорости ( $Y_n'(t)=const$ ), системы контурного управления, когда  $Y_n(t)$  – заданная функция времени, и системы позиционирования ( $Y_n(t)=const$ ).

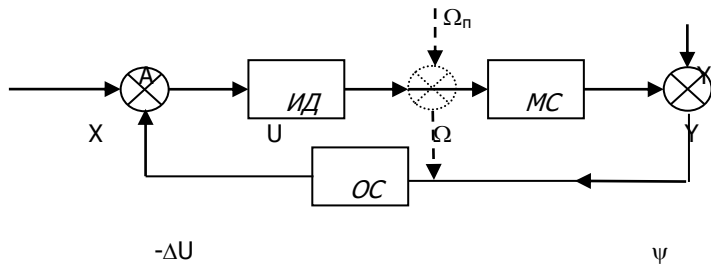


Рис. 7.4. Управление на входе исполнительного двигателя

Обратная связь может охватывать (пунктиром) только исполнительный двигатель ИД, тогда сигнал  $\Delta U = \Omega - \Omega_n$  пропорционален разности фактической  $\Omega$  и программно заданной скорости  $\Omega_n$  вращения вала двигателя. В приведенной схеме управления решается задача стабилизации скорости, т.е. поддержание скорости в условиях меняющихся нагрузок. Контурное управление осуществляется с помощью следящих систем, обрабатывающих задаваемое программное движение  $Y_n(t)$  путем сравнения с ним реального движения.

На рис. 7.5. приведена функциональная схема следящей системы, построенная по принципу комбинированного управления. Здесь регулируемая величина  $Y$  управляемого объекта ОУ изменяется по заданному на входе системы закону  $X(t)$  под влиянием управляющего воздействия  $U$ .

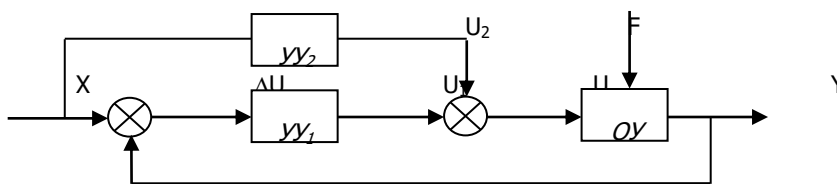


Рис. 7.5. Функциональная схема следящей системы с комбинированным управлением

В этой схеме, кроме устройства управления  $УУ_1$ , имеет место дополнительное управляющее устройство  $УУ_2$ , через которое вводится непосредственно на управляемый объект ОУ воздействие функции

$X(t)$ , заданной на входе системы. Таким образом, управляющее воздействие складывается из двух составляющих:  $U_1$ , зависящей от рассогласования  $\Delta U = X - Y$ , и  $U_2$ , определяемой изменением заданного закона сигнала  $X$ . Устройство управления  $УУ_2$  предназначено для улучшения качества системы, построенной по принципу отклонения, и является дополнительной связью в системе.

В системах позиционирования (см.рис.7.4) выходное звено исполнительного двигателя ИД или рабочий орган ОУ (МС) выводится в заданное положение с выполнением дополнительного требования по обеспечению быстродействия и точности при подходе к точке позиционирования. В настоящее время широкое распространение для позиционного и контурного управлений движением получили исполнительные устройства (ИУ) с замкнутым по положению (следящим) приводом. В зависимости от установки датчика положения (ДП) различают полузамкнутые и замкнутые исполнительные устройства (ИУ). В полузамкнутых ИУ датчик положения устанавливается на валу двигателя, в замкнутом – на исполнительном механизме. Для повышения качества управления зачастую проводится дополнительная обработка сигналов в цепях управления как адаптация, оптимизация и фильтрация. Однако при всех видах преобразования сигналов в цепях управления действительное изменение характеристик движения машины, отдельных узлов может быть осуществлено за счет приложения к ним механических воздействий, соизмеримых с действующими возмущениями. Для компенсации возмущающих сил необходимо прикладывать управляющие воздействия максимально близко к точкам возмущения, минуя главный привод МС. При этом главный привод получает лишь сигналы программного управления, а управляющие воздействия цепи обратной связи прикладываются с помощью дополнительных устройств, дей-

ствующих на исполнительные звенья, подвергающиеся возмущениям. Такое техническое решение придает системе управления функции активной разгружающей системы. На указанном принципе построены системы с силовым, кинематическим управлением. В системе с силовым управлением обратная связь по сигналу ошибки (рис.7.6) формирует обобщенную силу  $U$  (управление), прикладываемую непосредственно к механической системе [4, 29, 33]. Действие силы  $U$  должно приводить к уменьшению ошибки  $\psi$ .

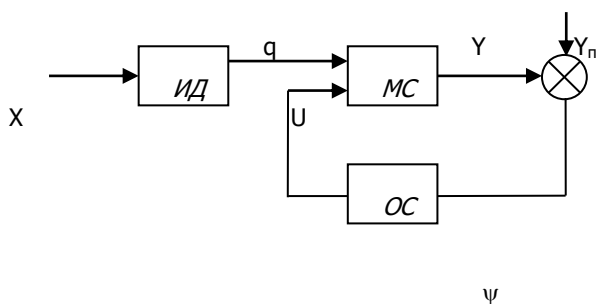


Рис. 7.6. Функциональная схема системы с силовым управлением

Математически линейная система с силовым управлением описывается выражением вида

$$U(p) = W_U(p) \cdot \psi, \quad (7.1)$$

где  $W_U(p)$  – передаточная функция обратной связи.

Системы с силовым управлением подразделяются на пассивные и активные. В пассивных системах для формирования управления применяют механические элементы: инерционные, упругие или диссипативные. Простейшими примерами пассивной системы с силовым управлением являются системы с маховиком, установленным на одном из вращающихся валов машины, динамическим гасителем колебаний

или демпфером. На рис. 7.7. приведена функциональная схема системы с кинематическим управлением.

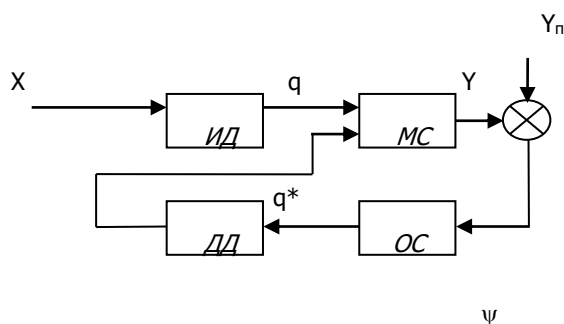


Рис. 7.7. Функциональная схема системы с кинематическим управлением

При кинематическом управлении мехатронная система МС обладает дополнительной степенью подвижности. Здесь изменение координаты  $q^*$  осуществляется дополнительным двигателем ДД по сигналу ошибки, преобразуемому обратной связью. Сложение дополнительного перемещения с основным осуществляется дифференциальными механизмами. Такое взаимодействие приводит к компенсации ошибки и применяется при точном позиционировании механизмов, машин. Для обеспечения малых дополнительных перемещений МС используют пьезо- или магнитострикционные преобразователи, вибродвигатели, шаговые двигатели.

В соответствии с приведенными принципами управления находят применение отечественные и зарубежные разработки электроприводов (ЭП) МС, различающиеся:

- по роду тока - ЭП постоянного тока с ЭД постоянного тока и ЭП переменного тока с ЭД переменного тока;

- по виду УПУ – тиристорный с преобразователем на тиристорах, работающий по схеме «управляемый выпрямитель - двигатель (УВ-Д)»; транзисторный с преобразовательным устройством в виде двухтактного усилителя мощности ( по схеме ШИП-Д);
- по типу передаточного устройства - редукторный, безредукторный; электрогидравлический с гидравлическим передаточным устройством; электромагнитный – с применением фрикционных или ферро-порошковых муфт, выполняющих роль передаточного механизма;
- по характеру изменения важнейших параметров – нерегулируемый ЭП, параметры которого изменяются от внешних возмущений, и регулируемый ЭП, параметры которого изменяются и поддерживаются под действием управляющего устройства;
- по роду задачи регулирования различают:
  - а) ЭП со стабилизированным параметром, когда выходная координата поддерживается на заданном уровне с необходимой точностью;
  - б) ЭП программно-управляемый служит для изменения того или иного параметра по заранее заданной программе;
  - в) ЭП следящий (СП) отрабатывает изменение выходного параметра в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;
- по виду управляющего сигнала ЭП разделяют на электроприводы с непрерывным управлением и ЭП с дискретным управлением. Применение указанных методов управления можно формировать непрерывное или прерывистое движение выходного вала ИД. По указанному признаку различают ЭП непрерывного и дискретного действия;
- по структуре электроприводы подразделяются на разомкнутые, не имеющие ОС, замкнутые и комбинированные.

## 1.2. Постановка задачи синтеза системы управления

В настоящее время существует несколько постановок задач проектирования (синтеза) электромеханических моделей мехатронных систем, заключающихся в выборе структурной схемы, параметров, способа технической реализации разработанного модуля из условия выполнения ряда требований к проектируемой мехатронной системе и обеспечению ее характеристик. Одним из способов описания требований к проектируемому ЭММ может служить задание показателей качества работы ЭММ как допустимое значение статической, динамической и средней квадратической ошибок. При этом должны быть известны характеристики управляющих и возмущающих воздействий. Детерминированные воздействия должны быть заданы как функции времени или их производные. Случайные сигналы и помехи должны быть определены их корреляционными функциями или спектральными плотностями.

Если управляющий сигнал описывается медленно меняющейся функцией времени, а сигнал возмущения отсутствует, то используют **первый способ** проектирования САУ ЭММ, выполняя задачу синтеза в следующем порядке [33]:

- 1) для объекта управления (ОУ) по техническим условиям выбирают регулирующий орган с силовым приводом, усилительно-преобразовательное устройство (УПУ) и датчики. Объединяя силовые устройства и устройства информационного канала линиями связи, формируют неизменяемую часть ЭММ;

- 2) по статическим и динамическим характеристикам выбранных устройств составляют передаточные функции отдельных элементов,

формируют структурную схему, определяют места включения корректирующих устройств (последовательное, параллельное и последовательно-параллельное);

3) по заданным требованиям на запас устойчивости по фазе, амплитуде соответственно показателям качества и точности строят желаемые логарифмические амплитудные (ЛАЧХ<sub>ж</sub>) и фазовые частотные характеристики (ЛФЧХ) разомкнутой системы ЭММ;

4) по построенным желаемым (ЛАЧХ<sub>ж</sub>) и логарифмическим характеристикам неизменяемой (нескорректированной) части (ЛАЧХ<sub>нс</sub>) определяют коэффициент усиления дополнительно вводимых промежуточных усилителей, а также тип и параметры корректирующих устройств.

**Второй способ** используют, когда на синтезируемую систему действует возмущение, описываемое в форме прямого преобразования Лапласа. В этом случае задачу синтеза выполняют для наиболее полного подавления возмущения при минимальном значении ошибки в системе.

**Третий способ** применяют, когда в системе действуют управляющий и возмущающий сигналы одновременно. В этом случае синтезируемая система должна наиболее точно обрабатывать управляющий сигнал и подавлять влияние возмущения.

Если характеристики управляющих и возмущающих воздействий известны, то систему управления можно спроектировать как оптимальную, обеспечив минимальное значение суммарной среднеквадратической ошибки (при использовании теории оптимальных фильтров Н. Винера и Р. Калмана). Очевидно, что передаточная функция оптимальной системы зависит не только от характеристик сигнала и помехи, но и от выбранного критерия оптимальности (оценки качества работы). При наиболее общей постановке

задачи синтеза оптимальной системы решение находят с учетом достижения минимума функционала (критерия качества):

$$J = \int_0^T [U_e(t) + U_u(t)] dt, \quad (7.2)$$

где  $U_e(t) = e^2(t) + \alpha_1 e^2(t) + \dots + \alpha_k (e^k(t))^2$  - квадратичная форма относительной ошибки системы  $e(t)$ ;  $U_u(t) = U^2(t) + q_1 U^2(t) + \dots + q_k (U^k(t))^2$  - квадратичная форма относительно сигнала управления  $U(t)$ ;  $T$  - время функционирования системы;  $\alpha_i$  и  $q_i$  - коэффициенты квадратичных форм функционала (7.2).

Первая квадратичная форма функционала (7.2) выбирается из требований, предъявляемых к точности синтезируемой системы, вторая учитывает ограничения на сигнал управления. Задача оптимального синтеза для рассматриваемого случая может быть сформулирована следующим образом. Из множества  $U(t)$  следует выбрать и технически реализовать такой сигнал управления, который переведет ОУ из начального состояния в конечное и минимизирует функционал (7.2).

Для решения таких задач применяют различные подходы: методы вариационного исчисления, принцип максимума Л.С. Понтрягина, метод динамического программирования Р. Беллмана. Однако синтез оптимальных систем из условия минимума функционала (7.2) достаточно трудно выполним, поскольку отсутствуют аналитические методы опре-

деления связи коэффициентов квадратичных форм  $\alpha_i$  и  $q_i$  с заданными показателями качества работы синтезируемой системы ЭММ. Значительный перебор вариантов оптимальных систем с различными видами квадратичных форм и их коэффициентов ведет к увеличению объема вычислений и росту машинного времени при проектировании ЭММ. Важным фактором также является реализация найденных алгоритмов управления из-за их сложности и приближенного воспроизведения.

В настоящее время наибольшее распространение при синтезе систем управления ЭММ МС находит динамический синтез, выполняемый из условия обеспечения допустимых ошибок в проектируемой системе и удовлетворения других показателей качества работы системы. При проектировании ЭММ всегда нужно стремиться к простоте схемотехнического решения, так как помимо требования к качеству функционирования в процессе синтеза модуля предъявляются требования и к его сложности. В качестве функционала сложности проектируемого модуля часто используют следующий интеграл [34]:

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^{2\gamma} |W_p(j\omega)|^2 d\omega, \quad (7.3)$$

где  $W_p(j\omega)$  - частотная характеристика разомкнутой системы;  $\gamma$  - порядок астатизма.

Кроме требований к качеству работы проектируемого ЭММ, к его сложности могут предъявляться и другие требования: по надежности, стабильности характеристик и массогабаритным показателям.

### 1.3. Синтез электромеханического модуля методом амплитудно-частотных характеристик

На этапе статического расчета ЭММ определяется передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{p^\gamma \cdot A(p)} = \frac{K_p}{p^\gamma (T_1 p + 1)(T_2 p + 1) \dots (T_i p + 1)}, \quad (7.4)$$

где  $K_p$  - коэффициент усиления разомкнутой системы ЭММ;  $\gamma = 0, 1, 2, \dots$  - порядок астатизма электропривода, определяемый числом интегрирующих звеньев, и для ЭП астатических первого порядка  $\gamma = 1$ ;  $\gamma = 2$  - для приводов астатических второго порядка;  $i$  - произвольное натуральное число условно перенумерованных постоянных времени типовых звеньев системы следящего ЭП, располагаемых в (7.4) в порядке убывания, т.е.  $T_1 > T_2 > \dots > T_i$ .

Коэффициент усиления разомкнутой системы следящего электропривода (СЭП):

$$K_p = \prod_{i=1}^{n,k} K_i \cdot K_j, \quad (7.5)$$

где  $\Pi$  - знак произведения;  $K_i, K_j$  - коэффициенты передачи звеньев структурной схемы, определяемые статическими характеристиками элементов АСУ.

Известно [34], что целью статического расчета системы при синтезе является определение коэффициентов усиления элементов системы, обеспечивающих требуемую точность поддержания критерия управления. В зависимости от требований механизмов работа электроприводов может протекать либо преимущественно в переходных режимах пуска, реверса, торможения, либо в режимах поддержания заданной скорости двигателя. Выбор вида и параметров ОС для названных режимов производится по-разному. Поэтому для обеспечения заданной точности СЭП необходимый коэффициент усиления разомкнутого привода ( $K_{н.р.}$ ) рассчитывают по выражениям при заданных:

- скоростной погрешности  $K_{н.р.} = \Omega_0 / \delta_{ск}$  ;
- моментной погрешности  $K_{н.р.} = M_n / (\delta_m \cdot k_2 \cdot i^2)$  ;
- погрешности по ускорению  $K_{н.р.} = \varepsilon_0 / \delta_{ус}$  .

(7.6)

где  $k_2$  - коэффициент жесткости (демпфирования) механической характеристики.

Если задано несколько погрешностей и предусматриваются разные режимы работы СП, то значение  $K_{н.р.}$  рассчитывается для каждого из режимов и из полученных значений  $K_{н.р.}$  выбирают наибольший с учетом обеспечения соотношения  $K_p \geq K_{н.р.}$ . Если указанное соотношение не выполняется, то значение  $K_p$  можно увеличить в  $K_{н.р.}/K_p$  раз, за счет повышения коэффициента усиления  $K_i$  регулируемого усилителя в выражении (7.5).

При заданной относительной статической точности поддержания скорости двигателя  $\Delta\Omega\%$  необходимый коэффициент усиления разомкнутой системы определяют из соотношения:

$$K_{н.р.} = \frac{\Delta\Omega_p \% \cdot D}{\Delta\Omega\%} - 1, \quad (7.7)$$

где  $\Delta\Omega_p\%$  - относительное отклонение скорости в системе без обратных связей, определяемое по статической электромеханической характеристике ЭД постоянного тока:

$$\Omega = \frac{U_{ян} - I_{ян} R_{я}}{K\Phi_n}, \quad (7.8)$$

где  $K\Phi_n$  - параметр выбранного двигателя по каталогу или принимается из расчета:

$$K\Phi_n = \frac{U_{ян} - I_{ян} R_{я}}{\Omega_n}. \quad (7.9)$$

Здесь  $D$  - диапазон регулирования скорости;  $U_{ян.н.}$  - номинальное напряжение двигателя, В;  $I_{ян.н.}$  - номинальный ток двигателя, А;  $R_{я}$  - сопротивление якорной цепи, Ом;  $\Omega_n$  - номинальная угловая скорость двигателя,  $c^{-1}$ .

В настоящее время для анализа и синтеза электроприводных систем общего применения широко используют метод логарифмических амплитудно-фазовых частотных характеристик (ЛАФЧХ). К основным достоинствам метода можно отнести: возможность экспериментального определения ЛАФЧХ реальных объектов в процессе выполнения исследований СУ и производства наладочных работ СЭП и последующего синтеза систем управления электроприводами с наперед заданными техническими характеристиками. При анализе устойчивости нескор-

ректированной системы по ЛАФЧХ разомкнутой системы определяют две частоты:  $\omega_c$  - частоту среза [ $L(\omega)_c = 0$ ] и частоту  $\omega_p$  [ $\gamma(\omega_p) = -\pi$ ].

Для построения ЛАФЧХ исходного ЭП используют выражение (7.4) передаточной функции разомкнутой системы с заменой  $p=j\omega$ , что позволяет получить уравнение для частотной характеристики. Обычно для определения устойчивости замкнутой системы используют приближенную ЛАЧХ, представляющую собой асимптотическую ЛАЧХ разомкнутой системы, имеющую точки излома в сопрягающих частотах, определяемых постоянными временными  $T_i$  звеньев.

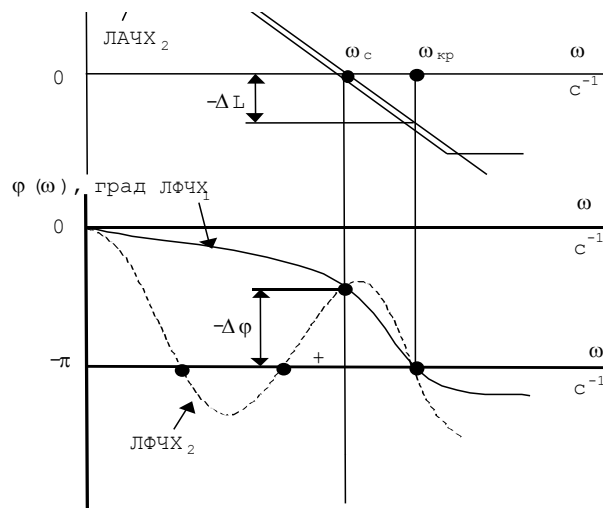


Рис. 7.8. Оценка устойчивости по ЛЧХ

Точка пересечения ЛАЧХ<sub>1</sub> с осью абсцисс при модуле амплитудно-фазовой характеристики равным единице определяет частоту среза  $\omega_c$  (рис. 7.8). Другой критической точкой является точка пересечения ЛФЧХ<sub>1</sub> с линией фазового сдвига равного  $-\pi$ , что соответствует  $\omega_{кр}$ . Известно [33-36], что оценку устойчивости САУ(САР) определяют по запасу устойчивости по амплитуде ( $-\Delta L$ ) и запасу устойчивости по фазе ( $-\Delta\varphi$ ). Для удовлетворительного качества регулирования ЭП должны выполняться следующие условия:  $\Delta L \geq (10-15)$  Дб;  $\Delta\varphi \geq (30-60)$  град. Если разомкнутая система устойчива (ЛАЧХ<sub>2</sub>), а ЛФЧХ<sub>2</sub> пересекает ли-

нию  $-\pi$  в нескольких точках, то замкнутая система будет устойчивой, когда  $L(\omega) < 0$  при  $\varphi = -\pi$ , для самой правой из точек пересечения. Если при анализе окажется, что  $\omega_c = \omega_{кр}$ , то рассматриваемая система находится на границе устойчивости.

#### 1.4. Построение логарифмических частотных характеристик располагаемой части следящего привода

При выполнении расчета СЭП часто пользуются амплитудно-частотной (ЛАЧХ) и фазочастотной (ЛФЧХ) характеристиками, построенными в логарифмическом масштабе.

Если известна амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы в виде:

$$W_p(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (7.10)$$

то, прологарифмировав эту функцию, получим

$$\ln W(j\omega) = \ln A(\omega) + \ln e^{j\varphi(\omega)} = \ln A(\omega) + j\varphi(\omega). \quad (7.11)$$

Член  $\ln A(\omega)$  уравнения (7.11) определяет логарифмическую амплитудно-частотную характеристику, а  $\varphi(\omega)$  - логарифмическую фазочастотную характеристику, если значение частоты  $\omega$  выражено в логарифмическом масштабе. Принято также амплитуду выражать в децибелах, откладывая на графике вместо  $\ln A$  пропорциональную ему величину в десятичных логарифмах:

$$G = 20 \lg A, \quad \text{дБ}, \quad (7.12)$$

а значение  $\omega$  заменяют величиной  $\lg \omega / \omega_1$ , где  $\omega_1$  обычно принимается равной единице или частоте собственных колебаний системы. При этом изменению частоты в 10 раз (или на одну декаду) будет соответствовать изменение логарифмической частоты на единицу. На логарифмической шкале частот частоте  $\omega_1$  соответствует  $\lg \omega_1 / \omega_1 = \lg 1 = 0$ .

Для построения ЛАЧХ системы необходимо:

- определить сопрягающие частоты отдельных звеньев структурной схемы, перевести их в декады и отметить на оси частот;
- провести низкочастотную часть асимптоты с наклоном  $(-20\gamma)$  дБ/дек (где  $\gamma$  - число интегрирующих звеньев) до пересечения оси ординат в точке  $20\lg K_p$  (где  $K_p$  - коэффициент усиления разомкнутой системы);
- в точках, соответствующих сопрягающим частотам, начиная с самой низкой, наклон ЛАЧХ изменить при дифференцирующем звене на 20 дБ/дек вверх (+1) или на 20 дБ/дек вниз (-1) при апериодическом звене или на 40 дБ/дек вниз (-2) в схеме с колебательным звеном.
- для колебательного звена с коэффициентом демпфирования, не удовлетворяющим соотношению  $0.38 \leq \xi \leq 0.7$ , кривая около сопрягающей частоты  $1/T_0$  строится по точкам в соответствии с выражением:

$$G(\omega) = -20 \lg \sqrt{(1 - T_0^2 \omega^2)^2 + (2\xi T_0 \omega)^2} \quad (7.13)$$

Для построения ЛФЧХ располагаемой части системы строятся типовые логарифмические ФЧХ каждого звена с началом координат в точках, соответствующих сопрягающим частотам данного звена, а затем производится их суммирование с учетом знака ординат. Построение ЛАЧХ разомкнутой системы рассмотрим для передаточной функции вида [14, 15, 35, 36]:

$$W_p(p) = \frac{K_p(1+T_1p)}{p(1+T_2p)(1+T_3p)}, \quad (7.14)$$

где  $K_p \approx 224$ ;  $T_1 = 0,02$  с;  $T_2 = 0,08$  с;  $T_3 = 0,42$  с.

Сопрягающие частоты находят в порядке их возрастания:

$$\omega_1 = 1/T_3 = 1/0,42 = 2,38 \text{ с}^{-1}; \quad \lg \omega_1 = 0,38 \text{ дек.}$$

$$\omega_2 = 1/T_2 = 1/0,08 = 12,5 \text{ с}^{-1}; \quad \lg \omega_2 = 1,1 \text{ дек.}$$

$$\omega_3 = 1/T_1 = 1/0,02 = 50 \text{ с}^{-1}; \quad \lg \omega_3 = 1,7 \text{ дек.}$$

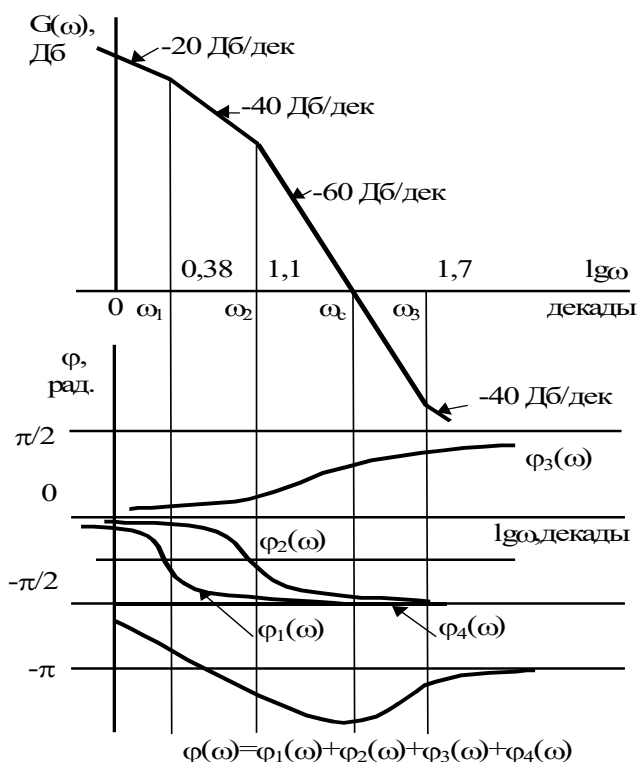


Рис. 7.9. Пример построения логарифмических характеристик

Значение  $G(\omega)$  составит  $20 \lg K_p = 20 \lg 224 = 47$  дб. Для частоты  $\omega = 1$  ( $\lg \omega = 0$ ) на оси ординат (рис. 7.9) откладывают значение  $G(\omega)$  и через точку проводят прямую с наклоном в  $-20$  дб/дек до пересечения с другой ординатой, проходящей через точку  $\lg \omega_1 = 0,38$  дек. В точке пересечения продолжение ЛАЧХ осуществляют с наклоном прямой  $-40$  дб/дек, а точке соответствующей  $\lg \omega_2 = 1,1$  дек - до  $-60$  дб/дек.

Ордината, проходящая через точку  $\lg \omega_3 = 1,7$  дек, при пересечении с линией ЛАЧХ дифференцирующего звена формирует в дальнейшем наклон до  $-40$  дб/дек.

По точкам пересечения ЛАЧХ разомкнутой системы с осью частот и ЛФЧХ с линией  $\varphi = -\pi$  можно определить степень устойчивости замкнутой системы.

### 1.5. Построение желаемой логарифмической амплитудной характеристики следящего привода

Построение желаемых логарифмических характеристик СЭП основывается на связи их параметров с показателями качества, которые необходимо обеспечить в функционирующем приводе за счет включения корректирующих звеньев. Для функционирования СЭП необходимо, чтобы замкнутая система была устойчивой, уровень ошибок по скорости и ускорению при отработке допустимых программных воздействий не превышал заданного; время переходного процесса  $t_{п.п}$  и величина перерегулирования  $\sigma$  соответствовали требуемым значениям технических характеристик СЭП. Обычно классификация типовых логарифмических частотных характеристик ведется по наклонам  $S$  и  $\gamma$ , что соответственно обозначается записью  $-S/\gamma$ . Так, для участка АВ, ВС ЛАЧХ (рис. 7.10) типовая характеристика запишется в виде  $3/2$ .

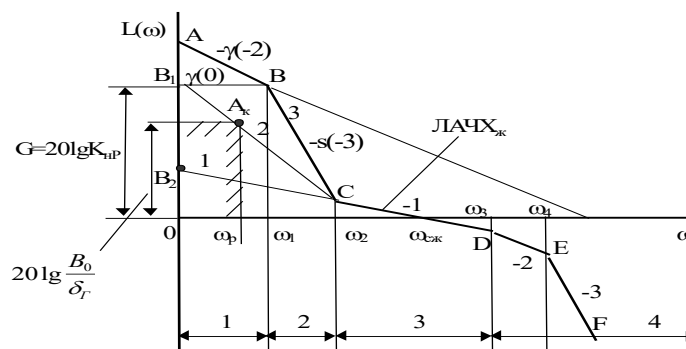


Рис 7.10. Построение желаемой ЛАЧХ разомкнутого привода

Желаемая ЛАЧХ(ЛАЧХ<sub>ж</sub>) разомкнутого привода имеет четыре характерные части, определяемые его динамические свойства:

1) область очень низких частот( $0, \omega_1$ ), характеризующая порядок астатизма системы по задающему воздействию. Наклон характеристики при этом определяется порядком астатизма  $\gamma$  и в системах с единичной обратной связью соответствует количеству последовательно включенных интегрирующих звеньев(рис.7.10).

Наклон ЛАЧХ<sub>ж</sub> при частотах  $\omega < \omega_1$  и степени астатизма привода  $\gamma=0$  соответствует нулю,  $-20$  дб/дек при  $\gamma=1$ . Для получения погреш-

ности СП, не превышающей допустимую, для астатических приводов ( $\gamma=1, \gamma=2$ ) положение низкочастотной асимптоты задают коэффициентом усиления разомкнутого привода  $K_{н.р}$  и проводят ее через точку с координатами  $(20 \lg K_{н.р}, \omega=1)$ .

При гармоническом управляющем сигнале ЛАЧХ<sub>ж</sub> строят таким образом, что низкочастотная асимптота на рабочей частоте  $\omega_p$  проходила не ниже контрольной точки  $A_k$  с амплитудой  $20 \lg \beta_0 / \delta_r$ , где  $\beta_0$  - амплитуда изменения входного сигнала при гармоническом воздействии;  $\delta_r$  - амплитуда гармонической составляющей ошибки (погрешности) на рабочей частоте  $\omega_p$ . Такое соотношение обусловлено тем, что обеспечить точность обработки входного гармонического сигнала с ошибкой не более  $\beta_0$  можно на частоте  $\omega_p$  при коэффициенте передачи системы  $[W(j\omega_p)] \geq \beta_0 / \delta_r$ . В этом случае ЛАЧХ<sub>ж</sub> разомкнутой системы не заходит в заштрихованную (запрещенную) область.

Для статических систем низкочастотная часть ЛАЧХ<sub>ж</sub> есть прямая, параллельная оси частот и проходящая от оси на расстоянии  $G=20 \lg K_{н.р.}$ , где  $K_{н.р}$  - необходимый статический коэффициент усиления разомкнутой системы, зависящий от заданной точности в установившемся режиме, приблизительно равной  $1/K_{н.р}$ . При проектировании СП обычно исходят из предельных заданных значений угловой скорости  $\Omega_{max}$  слежения и ускорения  $\varepsilon_{max}$  выходного вала. В этом случае эквивалентный гармонический сигнал задают параметрами, которые должны быть рассчитаны в соответствии с параметрами движения РО по соотношениям:

$$\omega_p = \varepsilon_{max} / \Omega_{max}, \quad \beta_0 = \Omega_{max} / \omega_p = \Omega_{max}^2 / \varepsilon_{max} \quad (7.15)$$

Значение частоты  $\omega_1$  можно определить из условия [36]:

$$\omega_1 = \varepsilon_{max} / (\delta_{max} \cdot K_{н.р.}) \quad (7.16)$$

где  $\delta_{\max}$  -точность отработки гармонического воздействия в системе.

Для линейно нарастающего входного воздействия ( $\varepsilon_{\max}=0, \omega_p \rightarrow 0$ )

значение  $\delta_{\max}$  можно определить приближенно как:

$$\delta_{\max} = \Omega_{\max} / K'_p, \quad (7.17)$$

где  $K'_p$  -минимальное значение коэффициента усиления по скорости разомкнутой системы [35]; обычно  $K_{н.р.} \leq K'_p \leq K_p$ .

2) область низких частот ( $\omega_1, \omega_2$ ). Наклон характеристики в этой области определяется количеством апериодических(или колебательных) звеньев с постоянной времени  $T_1=1/\omega_1$ . Названные две области частот определяют в основном точность воспроизведения медленно меняющихся воздействий и статическую точность СП.

3) вторая и третья сопрягающие частоты  $\omega_2$  и  $\omega_3$  определяют асимптоту СД среднечастотной части ЛАЧХ<sub>ж</sub> и находятся из условия обеспечения устойчивости замкнутой системы и желаемого качества переходного процесса. Установлено [3], что ЛАЧХ<sub>ж</sub> при частоте среза  $\omega_{с.ж.}$  должна иметь наклон -1(-20 дБ/дек), а значение частоты среза может быть определено по формуле:

$$\omega_{с.ж.} \geq \frac{b \cdot \pi}{t_{nn}}, \quad (7.18)$$

где  $b$  -коэффициент, определяемый по номограмме Солодовникова [2, 14, 33] и зависящий от перерегулирования  $\sigma$  (табл.7.1)

Таблица 7.1

Значения коэффициента  $b$  по заданной величине перерегулирования  $\sigma, \%$

Заданное значение перерегулирования $\sigma, \%$	5	0	5	0	0
Значение коэффициента $b$					

	,7	,2	,0		,3
--	----	----	----	--	----

Если значение перерегулирования не задано, то согласно [36] перерегулирование в системе не превзойдет 20-30%, если время переходного процесса ориентировочно оценено как:

$$t_{mn} = (1 \div 2) \frac{2\pi}{\omega_{сж}}, \quad (7.19)$$

где  $\omega_{сж}$  - частота среза желаемой системы.

Частоты излома  $\omega_2$  и  $\omega_3$  ЛАЧХ<sub>ж</sub> можно определить из следующих приближенных соотношений:

$$\omega_3 / \omega_2 \approx 10; \quad 2 < \omega_3 / \omega_{-c} < 4. \quad (7.20)$$

Рекомендуемые запасы устойчивости обеспечиваются при выполнении также требований, предъявляемых к протяженности  $h$  участка среднечастотной асимптоты ЛАЧХ<sub>ж</sub> при наклоне -20 дб/дек, определяемой как  $h = \omega_3 / \omega_2$ . Если задан показатель колебательности  $M$ , то протяженность  $h$  ограничивается интервалом:

$$20 \lg \frac{M}{M-1} \geq L|W(j\omega)| \geq 20 \lg \frac{M}{M+1}. \quad (7.21)$$

Сопряжение среднечастотной асимптоты СД желаемой характеристики с асимптотами АВ и EF характеристики неизменяемой части привода осуществляется с помощью асимптот ВС и DE. На рис. 7.10 приведены типовые характеристики, различающиеся наклонами асимптот сопряжения ВС и определяющие тип среднечастотной ЛАЧХ: ЛАЧХ-1 (наклон асимптоты В<sub>2</sub>С равен -1(-20 дб/дек)); ЛАЧХ-2(-40 дб/дек); ЛАЧХ-3 (-60 дб/дек).

ЛАЧХ-1 обеспечивает высокое быстродействие при низкой добротности по скорости. Увеличение добротности(коэффициента усиления) изменяет тип характеристики и обеспечивает более точную отра-

ботку управляющего сигнала при той же частоте среза  $\omega_{с.ж.}$ , что подтверждается характеристиками ЛАЧХ-2 и ЛАЧХ-3. Увеличение добротности СП не оказывает влияния на полосу пропускания и происходит за счет смещения частоты сопряжения  $\omega_1$  влево. Однако с расширением частотного диапазона асимптоты сопряжения ВС с  $\omega_1$  до  $\omega_2$  повышается колебательность привода.

4) область высоких частот ( $\omega_3, \infty$ ). Поведение ЛАЧХ<sub>ж</sub> за частотой  $\omega_3$  не влияет на точность обработки и устойчивость, однако, с целью подавления высокочастотных помех и обеспечения физической реализуемости передаточных функций корректирующих устройств целесообразно обеспечить резкое снижение коэффициента усиления системы на высоких частотах.

Таким образом, задача построения ЛАЧХ<sub>ж</sub> сводится к выбору типа среднечастотной части ЛАЧХ, привязке ее к оси частот по требуемым показателям качества и сопряжению с ней асимптот ЛАЧХ неизменяемой (располагаемой) части привода на низкой и высокой частотах.

### 1.6 Определение типа и параметров последовательного корректирующего устройства

Устройства, вводимые специально в контур регулирования для обеспечения требуемых динамических свойств СЭП, называют корректирующими устройствами (КУ). Широкое применение нашли разные методы коррекции: вязкое демпфирование, уменьшение нелинейности СЭП, изменение частотных характеристик СЭП. Для первого метода коррекции характерно введение в СЭП дополнительного момента вязкого трения, формируемого на валу двигателей специальными устройствами-демпферами (воздушными или электромагнитными). Основой

второго метода является уменьшение нелинейности СЭП, связанной с наличием зазоров, момента трения в исполнительном механизме(ИМ), путем использования вибрации с большой частотой и малой амплитудой.

Коррекция приводов изменением частотных характеристик наиболее приемлема для СЭП. При этом методе сигнал управления содержит и погрешности сигналов, пропорциональных производным и интегралам от погрешности и возмущающих воздействий. Место включения КУ определяют в зависимости от формируемого закона управления. По этому признаку КУ подразделяют на последовательные, параллельные и корректирующие обратные связи(ОС), линейные и нелинейные. По виду частотных характеристик КУ делят на дифференцирующие, интегрирующие и интегродифференцирующие.

Если передаточную функцию, соответствующую желаемым характеристикам разомкнутой системы управления, обозначать  $W_{ж}(p)$ , передаточную функцию нескорректированной исходной части(располагаемой)  $-W_n(p)$ , а регулятора последовательного типа -

→  
 $W_p(p)$ , то можно записать уравнение:

$$W_{ж}(p) = W_p(p) \cdot W_n(p) \quad W_p(p) = W_{ж}(p) / W_n(p) \quad (7.22)$$

или, переходя к ЛАХ, можно получить:

$$Lm[W_p(j\omega)] = Lm[W_{ж}(j\omega)] - Lm[W_n(j\omega)] \quad (7.23)$$

На основании (7.23) можно констатировать, что логарифмическая амплитудная характеристика(ЛАХ) регулятора может быть получена путем вычитания ЛАХ располагаемой части из ЛАХ желаемой. На основании вида  $Lm[W_p(j\omega)]$  выбирают тип и параметры регулятора. Однако при построении ЛАХ<sub>ж</sub> следует учитывать исходные данные на

проектирование СЭП. При единичном возмущении, если заданы показатели качества переходного процесса (время переходного процесса  $t_{п.п}$ , перерегулирование  $\sigma$ ) построение ЛАЧХ<sub>ж</sub> осуществляется в следующем порядке:

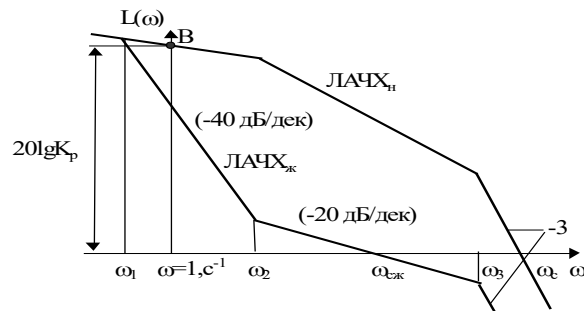


Рис. 7.11. Построение ЛАЧХ<sub>ж</sub> при единичном возмущении

1. На оси ординат ( $L(\omega)$ ) определяют точку В с координатами  $20\lg K_p$  и  $\omega=1, c^{-1}$ . Перемещают ЛАЧХ<sub>н</sub> неизменяемой части по оси ординат до прохождения ее через точку В (рис. 7.11).
2. Выбирают тип среднечастотной части желаемой ЛАЧХ<sub>ж</sub>.
3. По заданным значениям  $t_{п.п}$  и  $\sigma$  определяют частоту среза  $\omega_{сж}$  ЛАЧХ<sub>ж</sub>. Значение коэффициента  $b$  определяют по номограмме Солодовникова или табл.7.1.
4. Определяют частоты сопряжения  $\omega_2$  и  $\omega_3$ . Через точку  $\omega_{сж}$  проводят асимптоту с наклоном  $-20\text{дб/дек}$  в частотном диапазоне  $\omega_2 - \omega_3$ .
5. Построение высокочастотной части ЛАЧХ<sub>ж</sub> осуществляют в дальнейшем по аналогии с высокочастотной частью ЛАЧХ<sub>н</sub> неизменяемой части СЭП.
6. Для сопряжения среднечастотной асимптоты ЛАЧХ<sub>ж</sub> с высокочастотной асимптотой из точки с ординатой, соответствующей частоте  $\omega_3$ , проводят прямую с наклоном  $-40\text{ дб/дек}$  до пересечения с ЛАЧХ<sub>н</sub>.
7. Сопряжение среднечастотной части асимптоты с низкочастотной ЛАЧХ<sub>ж</sub> выполняют построением прямой с наклоном  $-20$ ,  $-40$  или  $-$

60 дБ/дек, выходящей из точки с ординатой на частоте  $\omega_2$  в соответствии с выбранным типом ЛАЧХ<sub>ж</sub>, и продолжают ее до пересечения с низкочастотной асимптотой при частоте  $\omega_1$ .

8. В соответствии с ЛАЧХ<sub>ж</sub> затем строят желаемую ЛФЧХ<sub>ж</sub>.

9. По построенным ЛАЧХ<sub>ж</sub> и ЛФЧХ<sub>ж</sub> определяют запасы устойчивости СЭП.

При заданных гармоническом законе движения управляющего вала и частотных показателях качества желаемую ЛАЧХ<sub>ж</sub> строят в несколько ином порядке.

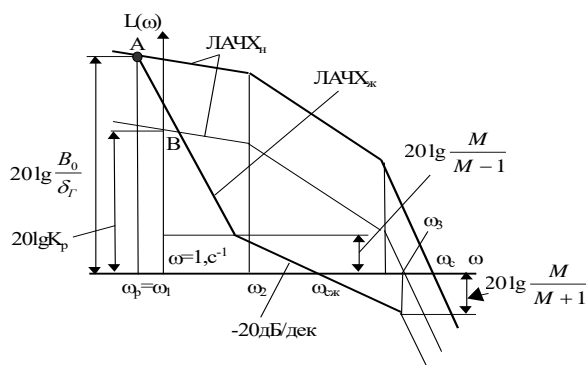


Рис. 7.12. Построение ЛАЧХ<sub>ж</sub> при гармоническом воздействии

1. Выбирают тип ЛАЧХ<sub>ж</sub>.
2. Низкочастотную асимптоту сопряжения ЛАЧХ<sub>ж</sub> проводят через рабочую точку А (рис. 7.12) с координатами  $\omega_p$  и  $20 \lg(\beta_0/\delta_r)$ , где  $\beta_0 = \Omega_n/\omega_p$ ,  $\omega_p = \varepsilon_n/\Omega_n$ ,  $\omega_p$  - рабочая частота изменения сигнала.
3. Если задано значение показателя колебательности  $M$ , то определяют границы среднечастотной асимптоты ЛАЧХ<sub>ж</sub>.
4. Определяют частоты сопряжения  $\omega_2$  по пересечению среднечастотной асимптоты (с наклоном -20дб/дек) или линии сопряжения ЛАЧХ<sub>ж</sub> с верхней границей зоны (т. А),  $\omega_3$  - с нижней границей зоны.

5. Перемещают ЛАЧХ неизменяемой части СЭП по оси ординат до сопряжения с типовой ЛАЧХ<sub>ж</sub> в точке, соответствующей частоте  $\omega_1$  и не ниже рабочей точки А. Последнее условие вытекает из необходимости обеспечения требуемой точности воспроизведения гармонического сигнала.

6. Для простоты технической реализации КУ за высокочастотную асимптоту ЛАЧХ<sub>ж</sub> принимают высокочастотную асимптоту ЛАЧХ неизменяемой части СЭП.

7. Строят ЛФЧХ<sub>ж</sub> привода и определяют запасы устойчивости.

Расчет номиналов RC-элементов реализуемого КУ производят исходя из вида полученной ЛАЧХ КУ, определения передаточной функции корректирующего контура в соответствии с рекомендациями по применению заранее известных контуров пассивного или активного типа на базе операционных усилителей(ОУ).

В дальнейшем спроектированный СЭП, кроме свойств устойчивости, должен быть проверен на соответствие и частотным показателям качества. Если в задании на проектирование нет особых указаний, то качество СЭП следует определить по виду переходного процесса, возникающего в системе при отработке возмущения по входу и нагрузке. Расчет переходных процессов производят с использованием программного пакета MathCAD (см. прил.1).

## 2. Электромеханический модуль с обратными связями

В мехатронных системах широкое распространение находят ЭММ постоянного тока, обеспечивающие регулирование скорости, ее стабилизацию в статических и динамических режимах. Функциональная схема такого ЭММ приведена на рис. 7.13.

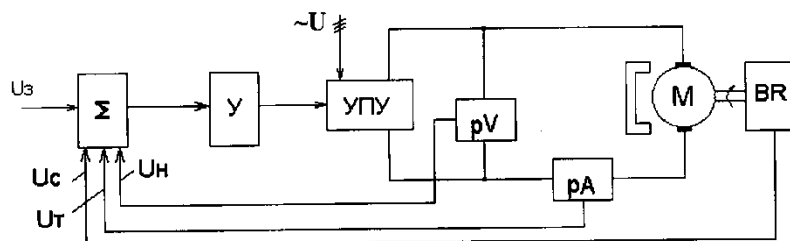


Рис. 7.13. Функциональная схема ЭММ постоянного тока стабилизации скорости:

$\Sigma$  - сумматор ; М – двигатель постоянного тока (ДПТ); У – промежуточный усилитель; УПУ – усилительно-преобразовательное устройство (силовой преобразователь); датчики обратной связи: pV – по напряжению на якоре; pA – по току якоря; BR – по скорости

Для получения расчетного диапазона регулирования скорости необходимо повышать жесткость механических характеристик и вводить в систему электропривода отрицательную обратную связь по скорости. Наличие главной обратной связи по скорости является наиболее характерной чертой ЭММ с большим диапазоном регулирования скорости.

Для стабилизации скорости ИД используются отрицательные обратные связи по скорости, напряжению и положительная связь по току. Развиваемый момент на валу ИД можно регулировать током якоря и формировать силовое воздействие на МС. Обратная связь по скорости определяет точность регулируемого ЭММ, а обратная связь по току – его быстродействие. В сумматоре  $\Sigma$  осуществляется алгебраическое суммирование задающего сигнала  $U_3$  и сигналов обратной связи по току  $U_T$ , скорости  $U_c$  и напряжению  $U_n$ .

Указанная схема позволяет формировать в целом систему для любой обратной связи отдельно, без учета других связей. На рис. 7.14 приведена структурная схема регулируемого ЭММ с обратной связью по скорости.

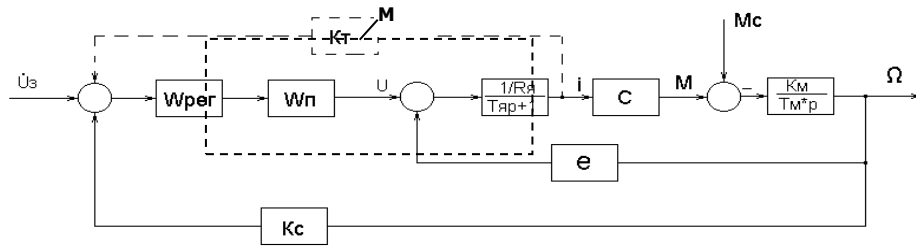


Рис. 7.14. Структурная схема регулируемого ЭММ с обратной связью по скорости (ОС по току показана пунктиром)

Скорость двигателя  $M$  зависит от напряжения якоря и момента статического нагружения  $M_c$

$$\Omega(p) = W_1 U(p) - W_2 M_c(p), \quad (7.24)$$

где  $W_1$  – передаточные функции по управляющему воздействию и  $W_2$  – по возмущению.

Для разомкнутой цепи ОС по скорости

$$\Omega(p) = W_{пер} W_n W_1 [U_3(p) - U_{oc}(p)] - W_2 M_c(p), \quad (7.25)$$

где  $W_{пер}$ ,  $W_n$  – передаточные функции регулятора скорости и преобразователя соответственно, а  $U_{oc}(p)$  – напряжение ОС по скорости двигателя равно:

$$U_{oc}(p) = W_{oc}(p) \Omega(p). \quad (7.26)$$

Подставив значение (7.26) в выражение (7.25) и решив его относительно  $\Omega(p)$ , получим

$$\Omega(p) = \frac{W_{пер} \cdot W_n \cdot W_1 \cdot U_3(p)}{1 + W_{пер} \cdot W_n \cdot W_1 \cdot W_{oc}} - \frac{W_2 \cdot M_c(p)}{1 + W_{пер} \cdot W_n \cdot W_1 \cdot W_{oc}}. \quad (7.27)$$

Выражение (7.27) может быть конкретизировано согласно передаточным функциям элементов электропривода. Для случая пропорционального регулятора с передаточной функцией  $W_{пер} = K_y$ , где  $K_y$  – коэффициент усиления усилителя и передаточные функции остальных элементов электропривода:

силовой преобразователь

$$W_n = \frac{U_{\text{я}}(p)}{U_{\text{з}}(p) - U_{\text{ос}}(p)} = \frac{k_n}{T_n p + 1}; \quad (7.28)$$

передаточная функция электродвигателя по управляющему воздействию:

$$W_1 = \frac{\Omega(p)}{U_{\text{я}}(p)} = \frac{k_{\partial}}{T_m T_{\text{я}} p^2 + T_m p + 1}; \quad (7.29)$$

передаточная функция электропривода по возмущению:

$$W_2 = \frac{\Omega(p)}{M_c(p)} = \frac{k_m (1 + T_{\text{я}} p)}{T_m T_{\text{я}} p^2 + T_m p + 1}, \quad (7.30)$$

Здесь  $k_{\partial}$  - коэффициент передачи ДПТ по скорости,  $k_{\partial} = 1/C_e$ ,  $C_e$  - постоянная ДПТ, связывающая противо-ЭДС с угловой скоростью, т. е.  $E = C_e \Omega$ ;  $k_m$  - коэффициент передачи ДПТ по моменту,  $k_m = 1/C_m$ ,  $C_m = M_{\text{ном}}/I_{\text{я}}$ .

Передаточная функция цепи обратной связи по скорости запишется в виде:

$$W_{\text{ос}} = U_{\text{ос}}(p)/\Omega(p) = k_{\text{тг}}; \quad (7.31)$$

Тогда выражение (7.27) после подстановки приведенных передаточных функций можно представить:

$$\Omega(p) = \frac{K_y K_n K_{\partial} U_{\text{з}}(p)}{A(p)} - \frac{K_m (1 + T_{\text{я}} p)(1 + T_n p)}{A(p)} \cdot M_c(p), \quad (7.32)$$

где  $A(p) = (1 + T_n p)(T_m T_{\text{я}} p^2 + T_m p + 1) + K_p$  - характеристическое уравнение системы электропривода;  $K_p = k_y k_n k_{\partial} k_{\text{тг}}$  - коэффициент усиления разомкнутой системы.

**УРАВНЕНИЕ (7.32) ДЛЯ СТАТИЧЕСКОГО РЕЖИМА (P=0) МОЖНО ЗАПИСАТЬ В ВИДЕ:**

$$\Omega = \frac{k_y k_n k_{\partial}}{1 + K_p} U_{\text{з}} - \frac{k_m M_c}{1 + K_p}. \quad (7.33)$$

На основании значительного влияния коэффициента усиления разомкнутой системы  $K_p$  на статизм системы, значение последнего можно представить как

$$S = \Delta\Omega/\Omega_0 = k_M M_{ном} / [\Omega_0(1 + K_p)] \quad (7.34)$$

Известно также, что диапазон регулирования скорости замкнутой системы расширяется пропорционально значению  $1 + K_p$ . Следовательно, уменьшение статизма и увеличение диапазона регулирования (Д) можно ожидать при увеличении коэффициента разомкнутой системы  $K_p$  за счет повышения  $k_y$  регулятора без потери устойчивости приводной системы.

Характеристическое уравнение замкнутой системы привода  $A(p)$  в (7.32) в разомкнутом виде можно представить выражением:

$$A(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0, \quad (7.35)$$

где  $a_3 = T_M T_\pi T_n$ ;  $a_2 = T_M(T_\pi + T_n)$ ;  $a_1 = T_M + T_n$ ;  $a_0 = 1 + K_p = K_0$ .

Используя алгебраический критерий Гурвица, можно определить устойчивость системы по последнему определителю

$$\Delta_3 = \det \begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix} = a_0 \det \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_0 \Delta_2 \quad (7.36)$$

Так как  $a_0 > 0$ , необходимо исследовать знак предпоследнего определителя

$$\Delta_2 = \det \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_2 a_1 - a_3 a_0 \quad (7.37)$$

Подставив значения коэффициентов, можно получить условие устойчивости привода:

$$\Delta_2 = T_M(T_\pi + T_n)(T_M + T_n) - K_0 T_M T_\pi T_n > 0, \quad (7.38)$$

откуда  $K_p < \frac{T_M}{T_n} + \frac{T_M}{T_\pi} + \frac{T_n}{T_\pi}$ .

*Для сохранения запаса устойчивости и надежности работы ЭММ расчетные значения коэффициента  $K_p$  при проектировании уменьшают на 1 - 1,5%.*

## 2.2. Статический расчет ЭММ

Структурная схема ЭММ с суммирующим усилителем при условном действии всех обратных связей приведена на рис. 7.15. Электромеханическая характеристика стабилизации скорости для рассматриваемой схемы рассчитывается по уравнению, записанному условно при действии всех обратных связей в виде:

$$\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega = \frac{U_3 k_y k_n k_d}{1 + (k_c k_d + k_\varepsilon + k_n) k_y k_n} - \frac{I R_\varepsilon k_d (1 + k_n R_\varepsilon - k_m) \frac{k_y k_n}{R_\varepsilon}}{1 + (k_c k_d + k_\varepsilon + k_n) k_y k_n}, \quad (7.39)$$

где  $U_3$  – напряжение сигнала задания скорости;  $k_y$ ,  $k_n$ ,  $k_d$  – коэффициенты передачи усилителя, преобразователя и двигателя;  $k_c$ ,  $k_\varepsilon$ ,  $k_n$ ,  $k_m$  – коэффициенты передачи датчиков скорости, ЭДС напряжения и тока двигателя;  $R_\varepsilon$ ,  $R_\varepsilon$  – сопротивление цепи «преобразователь – двигатель» и цепи якоря двигателя;  $E_n$ ,  $E_d$  – ЭДС преобразователя и двигателя.

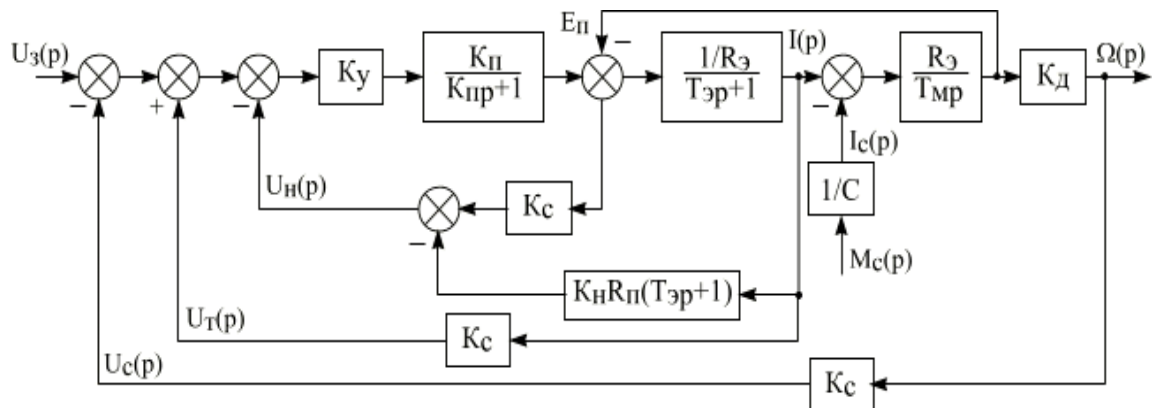


Рис. 7.15. Структурная схема ЭММ с суммирующим усилителем

Из уравнения (7.39) электромеханической характеристики общего вида можно получить уравнение при действии конкретной обратной связи, приняв равным нулю коэффициенты других связей.

Выбор обратной связи или комбинации некоторых следует производить на основе следующих принципов. Обратная связь по скорости является главной связью по регулируемой координате и обеспечивает наиболее высокую точность стабилизации скорости при наличии тахогенератора. Обратная связь по напряжению обеспечивает невысокую стабилизацию напряжения питания двигателя, компенсируя падение напряжения в силовой цепи преобразователя. Поэтому такая обратная связь может использоваться при малых диапазонах регулирования, определяемых допустимым статизмом электромеханической характеристики.

Положительная ОС по току способна обеспечить высокую точность стабилизации скорости, но расчетная точность находится в зависимости от нелинейной характеристики управления преобразователя.

Отрицательная ОС по ЭДС применяется при небольших диапазонах регулирования скорости и не обеспечивает ожидаемую точность регулирования.

Заданная погрешность системы электропривода определяет значение коэффициентов обратных связей, усилителя и преобразователя. В системе с отрицательной обратной связью по скорости произведение искоемых коэффициентов усиления, передачи можно получить из уравнения:

$$k_{с}k_{у}k_{п} = \frac{1}{k_{\partial}} \left( \frac{\Delta\Omega_{р}}{\Delta\Omega_{з}} - 1 \right) = \frac{1}{k_{\partial}} \left( \frac{Sp}{Sз} D - 1 \right) \quad (7.40)$$

Для системы с отрицательной ОС по напряжению искоемое произведение коэффициентов находят из выражения:

$$k_{нк}k_{у}k_{п} = \frac{\Delta\Omega_p - \Delta\Omega_3}{\Delta\Omega_3 - \Delta\Omega_e} = \frac{\frac{S_p}{S_3} D - 1}{1 - \frac{S_c}{S_3} D}, \quad (7.41)$$

а с положительной обратной связью по току так:

$$k_{мк}k_{у}k_{п} = R(\Delta\Omega_p - \Delta\Omega_3) = R\left(1 - \frac{S_3}{S_p} \cdot \frac{1}{D}\right), \quad (7.42)$$

где  $\Delta\Omega_p = IR_{э}k_d$  – погрешность в разомкнутой системе;  $\Delta\Omega_3$  – заданная погрешность в замкнутой системе;  $\Delta\Omega_e = IR_{я}k_d$  – погрешность естественной характеристики двигателя;  $S_3$  – заданный статизм замкнутой системы;  $S_p$  – статизм разомкнутой системы;  $S_e$  – статизм естественной характеристики;  $D$  – расчетный диапазон регулирования скорости.

Стабилизация момента ДПТ осуществляется с помощью отрицательной обратной связи по току, обеспечивающей резкое снижение скорости двигателя при приблизительно постоянном моменте. Связь используется с отсечкой (рис. 7.16), исключающей действие связи за счет характеристик стабилитронов VD1, VD2 при низких нагрузках. Введение связей по току обусловлено необходимостью защиты двигателя от недопустимых перегрузок в статических и динамических режимах.

В режиме стабилизации момента отрицательные обратные связи по току, скорости и напряжению, осуществляющие стабилизацию скорости, действуют совместно. Связь по току снижает скорость и ЭДС преобразователя, а связь по скорости их повышает. Поэтому связь по скорости целесообразно отключить при стабилизации момента за счет отсечки. Отсечка реализуется обычно за счет ограничения выходного напряжения промежуточного усилителя, задающего напряжение для контура стабилизации момента.

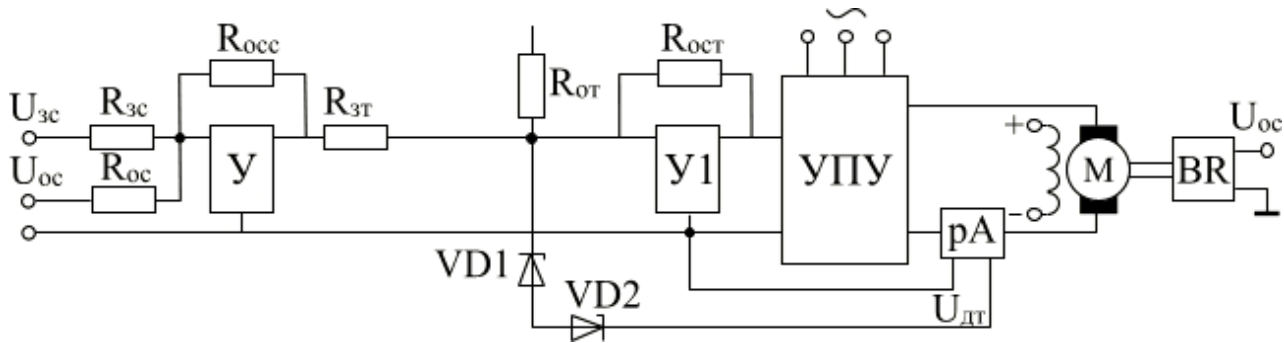


Рис. 7.16. Функциональная схема с отсечкой по току

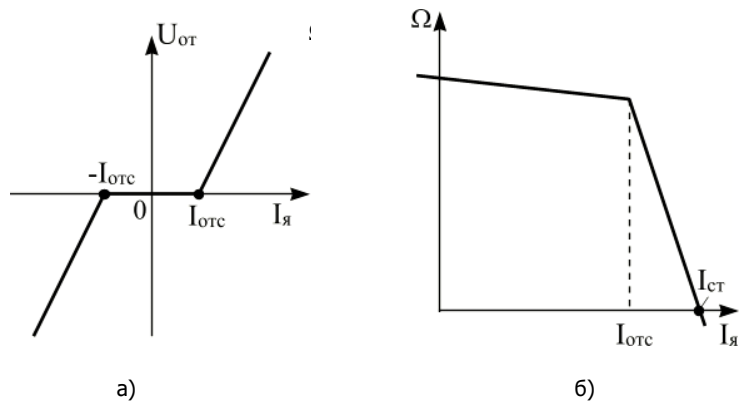


Рис. 7.17. Формирование токовой отсечки (а) и механической характеристики двигателя с токовой отсечкой (б)

Задержка включения отрицательной ОС по току формируется за счет срабатывания стабилитронов VD1, VD2 на входе усилителя У1. Напряжение токов связи  $U_{об}$  на входе усилителя определяется различно для различных участков изменения тока

$$U_{от} = U_{дт} - U_{от} = k_{дт} I_{я} - U_{от} = k_{рт}(I_{я} - I_{отс}), \quad (7.43)$$

где  $k_{дт}$  - передаточный коэффициент датчика тока,  $U_{от}$  - напряжение отсечки по току, равное напряжению стабилитронов VD1, VD2;  $I_{отс} = U_{от} / k_{дт}$  - ток отсечки.

Характеристики токовой отсечки и механической двигателя с отсечкой по току приведены на рис. 7.17. Для определения коэффициентов усиления по замкнутому контуру тока и обратной связи при токах

отсечки  $I_{отс}$  и стопорения  $I_{ст}$  значение тока стопорения  $I_{ст}$  следует принять при  $\Omega = 0$ . В режиме стопорения для рассматриваемой системы можно записать, что при  $\Omega = 0$ ,  $I_{я} = I_{ст}$  и  $E_{ст} = I_{ст}R_{э} = k_{п}k_{у}[U_{эТ} - k_{дТ}(I_{ст} - I_{отс})]$ , где  $E_{ст}$  – ЭДС преобразователя в режиме стопорения. При анализе полученного выражения коэффициент усиления по замкнутому контуру тока составит:

$$k_{т} = k_{у}k_{п} \cdot \frac{k_{дТ}}{R_{э}} = \frac{I_{кз} - I_{ст}}{I_{ст} - I_{отс}}, \quad (7.44)$$

где  $I_{кз} = k_{у}k_{п} \frac{U_{эТ}}{R_{э}}$  - расчетный ток короткого замыкания.

При расчете параметров элементов отрицательной ОС по току коэффициенты усиления усилителя  $У1$  по задающему воздействию выбираются произвольно.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.1.3. ПАКЕТ SIMULINK – ВИЗУАЛЬНАЯ СРЕДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ**

### **ВОПРОСЫ**

1. Библиотеки пакета Simulink.
2. Библиотека маршрутизации сигналов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### **1. Библиотеки пакета Simulink**

#### **1. Sources- источники сигналов**

Предварительно рассмотрим блоки источников и приемников сигналов, т. к. они используются во всех примерах, демонстрирующих функционирование различных моделей. Окно обозревателя разделов библиотеки Simulink рассмотрено ранее (рис. 2.2)

Библиотека источников сигналов показана на рис. 2.8.

Вся библиотека разбита на два раздела:

- ◆ Входные порты модели и подсистемы (ModelandSubsystemInputs).
- ◆ Генераторы сигналов (Signal Generators).

Входные порты модели и подсистемы содержат четыре блока.

- 1) *In*— блок входного порта. Создает входной порт для подсистемы или модели верхнего уровня иерархии. В полях окна настройки параметров задаются номер порта (Portnumber), размерность входного сигнала (Portdimensions, шаг модельного времени и тип данных входного сигнала (Datatype):
- 2) *Ground*- блок сигнала нулевого уровня. Предназначен для формирования сигнала нулевого уровня. Если какой-либо вход блока в модели не подсоединен, то при выполнении моделирования в главном окне MATLAB появляется предупреждающее сообще-

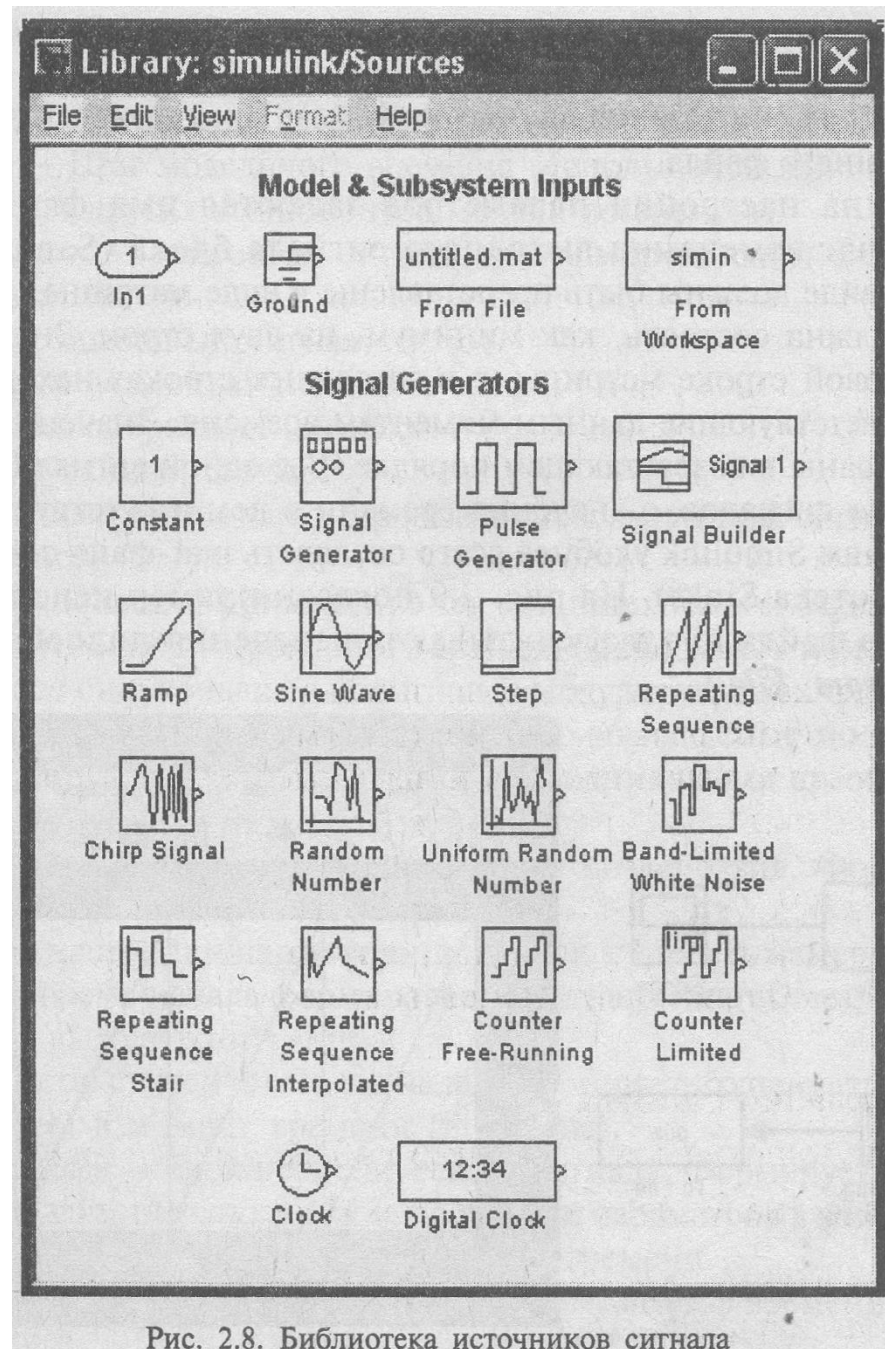


Рис. 2.8. Библиотека источников сигнала

ние. Для устранения этого на неподключенный вход блока можно подать сигнал с блока Ground.

3) *FromFile*— блок считывания данных из файла. Предназначен для считывания данных из внешнего файла. В полях окна настройки параметров задаются имя файла с данными (FileName), шаг изменения выходного сигнала блока (Samptime).

Данные в файле должны быть представлены в виде матрицы.

Матрица должна состоять, как минимум, из двух строк. Значения времени записаны в первой строке матрицы, а в остальных строках находятся значения сигналов, соответствующие данным моментам времени. Значения времени должны быть записаны в возрастающем порядке. Выходной сигнал блока содержит только значения сигналов, а значения времени в нем отсутствуют.

- 4) пользователям Simulink удобнее всего создавать mat-файл с помощью блока To File (библиотека Sinks). На рис. 2.9 показан пример использования данного блока. Из файла pila.mat считываются значения пилообразного сигнала (*файл To\_From\_File*).

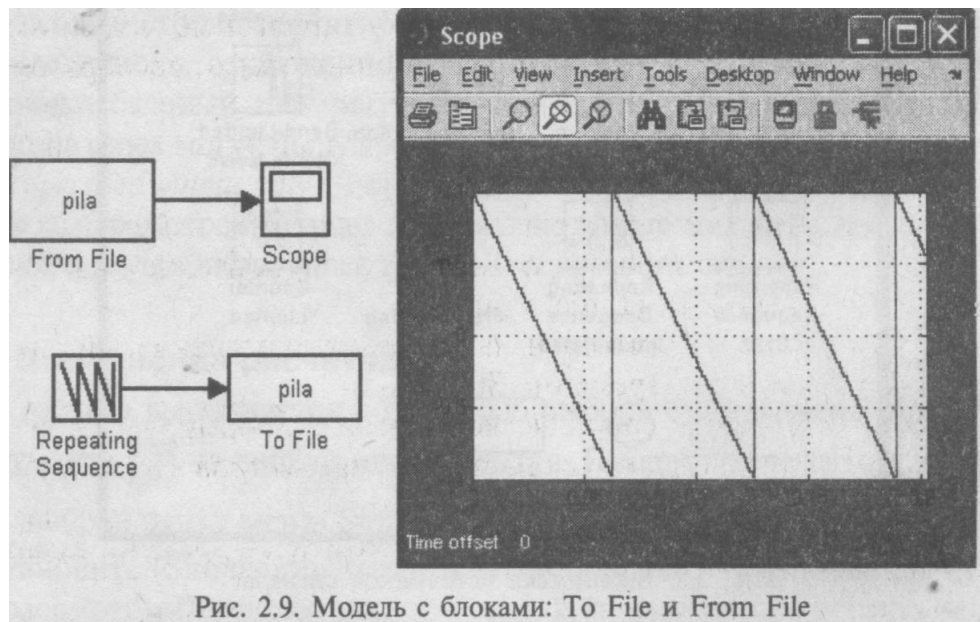


Рис. 2.9. Модель с блоками: To File и From File

*FromWorkspace* — блок считывания данных из рабочего пространства MATLAB.

Генераторы сигналов содержат большое количество блоков. Ниже описаны некоторые из них, предназначенные для моделирования мехатронных систем.

*Constant*— задает постоянный по уровню сигнал.

Значение константы может быть действительным или комплексным числом, вычисляемым выражением, вектором или матрицей.

*SineWave*— формирует синусоидальный сигнал с заданной частотой, амплитудой, фазой и смещением нулевого уровня.

При формировании выходного сигнала по текущему значению времени выходной сигнал определяется по выражению:

$$y = \text{Amplitude} * \sin(\text{frequency} * \text{time} + \text{phase}) + \text{bias}.$$

*Amplitude* — Амплитуда.

*Bias*— Постоянная составляющая сигнала.

*Frequency(rads/sec)*— Частота (рад/с).

*Phase (rads)* — Начальная фаза (рад).

*Sampletime*— Шаг модельного времени. Используется для согласования работы источника и других компонентов модели во времени.

*SignalGenerator*— генератор сигналов. Формирует один из четырех видов периодических сигналов:

- *sine*— Синусоидальный сигнал.
- *square*— Прямоугольный сигнал.
- *sawtooth*— Пилообразный сигнал.
- *random*— Случайный сигнал.

В полях окна настройки параметров задаются амплитуда сигнала (*Amplitude*), частота (*Frequency*).

На рис. 2.10. показано применение блоков *SineWave* и *SignalGenerator* для получения широтно-модулированного сигнала (**файл *Mod\_PWM***). Здесь модулирующим является синусоидальный сигнал, а модулируемым - сигнал пилообразный с выхода блока *SignalGenerator*. Широтно-импульсные модуляторы повсеместно используются для управления полупроводниковыми преобразователями в мехатронных системах.

- *Ramp*- источник линейно изменяющегося воздействия. Формирует линейный сигнал вида  $y = \text{Slope} * \text{time} + \text{Initialvalue}$ .

В полях окна настройки параметров задаются скорость изменения выходного сигнала (Slope), время начала формирования сигнала (Starttime), начальный уровень сигнала на выходе блока (Initialvalue)..

- *Step*— генератор ступенчатого сигнала. Формирует ступенчатый сигнал величины (Finalvalue) в момент времени (Steptime).

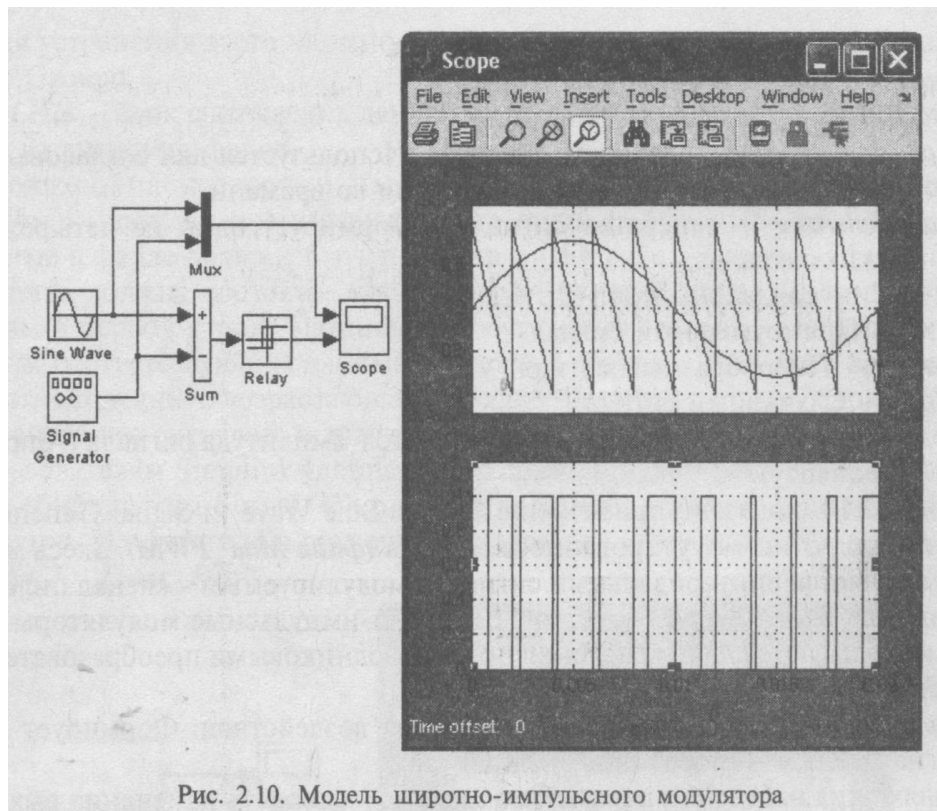


Рис. 2.10. Модель широтно-импульсного модулятора

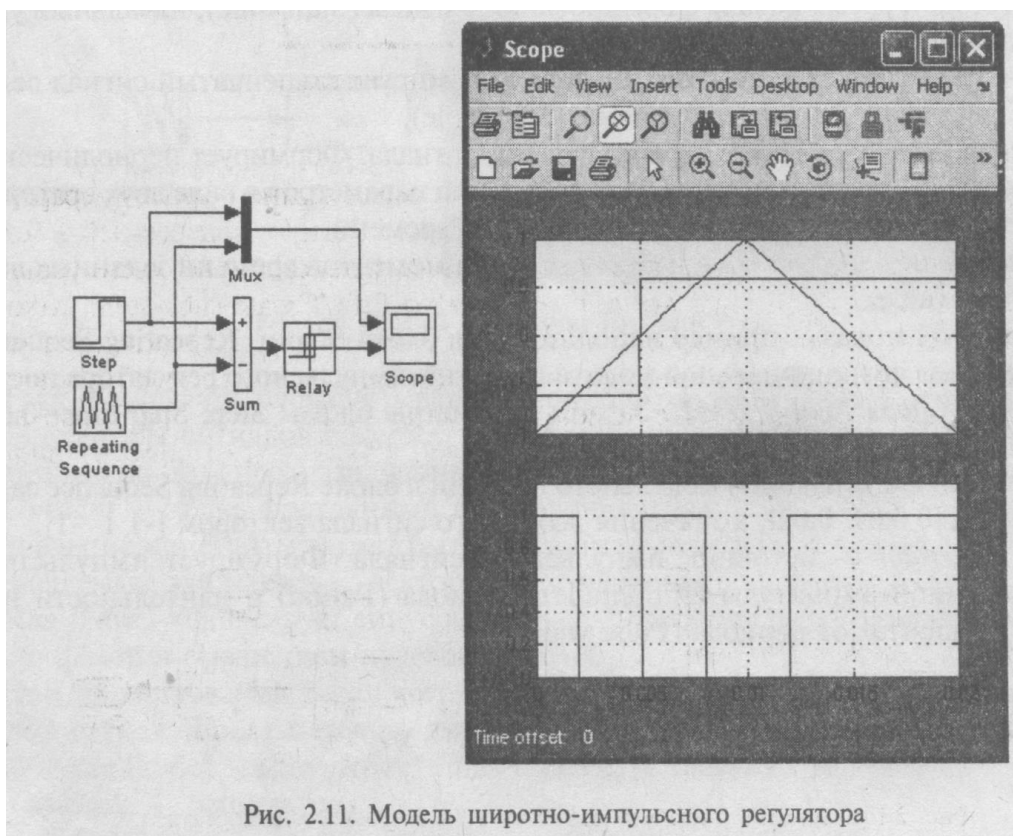


Рис. 2.11. Модель широтно-импульсного регулятора

- *RepeatingSequence*—блок периодического сигнала. Формирует периодический сигнал, который задается в полях окна настройки параметров в виде двух векторов:
- *Timevalues*— вектор значений модельного времени.
- *Outputvalues*— вектор значений сигнала для моментов времени заданных вектором *Timevalues*.

На рис. 2.11 показан пример использования блока *Step* и *RepeatingSequence* для построения функциональной модели широтно-импульсного регулятора постоянного тока (**файл *Mod\_PWMI***). Заданы параметры блока *Step*: *Step time*=0.005 (с), *Initial value*=-0.6 *Final value*=0.6. Значения модельного времени в блоке *RepeatingSequence* заданы вектором [0 0.01 0.02], а значения выходного сигнала вектором [-1 1 -1].

- *PulseGenerator*— источник импульсного сигнала. Формирует импульсный сигнал заданной амплитуды (*Amplitude*), периода (*Period*) и длительности импульса в процентах от периода (*Pulsewidth*).

## 2. Sinks- приемники сигналов

Библиотека блоков показана на рис.2.12. Вся библиотека разбита на три раздела.

1. Блоки выходов моделей и подсистем (Modele&SubsystemOutputs).

2. Блоки для визуализации данных ( DataViewers).

3. Блок управления временем моделирования (SimulationControl).

Выходные порты модели и подсистемы содержат четыре блока.

*Out*- блок выходного порта

Создает выходной порт для подсистемы или для модели верхнего уровня иерархии.

Блоки Outputs подсистемы являются ее выходами. Сигнал, подаваемый в блок Output внутри подсистемы, передается в модель (или подсистему) верхнего уровня.

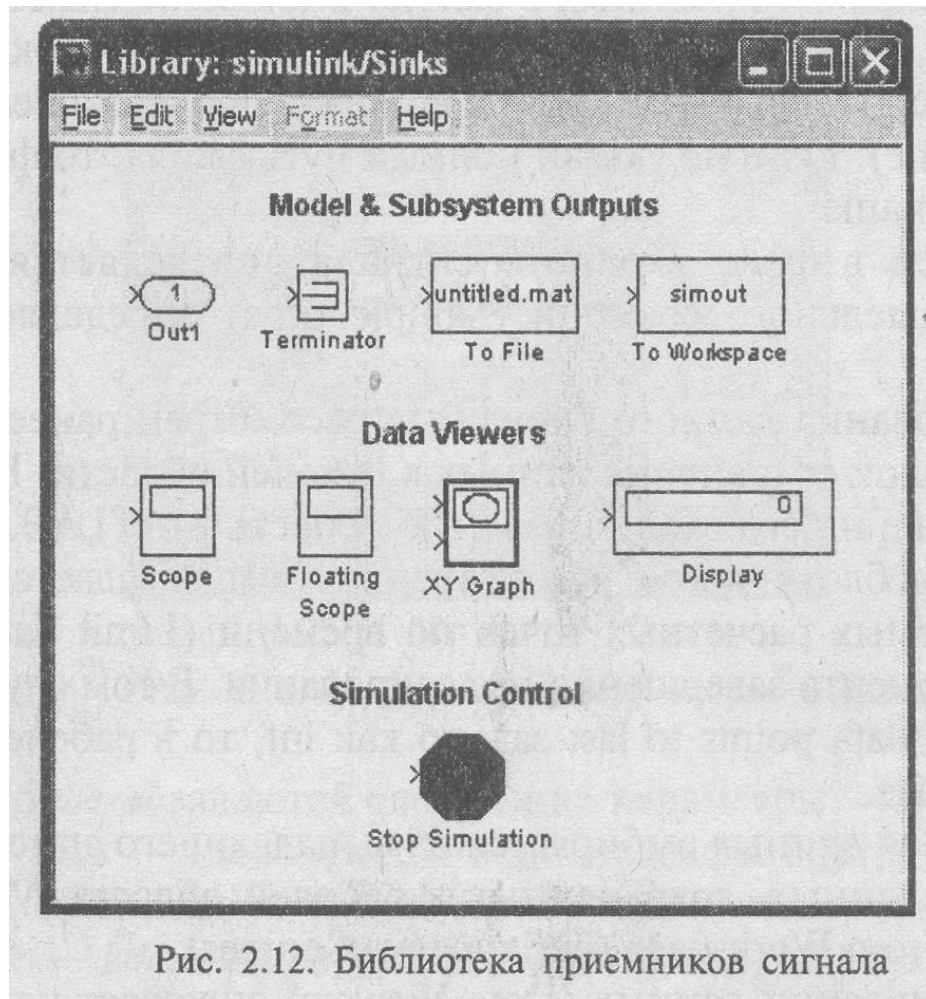


Рис. 2.12. Библиотека приемников сигнала

При создании подсистемы с помощью команды Edit/Createsubsystem выходные порты создаются и нумеруются автоматически. На рис. 2.13 показана модель из ранее рассмотренного примера модели широтно-импульсного модулятора (рис. 2.10). Здесь часть схемы с помощью команды Edit/Create преобразована в подсистему. Схема этой подсистемы с входными и выходными портами видна в правой части рисунка.

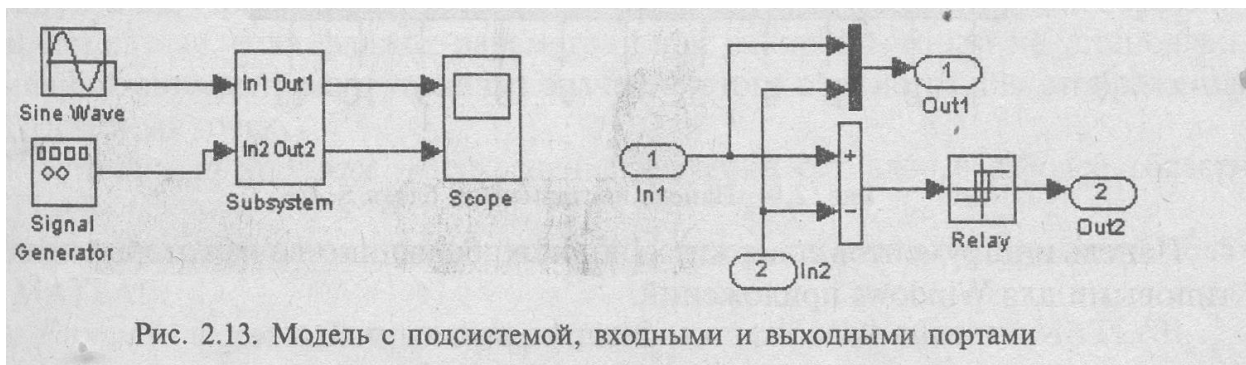


Рис. 2.13. Модель с подсистемой, входными и выходными портами

Выходной порт в системе верхнего уровня используется для передачи сигнала в рабочее пространство MATLAB.

*Terminator*— концевой приемник сигналов. В том случае, когда выход блока оказывается не подключенным ко входу другого блока, Simulink выдает предупреждающее сообщение в командном окне MATLAB. Для исключения этого необходимо использовать блок Terminator.

*To File*— блок сохранения данных в файле. Блок записывает данные, поступающие на его вход, в файл. В окна настройки параметров блока следует ввести имя файла для записи (Filename) и имя переменной, содержащей записываемые данные (Variable name). Если не указан полный путь файла, то файл сохраняется в текущей рабочей папке.

Кратность записи в файл входного сигнала определяется параметром - Decimation. Шаг модельного времени (Sample time) определяет дискретность записи данных.

Пример использования данного блока был рассмотрен ранее (рис. 2.9).

*To Workspace*— блок сохранения данных в рабочей области. Блок записывает данные, поступающие на его вход, в рабочую область MATLAB.

В окне параметров блока, кроме рассмотренных выше, задается максимальное количество сохраняемых расчетных точек по времени (Limitdatapointstolast). Отсчет ведется от момента завершения моделирования. В том случае, если значение параметра Limitdatapointstolast задано как inf, то в рабочей области будут сохранены все данные.

Формат сохранения данных выбирается из выпадающего списка (Saveformat).

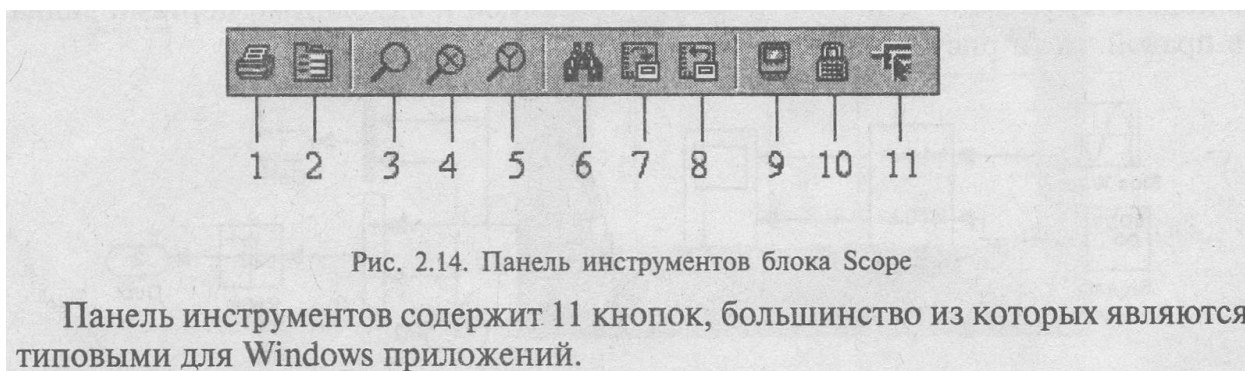
Для считывания данных, сохраненных в рабочей области MATLAB, можно использовать блок FromWorkspace (библиотека Sources).

Раздел для визуализации данных (DataViewers) включает четыре блока.

*Scope*— осциллограф. Строит графики исследуемых сигналов в функции времени. Позволяет наблюдать за изменениями сигналов в процессе моделирования.

Для того чтобы открыть окно просмотра сигналов, необходимо выполнить двойной щелчок левой клавишей «мыши» на изображении блока. В том случае, если на вход блока поступает векторный сигнал, то кривая для каждого элемента вектора строится отдельным цветом.

Настройка окна осциллографа выполняется с помощью панелей инструментов (рис. 2.14).



Параметры блока устанавливаются в окне 'Scope' parameters, которое открывается с помощью инструмента ||| (Parameters) панели инструментов. Окно параметров имеет две вкладки:

- *General*— общие параметры.
- *Data history*- параметры сохранения сигналов в рабочей области MATLAB. Вкладка общих параметров показана на рис. 2.15.

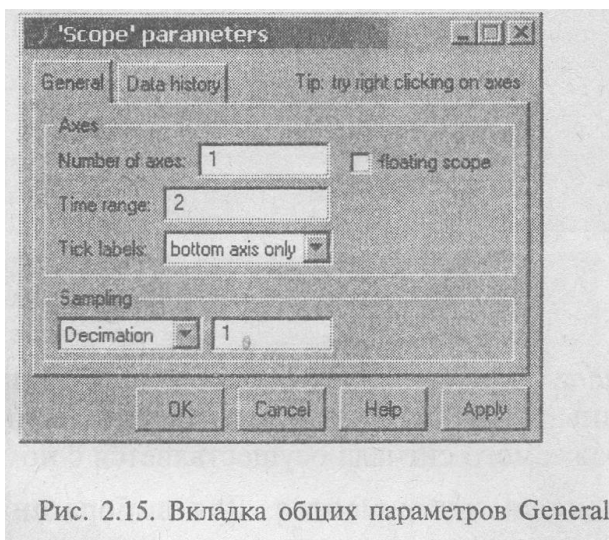


Рис. 2.15. Вкладка общих параметров General

На вкладке *General* задаются следующие параметры:

1. *Numberofaxes*— число входов осциллографа. При изменении этого параметра на изображении блока появляются дополнительные входные порты.

2. *Timerange*— величина временного интервала для которого отображаются графики. Если время расчета модели превышает заданное параметром *Timerange*, то вывод графика производится порциями, при этом интервал отображения каждой порции графика равен заданному значению *Timerange*.

3. *Ticklabels* — вывод/скрытие осей и меток осей.

4. *Sampling*— установка параметров вывода графиков в окне. Задаёт режим вывода расчетных точек на экран. При выборе *Decimation* кратность вывода устанавливается числом, задающим шаг выводимых расчетных точек.

5. *FloatingScope*— перевод осциллографа в «свободный» режим (при установленном флажке).

На вкладке *Data history* (рис. 2.16) задаются следующие параметры:

- *Limitdatapointstolast* —максимальное количество отображаемых расчетных точек графика. При превышении этого числа начальная часть графика обрезается. В том случае, если флажок параметра *Limitdatapointstolast* не установлен, то Simulink автоматически увеличит значение этого параметра, для отображения всех расчетных точек.
- *Savedatatoworkspace* — сохранение значений сигналов в рабочей области MATLAB.
- *Variable name*— имя переменной для сохранения сигналов в рабочей области MATLAB.
- *Format*— формат данных при сохранении в рабочей области MATLAB.

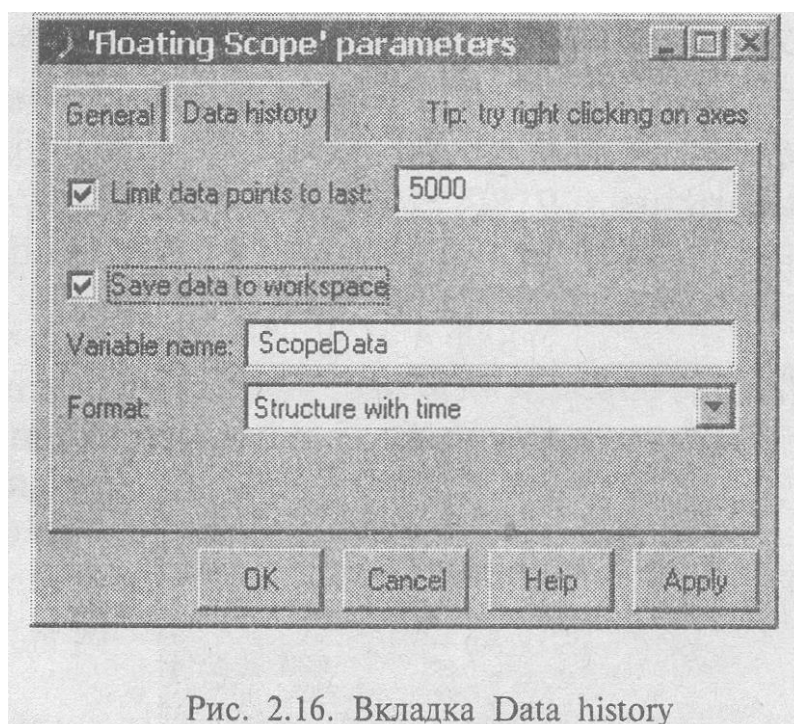


Рис. 2.16. Вкладка *Data history*

Осциллограф (*FloatingScope*), по сути, есть обычный осциллограф *Scope*, переведенный в «свободный» режим. В этом режиме блок осциллографа не имеет входов, а выбор отображаемого сигнала осу-

ществляется с помощью инструмента (*Signalselection*) панели инструментов. Для выбора сигналов необходимо выполнить следующие действия:

1. Выделить систему координат, в которой будет отображаться график. Это достигается с помощью одиночного щелчка левой клавишей «мыши» внутри нужной системы. Выбранная система координат будет подсвечена по периметру синим цветом.

2. С помощью инструмента  $\epsilon$  открыть окно диалога SignalSelector (рис. 2.17).

3. Отметить флажком имена блоков, сигналы с выхода которых требуется исследовать.

После выполнения расчета в окне блока FloatingScope будут отображены выбранные сигналы.

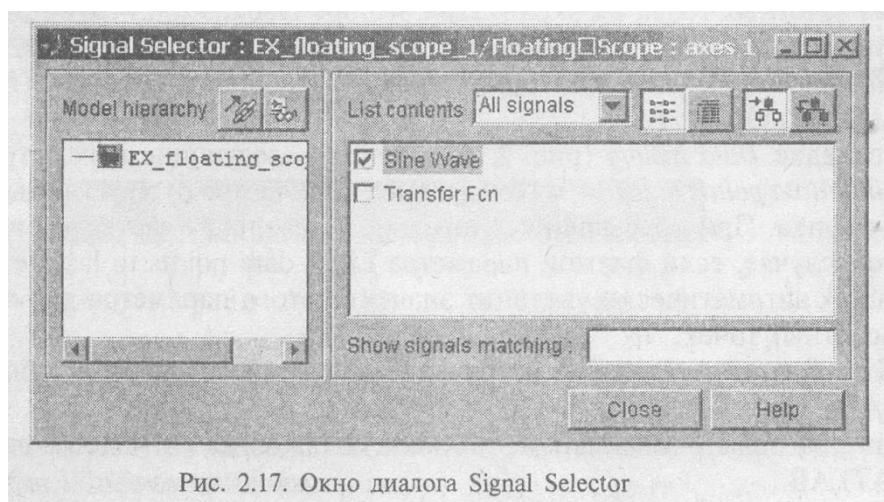


Рис. 2.17. Окно диалога Signal Selector

*XY Graph*— графопостроитель. Строит график одного сигнала в функции другого (график вида  $Y(X)$ ).

Блок имеет два входа. Верхний вход предназначен для подачи сигнала, который является аргументом ( $X$ ), нижний — для подачи значений функции ( $Y$ ).

На рис. 2.18, в качестве примера использования графопостроителя, показана фазовая траектория замкнутой системы (*файл XY Graph*). Выходной

сигнал подан на ось X, а его производная — на ось Y. Система обладает повышенной колебательностью. После нескольких колебаний процесс устанавливается.

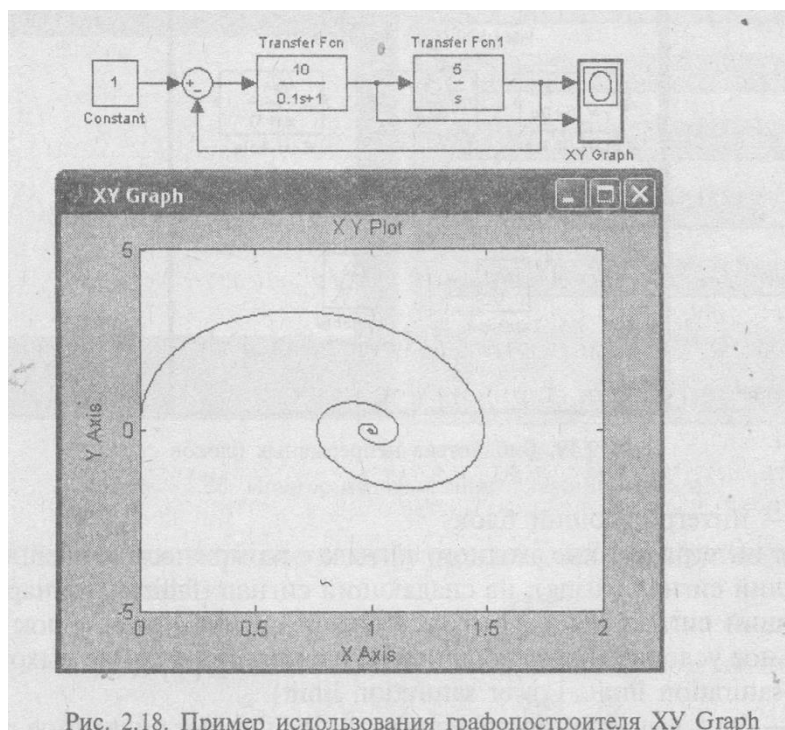


Рис. 2.18. Пример использования графопостроителя XY Graph

*Display*— цифровой дисплей. Отображает значение сигнала в виде числа. Блок *Display* может использоваться для отображения не только скалярных сигналов, но также векторных, матричных и комплексных.

### 3. Continuous- аналоговые (непрерывные) блоки

Библиотека аналоговых блоков показана на рис. 2.19.

Все блоки в библиотеке разделяются на две группы. В первую группу включены динамические блоки, предназначенные для анализа и синтеза непрерывных систем. Эти блоки представляют собой символическую запись дифференциальных уравнений, которыми описываются непрерывные линейные системы управления. Во вторую группу включены блоки временных задержек сигнала. *Эти блоки, кроме своих основных функций, позволяют существенно уменьшить время моделирования в системах с отрицательной обратной связью. Для этого дан-*

ный блок нужно включить в цепь обратной связи. При этом время задержки следует выбрать таким, чтобы наличие блока не влияло на динамические процессы в системе.

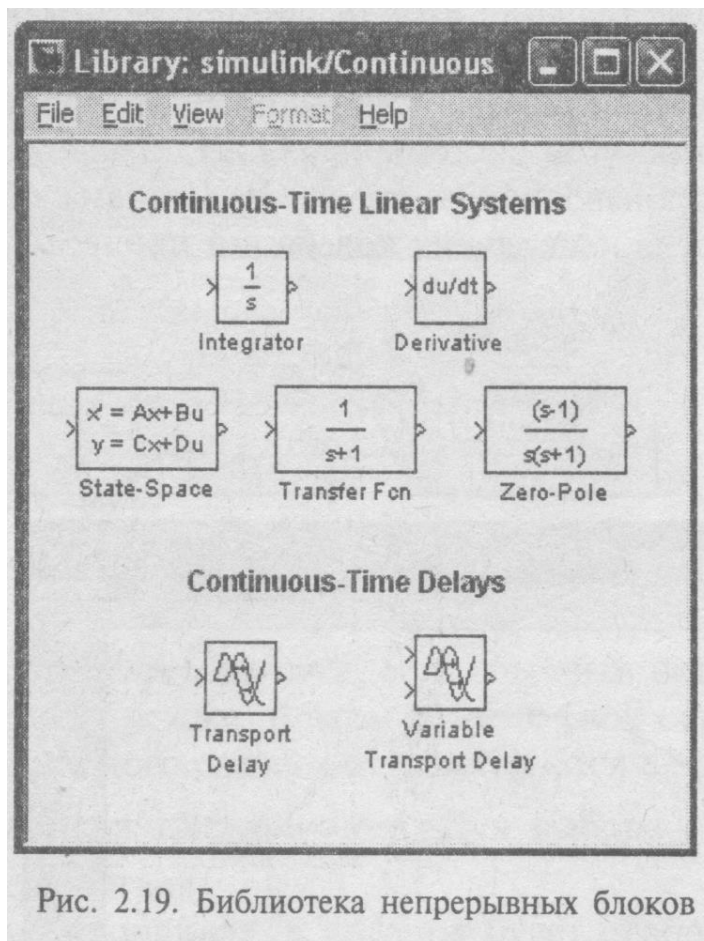


Рис. 2.19. Библиотека непрерывных блоков

*Integrator*— интегрирующий блок.

Выполняет интегрирование входного сигнала с возможностью внешнего сброса на нарастающий сигнал (rising), на спадающий сигнал (falling), на нарастающий либо спадающий сигнал (either), на ненулевой сигнал (level). Блок позволяет задать начальное условие (Initialcondition) и ввести ограничение выходного сигнала (Uppersaturationlimit. Lowersaturationlimit).

*Derivative* — блок вычисления производной. Выполняет численное дифференцирование входного сигнала.

Данный блок используется для дифференцирования аналоговых сигналов.

*State-Space*— блок создает динамический объект, описываемый уравнениями в пространстве состояний:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du,$$

где  $x$  — вектор состояния,  $u$  — вектор входных воздействий,  $y$  — вектор выходных сигналов,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ — матрицы: системы, входа, выхода и обхода, соответственно.

Блок позволяет задать вектор начальных условий для переменных состояния (Initialcondition).

На рис. 2.20 показан пример моделирования динамического объекта с помощью данного блока (**файл *State-Space.***)

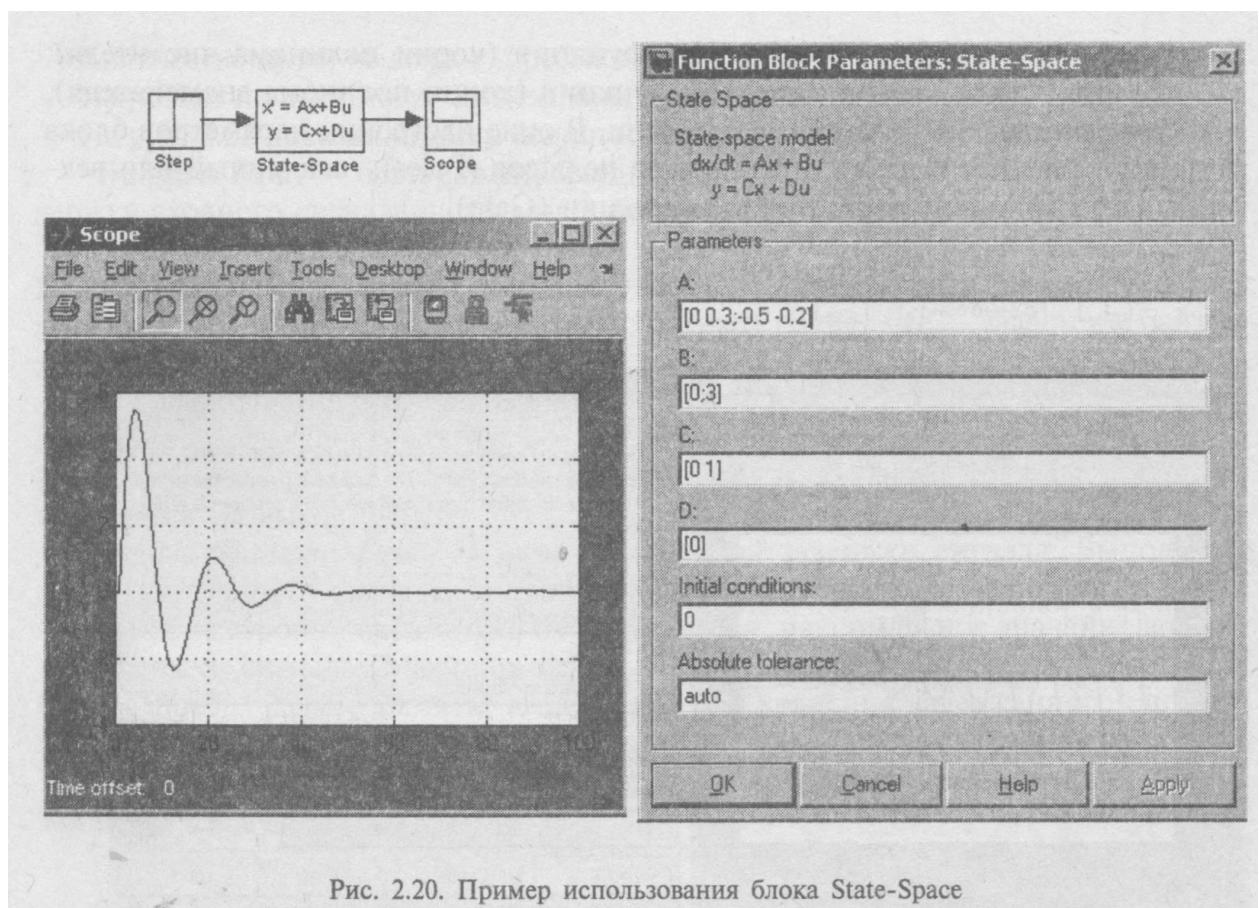


Рис. 2.20. Пример использования блока State-Space

*Transfer Fcn* — блок передаточной функции задает передаточную функцию в виде отношения полиномов:

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

При этом порядок числителя не должен превышать порядок знаменателя.

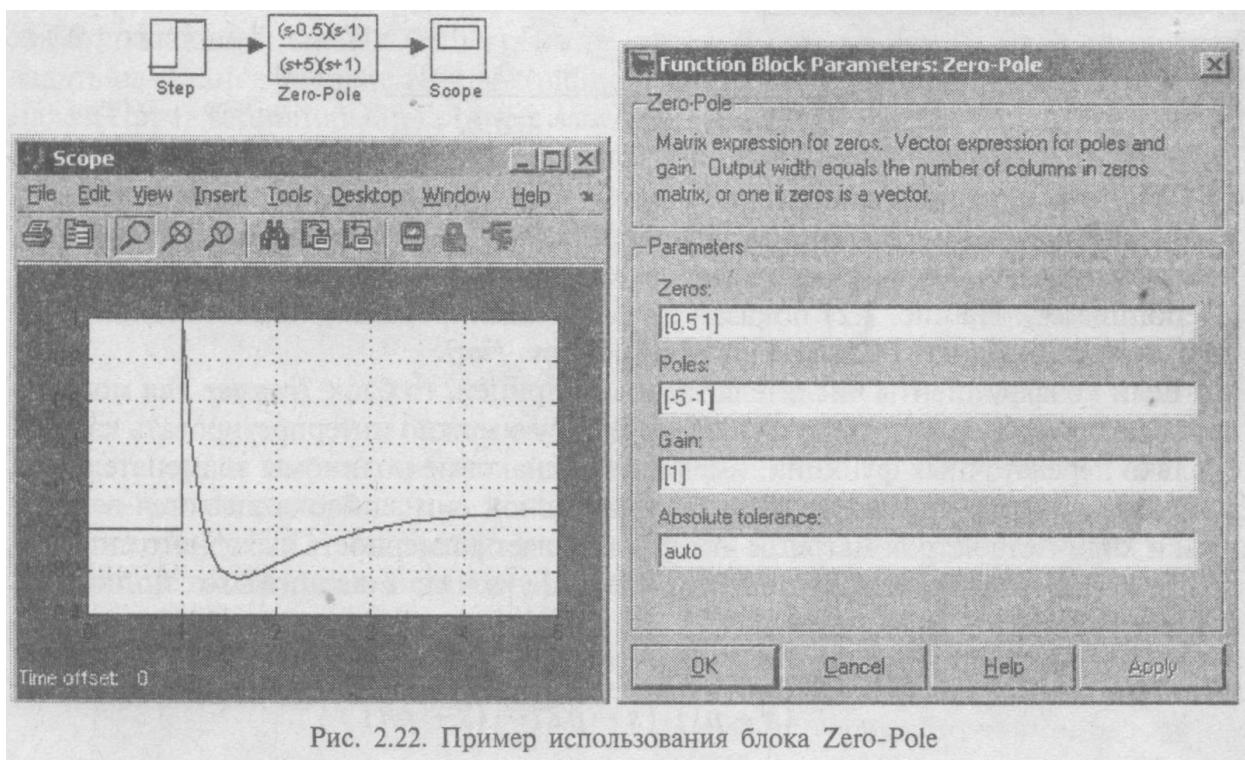
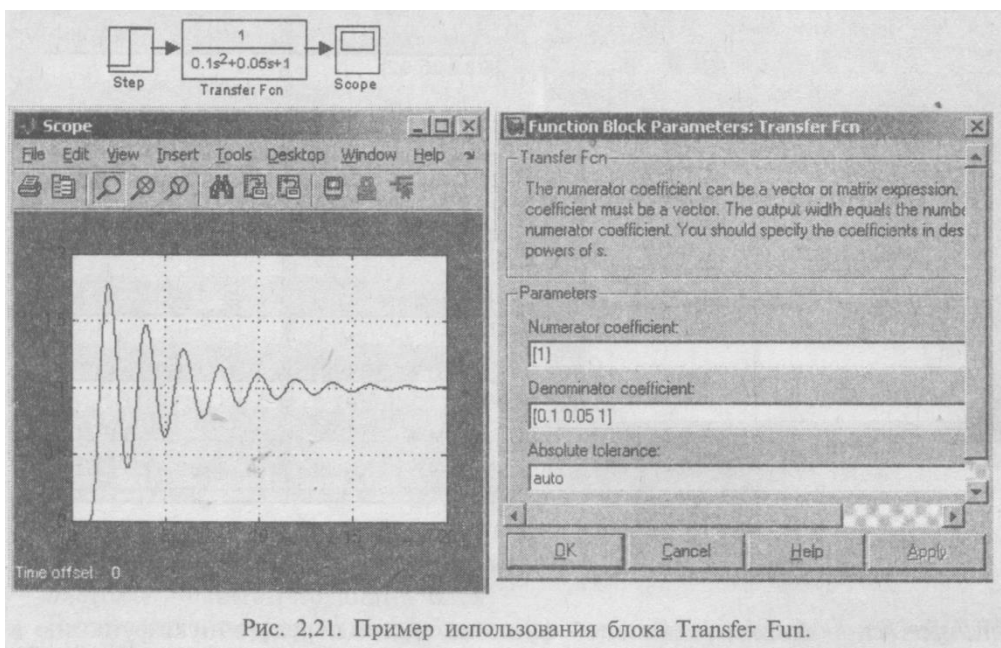
В окне настройки параметров блока задаются вектор коэффициентов полинома числителя (Numerator) и вектор коэффициентов полинома знаменателя (Denominator). На рис. 2.21 показан пример моделирования колебательного звена с помощью блока *Transfer Fun* (файл *Trans. Fun*).

Если коэффициенты числителя заданы матрицей, то блок *Transfer Fun* моделирует векторную передаточную функцию, которую можно интерпретировать как несколько передаточных функций, имеющих одинаковые полиномы знаменателя, но разные полиномы числителя. При этом выходной сигнал блока является векторным и количество строк матрицы числителя задает размерность выходного сигнала.

*Zero-Pole* — определяет передаточную функцию с заданными полюсами и нулями:

$$H(s) = K \frac{(s - z_1) \cdot (s - z_2) \cdot \dots \cdot (s - z_m)}{(s - p_1) \cdot (s - p_2) \cdot \dots \cdot (s - p_n)}$$

где  $z_1, z_2, z_m$  — нули передаточной функции (корни полинома числителя),  $p_1, p_2, p_n$  — полюсы передаточной функции (корни полинома знаменателя),  $K$  — коэффициент передаточной функции. В окне настройки параметров блока задаются — вектор нулей (Zeros), вектор полюсов (Poles), скалярный или векторный коэффициент передаточной функции (Gain).



Количество нулей не должно превышать число полюсов передаточной функции.

Нули или полюса могут быть заданы комплексными числами.

На рис. 2.22 показан пример использования блока Zero-Pole (**файл Zero-Pole**).

*TransportDelay*— блок фиксированной задержки сигнала. Обеспечивает задержку входного сигнала на заданное время.

В окне настройки параметров блока задаются время задержки сигнала (*TimeDelay*), начальное значение выходного сигнала (*Initialinput*), размер памяти, выделяемой для хранения задержанного сигнала (*Buffersize*— задается в байтах числом, кратным 8).

При выполнении моделирования значение сигнала и соответствующее ему модельное время сохраняются во внутреннем буфере блока *TransportDelay*. По истечении времени задержки значение сигнала, извлекается из буфера и передается на выход блока.

*VariableTransportDelay*— блок управляемой задержки сигнала. Выполняет задержку входного сигнала, заданную величиной сигнала управления.

В окне настройки параметров блока задаются максимальное значение времени задержки сигнала (*Maximumdelay*), начальное значение выходного сигнала (*Initialinput*), размер памяти, выделяемой для хранения задержанного сигнала (*Buffersize*— задается в байтах числом, кратным 8). Блок управляемой задержки *VariableTransportDelay* работает аналогично блоку постоянной задержки сигнала *TransportDelay*.

#### **4. Discontinuities- нелинейные блоки**

Библиотека блоков показана на рис. 2.23.

*Saturation*— блок ограничения. Выполняет ограничение величины выходного сигнала. В окне настройки параметров блока задаются верхний и нижний порог ограничения (*Upperlimit*. *Lowerlimit*).

Выходной сигнал блока равен входному, если его величина не выходит за порог ограничения. По достижении входным сигналом уровня ограничения выходной сигнал блока перестает изменяться и остается равным порогу.

Блок *SaturationDynamic* аналогичен рассмотренному. В этом блоке верхний и нижний уровни ограничения выходного сигнала задаются по входам  $up$ ,  $ioi$  и могут изменяться при моделировании.

*DeadZone* — блок с зоной нечувствительности. Реализует нелинейную зависимость типа «зона нечувствительности (мертвая зона)».

В окне настройки параметров блока задаются начало зоны нечувствительности (*Startofdeadzone* — нижний порог), конец зоны нечувствительности (*Endofdeadzone* — верхний порог).

Если величина входного сигнала находится в пределах зоны нечувствительности, то выходной сигнал блока равен нулю. Если входной сигнал больше верхнего порога зоны нечувствительности, то выходной сигнал равен входному минус величина порога.

Блок *DeadeZoneDynamic* аналогичен рассмотренному. В этом блоке верхний и нижний уровни мертвой зоны выходного сигнала задаются по входам  $up$ ,  $ioi$  и могут изменяться при моделировании.

*RateLimiter* — блок ограничения скорости изменения сигнала. Блок обеспечивает ограничение скорости изменения сигнала (первой производной).

В окне настройки параметров блока задаются уровень ограничения скорости при увеличении сигнала (*Risingslewrate*), уровень ограничения скорости при уменьшении сигнала (*Fallingslewrate*).

Блок *RateLimiterDynamic* аналогичен рассмотренному. В этом блоке верхний и нижний уровни ограничения скорости изменения выходного сигнала задаются по входам  $up$ ,  $ioi$  и могут изменяться при моделировании.

*Backlash* — блок люфта в механической передаче. Моделирует нелинейность типа «люфт».

В окне настройки параметров блока задаются ширина люфта (Deabandwidth), начальное значение выходного сигнала (Initialoutput).

На рис. 2.24 показан пример работы блока Backlash в замкнутой системе, рассмотренной в примере (рис. 2.18) (**файл XY Graph1**). Здесь, в отличие от линейной системы, устанавливаются незатухающие колебания (предельный цикл).

*Relay*— релейный блок. Реализует релейную нелинейность.

В окне настройки параметров блока задаются порог включения и порог выключения (Switchonpoint— значение входного сигнала, при котором происходит включение реле.

Switchoffpoint— значение входного сигнала, при котором происходит выключение реле),

Величина выходного сигнала во включенном состоянии (Outputwhenon), и величина выходного сигнала в выключенном состоянии (Outputwhenoff).

Переход из одного состояния в другое происходит скачком при достижении входным сигналом порога включения или выключения реле.

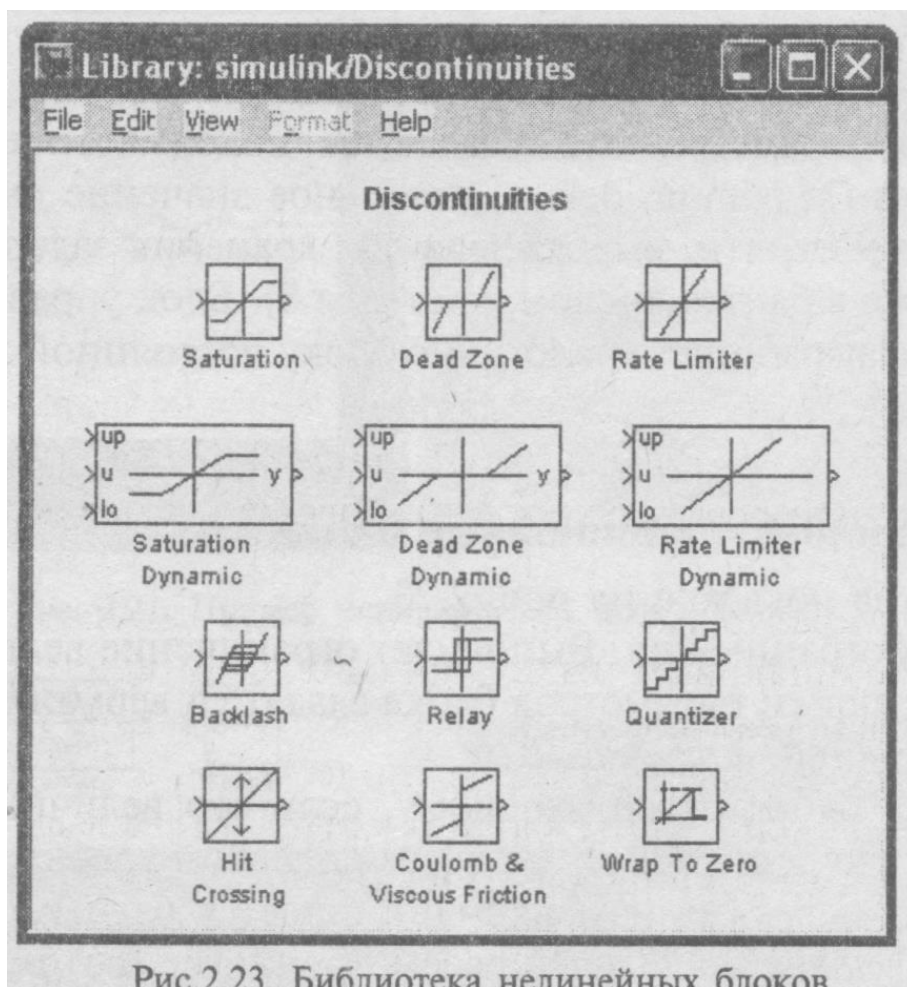


Рис.2.23. Библиотека нелинейных блоков

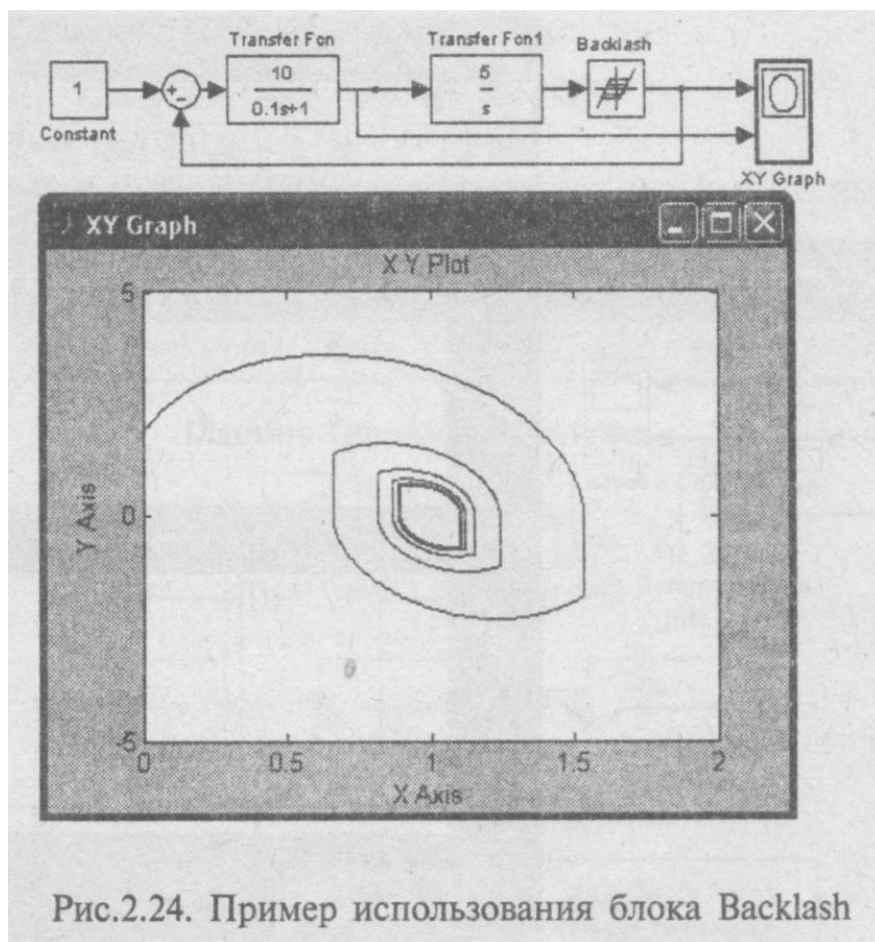


Рис.2.24. Пример использования блока Backlash

Пример использования блока Relay для получения напряжений пилообразной и прямоугольной формы показан на рис. 2.25 (**файл GPksz**). Ранее, на рис. 2.10, рис. 2.11 приведены примеры использования блока для получения широтно-импульсной модуляции.

*Quantizer*— блок квантования по уровню. Блок обеспечивает квантование входного сигнала с одинаковым шагом по уровню. В окне настройки параметров блока задается шаг квантования по уровню (Quantizationinterval).

*HitCrossing* — блок определения момента пересечения порогового значения. Определяет момент времени, когда входной сигнал пересекает заданное пороговое значение. В окне настройки параметров блока задаются значение, пересечение которого входным сигналом требуется идентифицировать (Hitcrossingoffset), направление пересечения

(Hitcrossingdirection), которое выбирается из списка: rising— возрастание, failing— убывание, either— оба направления.

В момент пересечения порогового уровня блок вырабатывает единичный сигнал длительностью в один шаг модельного времени.

*Coulomb and Viscous Friction* — блок сухого и вязкого трения. Моделирует эффекты сухого и вязкого трения в механических передачах. В окне настройки параметров блока задаются величина сухого трения (Coulombfrictionvalue (Offset), коэффициент вязкого трения (Coefficienttofviscousfriction (Gain).

*WraptoZero* — порог нулевого уровня. Сигнал на выходе блока равен нулю до тех пор, пока он не превысит значение параметра Threshold— порог. По превышении порога сигнал на выходе блока становится равным сигналу на входе.

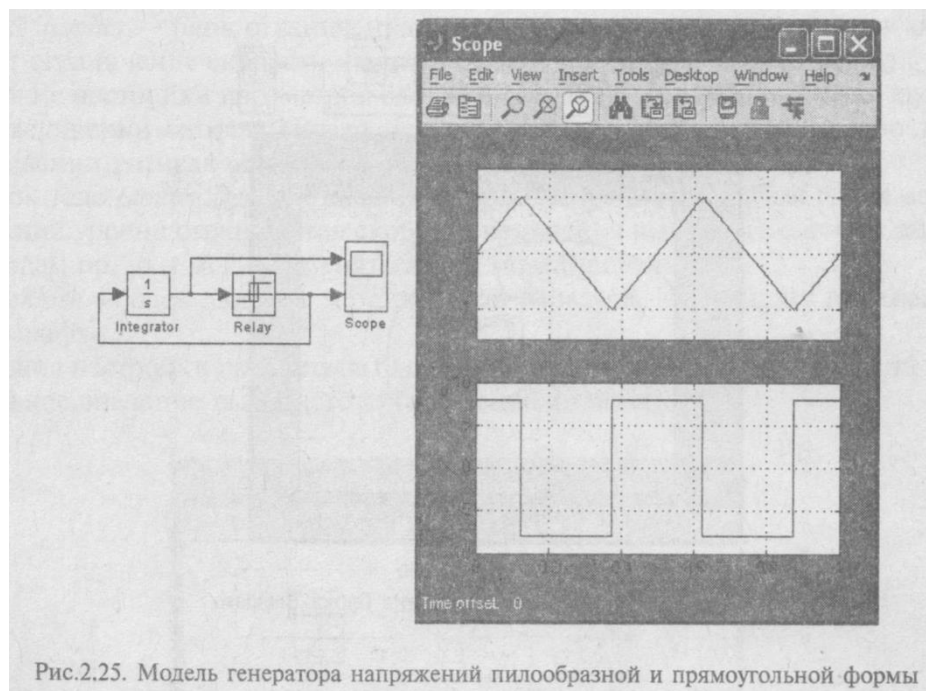


Рис.2.25. Модель генератора напряжений пилообразной и прямоугольной формы

## 5. Discrete- дискретные блоки

Библиотека дискретных блоков приведена на рис. 2.26.

Все блоки в библиотеке разделяются на две группы. В первую группу входят различные задержки и динамические блоки, предназна-

ченные для анализа и синтеза дискретных систем. Эти блоки представляют собой символьную запись разностных уравнений, которыми описываются дискретные системы управления.

Во вторую группу (*SampleandHoldDelays*) включен блок памяти и блоки экстраполяции.

*UnitDelay*, *IntegerDelay*, *TappedDelay* — единичная задержка, целочисленная задержка, выявляемая задержка. Выполняют задержку входного сигнала на один (*UnitDelay*) или более (*IntegerDelay*) шагов модельного времени. Выходным сигналом блока *TappedDelay* является вектор, количество элементов которого задается в поле *NumberofDelays*. В окнах настройки параметров блоков задаются начальное значение для выходного сигнала (*Initialcondition*), шаг модельного времени (*Sampletime*).

Блоки дискретного интегратора (*Discrete-TimeIntegrator*), производных (*Difference*, *DiskreteDerivative*), дискретной передаточной функции (*DiscreteTransferFen*), дискретной передаточной функции с заданными полюсами и нулями (*DiscreteZero-Pole*), дискретного динамического объекта в переменных состояния (*DiscreteState-Space*) повторяют аналогичные блоки для непрерывных систем. В этих блоках могут быть использованы различные численные методы вычисления интеграла.

1. *ForwardEuler* — Прямой метод Эйлера.
2. *BackwardEuler* — Обратный метод Эйлера.
3. *Tutsim* — Метод трапеций.

Каждый блок имеет параметр — шаг дискретизации по времени (*Sampletime*).

На рис. 2.27 показан пример, демонстрирующий все три способа численного интегрирования блока *Discrete-TimeIntegrator* (**файл**

***Int\_z***). Как видно из рисунка, изображение блока меняется в зависимости от выбранного метода интегрирования.

*Diskretefilter*— дискретный фильтр. Представляет собой динамическое звено, передаточная функция которого получается путем деления дискретной передаточной функции на  $z^n$ . Дискретные фильтры широко применяются в системах коммуникации и связи. Они также используются в цифро-аналоговых системах управления при фильтрации шумов и искажений информационных сигналов.

*VeightedMovingAverage*— блок для расчета средне-взвешенных значений входного сигнала.

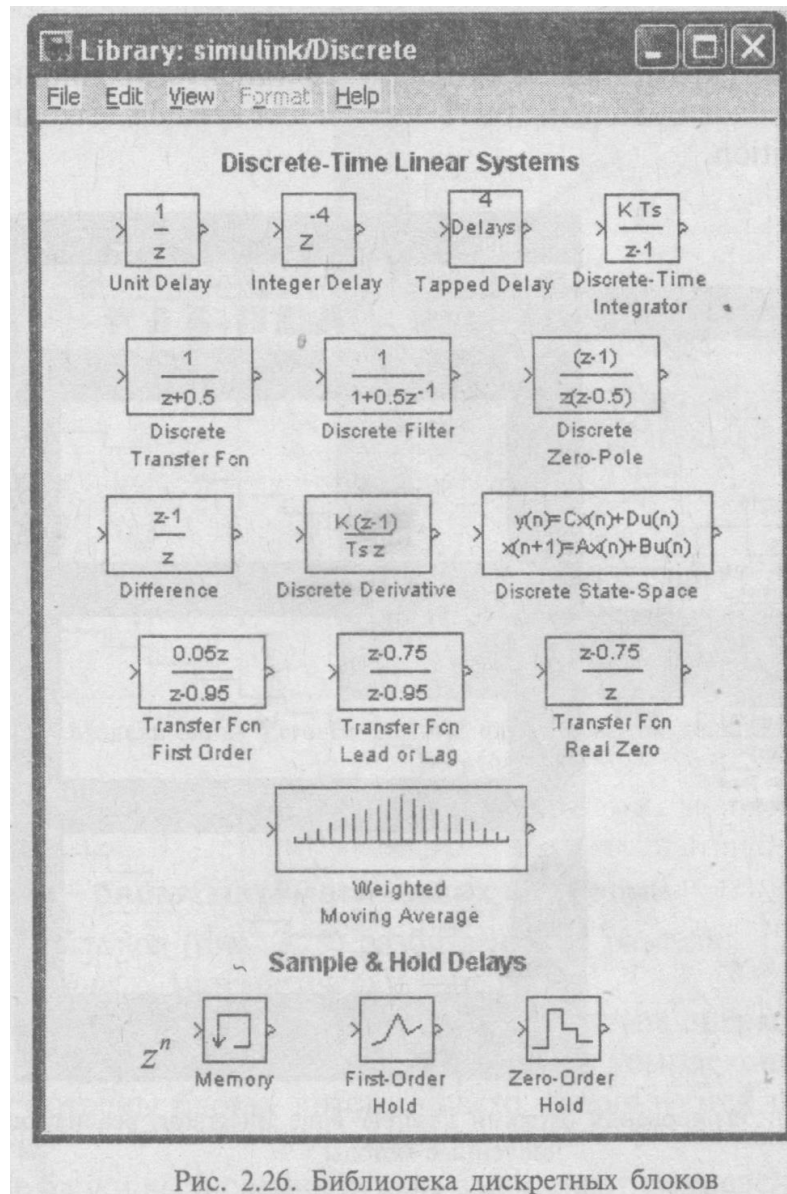


Рис. 2.26. Библиотека дискретных блоков

Выходные сигналы блока формируются в соответствии с уравнениями:

$$y_1[k] = a_1 u[k] + b_1 u[k-1] + c_1 u[k-2] \dots,$$

$$y_2[k] = a_2 u[k] + b_2 u[k-1] + c_2 u[k-2] \dots$$

в поле Weights блока параметров задаются коэффициенты уравнений в виде матрицы. Начальные условия должны быть заданы для каждой выходной величины в поле InitialCondition.

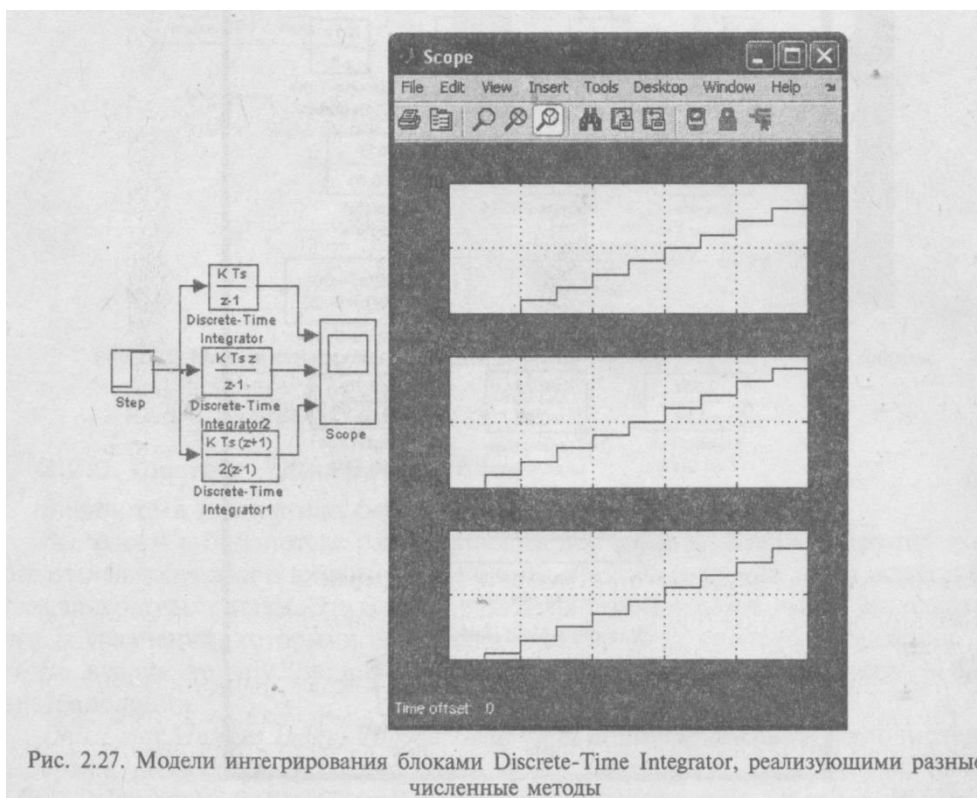


Рис. 2.27. Модели интегрирования блоками Discrete-Time Integrator, реализующими разные численные методы

Аналогом преобразователя входного непрерывного сигнала  $f(t)$  в сигнал  $f[nT]$  в пакете Simulink служит блок Zero-OrderHold— экстраполятор нулевого порядка. Блок фиксирует значение входного сигнала в начале интервала квантования и поддерживает на выходе это значение до окончания интервала квантования. Затем выходной сигнал изменяется скачком до величины входного сигнала на следующем шаге квантования.

На рис. 2.28 показан пример использования блока Zero-OrderHold для формирования квантованного сигнала (**файл Zero-OrderHold**).

*First-OrderHold* — блок экстраполятора первого порядка. Блок задает линейное изменение выходного сигнала на каждом такте дискретизации, в соответствии с крутизной входного сигнала на предыдущем интервале дискретизации.

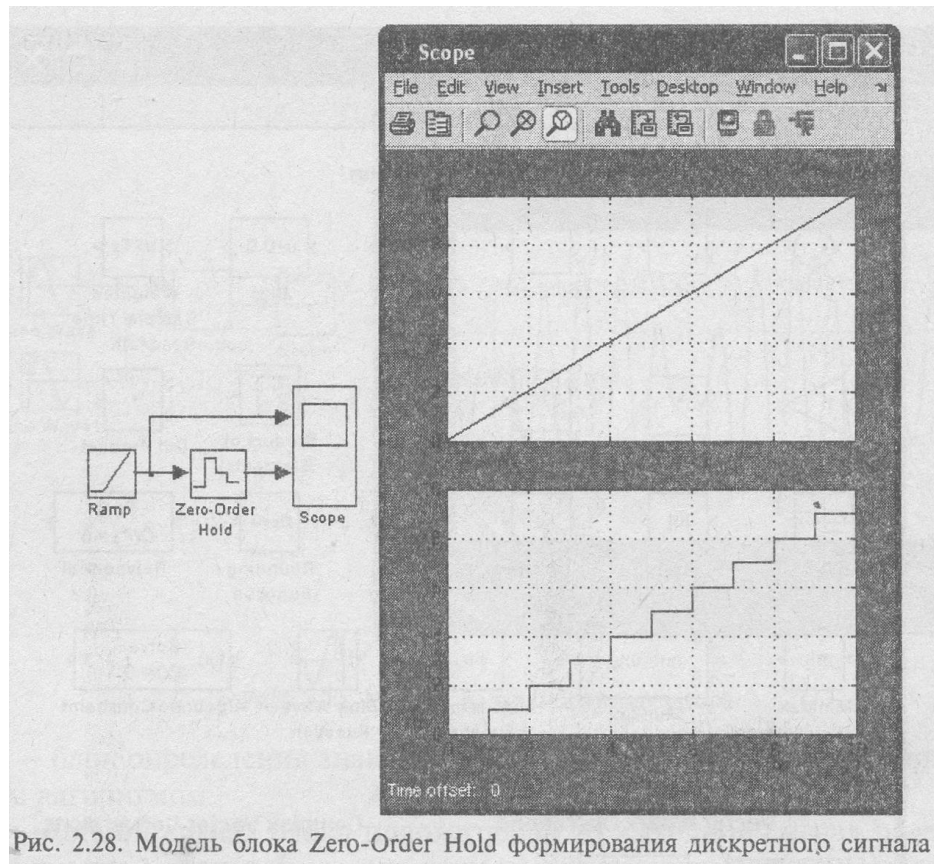


Рис. 2.28. Модель блока Zero-Order Hold формирования дискретного сигнала

## 6. Math- блоки математических операций

Библиотека блоков (рис. 2.29) разбита на три раздела:

1. *Math Operations*— математические операции.
2. *VectorMatrixOperations*— векторные и матричные операции.
3. *ComplexVectorConversation*— преобразования комплексных векторов.

Ниже рассмотрены блоки, которые часто используются при анализе мехатронных систем.

Различные блоки вычисления суммы выполняют вычисление суммы текущих значений сигналов.

В списке (*Listofsign*) окна задания параметров можно использовать следующие знаки: + (плюс), - (минус) и | (разделитель знаков).

Количество входов и операция (сложение или вычитание) определяется списком знаков параметра *Listofsign*, при этом метки входов обозначаются соответствующими знаками.

Блоки умножения Product выполняют вычисление произведений текущих значений сигналов.

Количество входов (Numberofinputs) может задаваться как числом или как списком знаков. В списке знаков можно использовать знаки \* (умножить) и / (разделить).

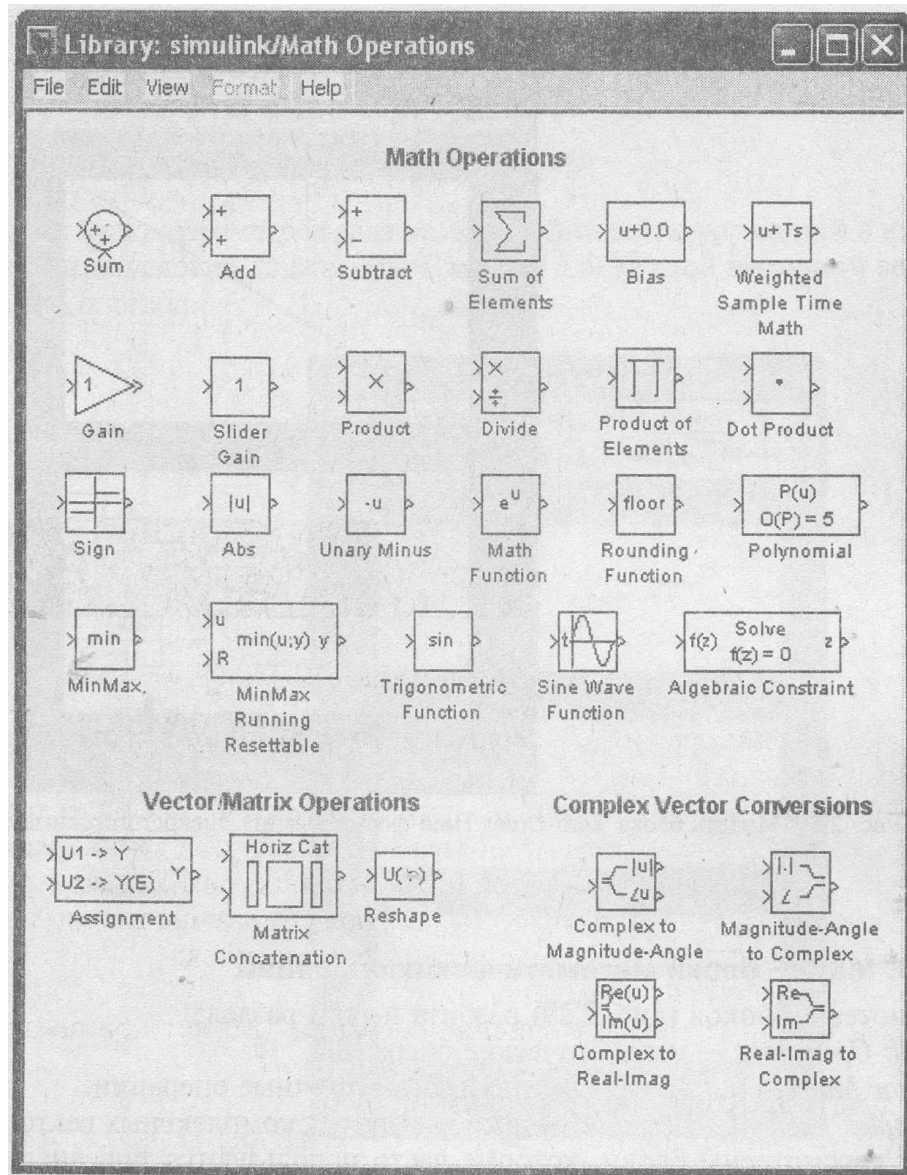


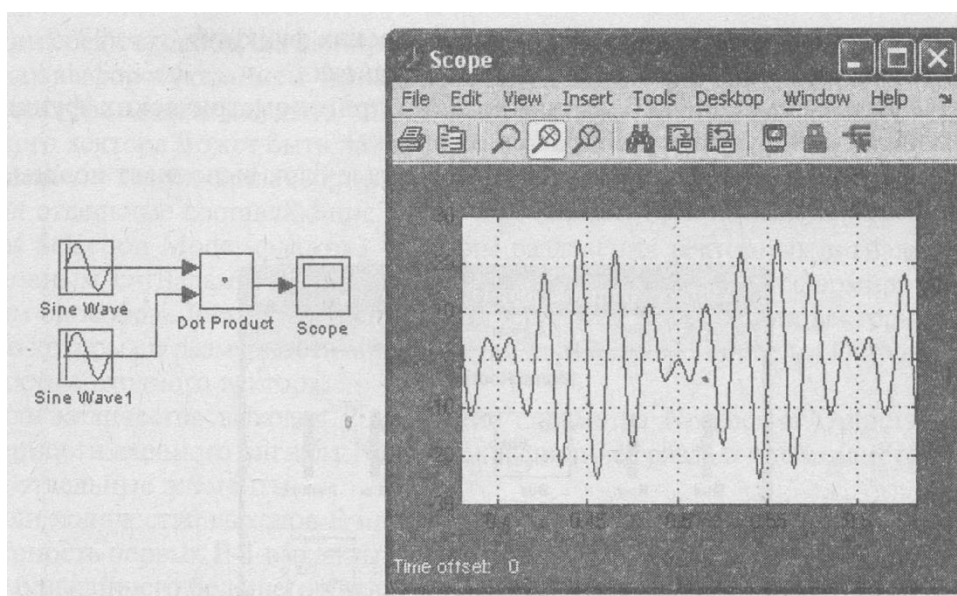
Рис. 2.29. Библиотека блоков математических операций

Если параметр Numberofinputs задан списком, включающим кроме знаков умножения также знаки деления, то метки входов будут обозначены символами соответствующих операций.

Блок может использоваться для операций умножения или деления скалярных векторных или матричных сигналов. Пример использования блока Product при реализации балансного модулятора показан на рис. 2.30 (**файл Product**).

Abs— блок вычисления модуля выполняет вычисление абсолютного значения величины сигнала.

Блок Abs может использоваться также для вычисления модуля сигнала комплексного типа.



Рис, 2.30. Модель балансного модулятора

*Sign*— блок определения знака сигнала. Блок работает в соответствии со следующим алгоритмом:

Если входной сигнал блока положителен, то выходной сигнал равен 1.

Если входной сигнал блока отрицателен, то выходной сигнал равен -1.

Если входной сигнал блока равен 0, то выходной сигнал также равен 0.

*Gain* и *Matrix Gain*— усилители. Выполняют умножение входного сигнала на постоянный коэффициент. В окне параметров задаются:

*Gain*— коэффициент усиления.

*Multiplication*— способ выполнения операции. Может принимать значения (из списка):

- *Element-wise K\*u* — поэлементный.
- *MatrixK\*u*— матричный. Коэффициент усиления является левосторонним операндом.
- *Matrixu\*K*— матричный. Коэффициент усиления является правосторонним операндом.

*Saturateonintegeroverflow*. При установленном флажке ограничение сигналов целого типа выполняется корректно.

Блоки усилителей *Gain* и *MatrixGain* есть один и тот же блок, но с разными начальными установками параметра *Multiplication*.

Параметр блока *Gain* может быть положительным или отрицательным числом, как больше, так и меньше 1. Коэффициент усиления можно задавать в виде скаляра, матрицы или вектора, а также в виде вычисляемого выражения.

В том случае если параметр *Multiplication* задан как *Element-wiseK\*u*, то блок выполняет операцию умножения на заданный коэффициент скалярного сигнала или каждого элемента векторного сигнала. В противном случае блок выполняет операцию матричного умножения сигнала на коэффициент, заданный матрицей.

*MathFunction* — блок вычисления математических функций Вид вычисляемой функции выбирается из списка.

*TrigonometricFunction*— блок вычисления тригонометрических функций. Вид вычисляемой функции выбирается из списка.

При векторном или матричном входном сигнале блок выполняет поэлементное вычисление заданной функции.

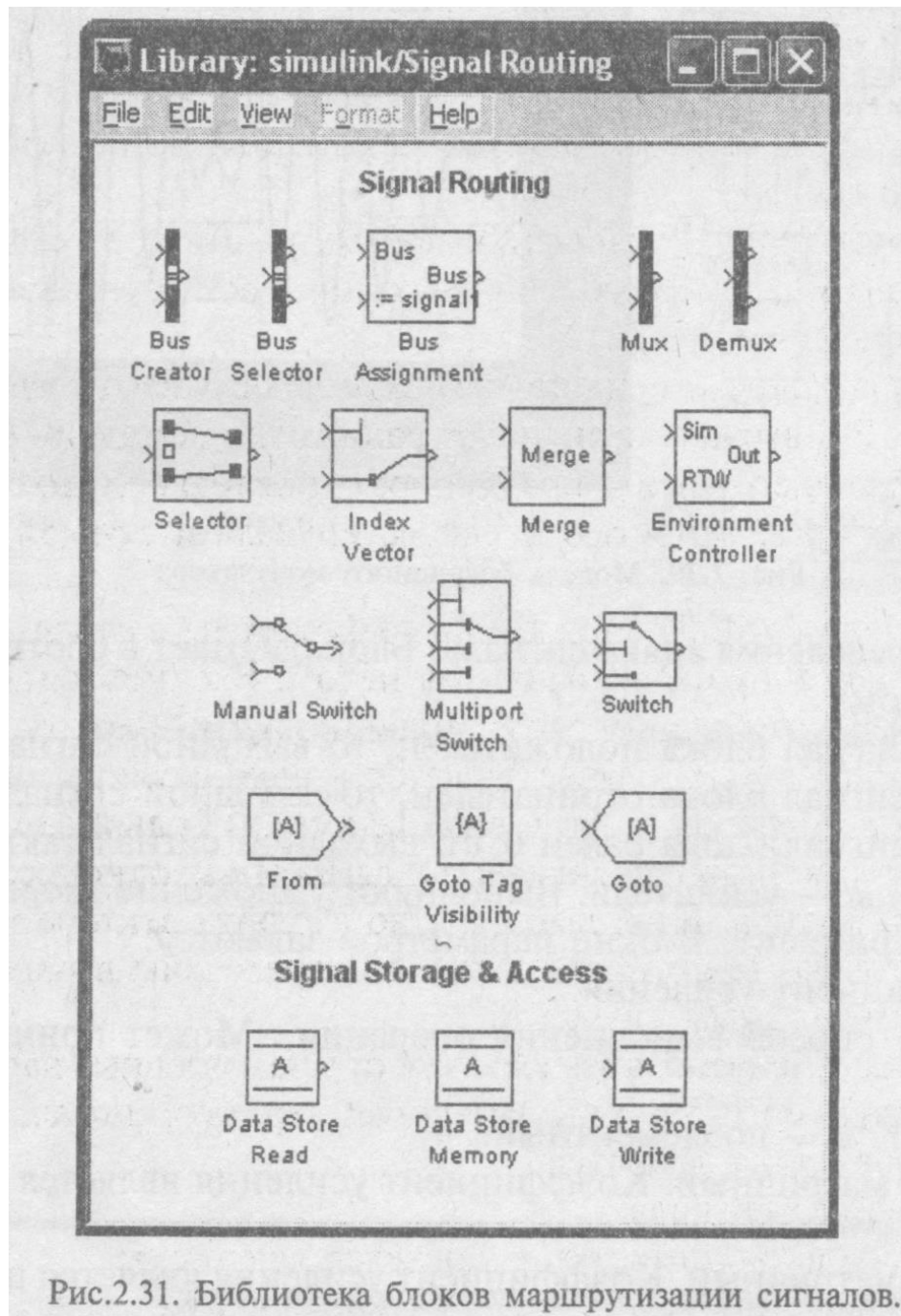


Рис.2.31. Библиотека блоков маршрутизации сигналов.

## 2. SignalRouting— библиотека маршрутизации сигналов

Библиотека маршрутизации сигналов показана на рис. 2.31.

*BusCreator*— блок шинного формирователя. Формирует шину из сигналов различных типов. Блок позволяет объединять любые сигналы (векторные, матричные, комплексные, действительные и целые раз-

ных типов) в единую шину. Такая шина позволяет сократить количество соединительных линий в модели. Для разделения шины на отдельные составляющие необходимо использовать блок BusSelector.

*Mux*— мультиплексор (смеситель). Объединяет входные сигналы в вектор.

Входные сигналы блока могут быть скалярными и (или) векторными.

Если среди входных сигналов есть векторы, то количество входов можно задавать как вектор с указанием числа элементов каждого вектора. Размерность входного вектора можно задавать как -1 (минус один). В этом случае размерность входного вектора может быть любой.

*Demux*— демультимплексор (разделитель). Разделяет входной векторный сигнал на отдельные составляющие.

BusSelectionMode(флажок) — режим разделения векторных сигналов. Входным сигналами в обычном режиме является вектор, сформированный любым способом. Выходными сигналами являются скаляры или векторы, количество которых и размерность определяется параметром NumberofOutputsи размерностью входного вектора.

Если количество выходов  $P$  (значение параметра NumberofOutputs) равно размерности входного сигнала  $N$ , то блок выполняет разделение входного вектора на отдельные элементы.

Если количество выходов  $P$  меньше, чем размерность входного сигнала  $N$ , то размерность первых  $P-1$  выходных сигналов равна отношению  $N/P$ , округленному до ближайшего большего числа, а размерность последнего выходного сигнала равна разности между размерностью входного сигнала и суммой размерностей первых  $P-1$  выходов.

В режиме BusSelectionMode блок Demux работает не с отдельными элементами векторов, а с векторными сигналами в целом. Входной сигнал в этом режиме должен быть сформирован блоком Mux или другим блоком Demux. Параметр NumberOfOutputs в этом случае задается в виде скаляра, определяющего количество выходных сигналов, либо в виде вектора, каждый элемент которого определяет количество векторных сигналов в данном выходном сигнале.

*Selector*— блок селектора. Блок выбирает во входном векторе или матрице и передает на выход только те сигналы, которые определены в параметрах блока или заданы внешним входным сигналом.

Внешний вид блока изменяется в зависимости от установленных параметров блока.

*Goto*— блок передачи сигнала. Блок выполняет передачу сигнала к блоку From. В окне параметров блока задаются:

*Tag*— идентификатор сигнала.

*Tagvisibility*— признак видимости; выбирается из списка: *local*— сигнал передается в пределах локальной подсистемы.

*scoped*— сигнал передается в пределах локальной подсистемы и подсистемах нижнего уровня иерархии.

*global*— сигнал передается в пределах всей модели. ,

Использование блока Goto совместно с блоком From обеспечивает передачу сигнала без линии связи.

*DataStoreMemory*— блок создания общей области памяти. Блок создает поименованную область памяти для хранения данных.

Блок используется совместно с блоками *DataStoreWrite*(запись данных) и *DataStoreRead*(считывание данных).

Переключатели сигналов — switch, manual switch, multipoint switch.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.1.5. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ**

### **ВОПРОСЫ**

1. Представление математического описания объектов управления мехатронных систем в пакете ControlSystemToolbox.
2. Представление математического описания объектов управления мехатронных систем в пакете Simulink.
3. Динамические характеристики объектов управления в пакете ControlSystemToolbox и Simulink.

### **ЛИТЕРАТУРА**

2. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### **1. Представление математического описания объектов управления мехатронных систем в пакете ControlSystemToolbox**

Пакет ControlSystemToolbox предназначен для моделирования, анализа и проектирования непрерывных и дискретных систем автоматического управления. Функции пакета реализуют методы исследования динамических систем, основанные на использовании передаточных функций и моделей для переменных состояния. Частотные и временные характеристики, нули и полюсы системы легко вычисляются и отображаются в виде графиков и диаграмм.

Рассмотрим способы математического описания линейных систем, которые предоставляются пакетом расширения ControlSystemToolbox (CST).

Исследование систем автоматического управления начинается с создания математической модели. В пакете CSTлинейные модели могут быть представлены в четырех формах:

- передаточная функция (**tf**);
- нули, полюса и коэффициент усиления (**zpk**);
- пространство состояния (**ss**);
- системная функция (**frd**).

Задать модель системы в форме **tf**— это задать вектор коэффициентов числителя и знаменателя.

Например, если в форме **tf**требуется представить модель системы, передаточная функция которой равна

$$W(s) = \frac{s}{s^2 + 2s + 10},$$

то в **m**-файле требуется записать следующую команду **W=tf([1,0], [1,2,10])**, после выполнения которой, в рабочем окне **MATLAB** появится выражение передаточной функции

Transfer function:  
 $\frac{s}{s^2 + 2s + 10}$

Для создания модели системы в форме **zpk**, требуется знание нулей (корней числителя), полюсов (корней знаменателя) и коэффициента усиления.

Например, если модель задана в форме **zpk**

$$W(s) = \frac{2s}{(s + 2)(s + 1 - j)(s + 1 + j)},$$

то в **m**-файле ей будут соответствовать команды, представленные листингом 3.1.

**Листинг 3.1**

```
z=0;
p=[-2,-1+j,-1-j];
k=2;
W=zpk(z,p,k)
```

Модель системы в пространстве состояния задается системой матричных уравнений. Предположим, что имеется дифференциальное уравнение двигателя постоянного тока независимого возбуждения, у которого за входную величину принят ток **I**, а за выходную — угол поворота

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = 2\frac{d\theta}{dt} + 5\theta = 3I. \quad (3.14)$$

Введем обозначения:

$$x_1 = \theta;$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = \frac{d\theta}{dt}.$$

Тогда имеем:

$$\dot{x}_1 = x_2;$$

$$\dot{x}_2 = -5x_1 - 2x_2; \quad (3.15)$$

$$y = x_1.$$

С учетом принятых обозначений, уравнение (3.14) в матричной форме примет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -5 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 3 \end{bmatrix} I$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, D = 0 \quad (3.16)$$

Имея матрицы, характеризующие систему, в пакете CST имеется команда `ss`, позволяющая создать модель системы в пространстве состояния (листинг 3.2).

#### Листинг 3.2

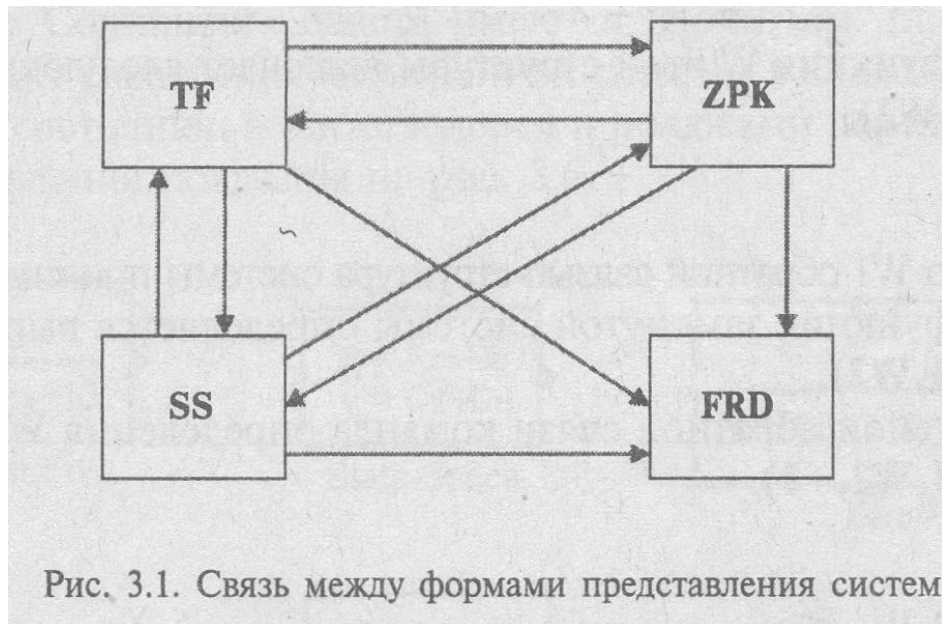
```
A = [0, 1; -5, -2];
B = [0; 3];
C = [1, 0];
D=0;
H=ss (A, B,C,D)
```

Модель в форме `frd` характеризует систему в частотной области. Исходными данными для создания формы `frd` являются модели, представленные формами: `tf`, `zpk` или `ss`. Для получения частотных характеристик на вход системы подается ряд частот и команда `frd` определяет стационарную реакцию на эти возмущения. Для работы с моделью в форме `frd` в `m`-файле следует записать программу (листинг 3.3), из которой следует, что исходная модель задана в форме `tf`, а тестовые сигналы задаются вектором `Freq`

#### Листинг 3.3

```
h1=tf([1,0], [1,2,10]); % Модель системы в форме передаточной функции
Freq=[1:10:1000]; % Диапазон частот входных воздействий
H=frd(h1,Freq) % Значения системной функции в заданном диапазоне
входных воздействий
```

Рассмотренные формы математического представления объектов управления в Control System Toolbox образуют класс линейных систем с постоянными параметрами (ЛТИ-объекты).



Все перечисленные формы представления связаны между собой. Эта связь показана на рис. 3.1

В пакете CSTимеются команды, позволяющие получать математическое описание сложных систем по их структурным схемам.

Структурная схема последовательного соединения представлена на рис. 3.2. Передаточная функция этого соединения  $W$  определяется следующими командами:  **$W=series(W1, W2)$**  или  **$W=W2*W1$** .



При определении передаточных функций последовательно соединенных звеньев следует учитывать обратный порядок сомножителей в операции умножения и на структурной схеме.

Параллельное соединение звеньев показано на рис. 3.3.

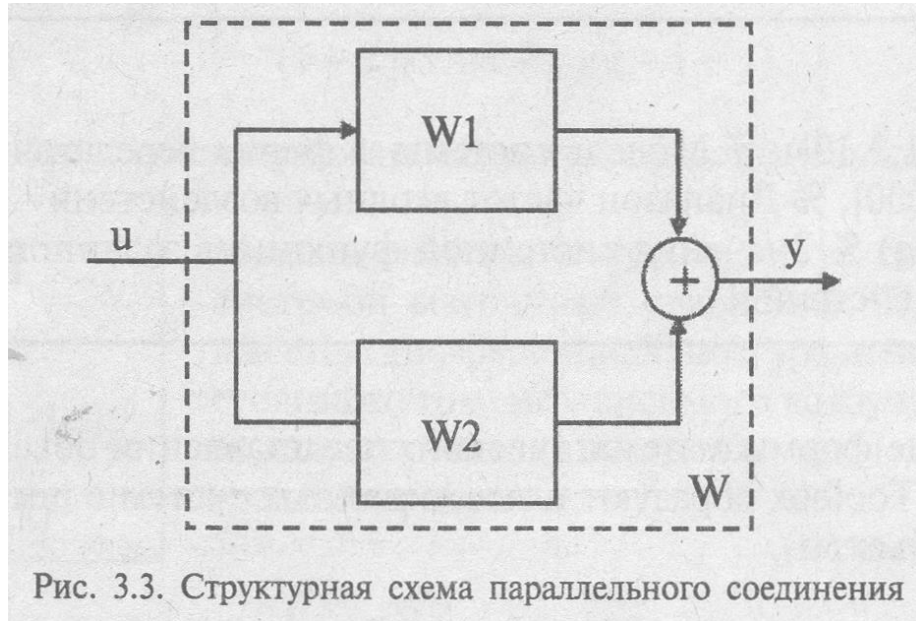


Рис. 3.3. Структурная схема параллельного соединения

Передаточная функция  $W$  этой структуры включает следующие команды:  **$W = \text{parallel}(W1, W2)$** ,

или

$$W = W2 + W1.$$

При охвате звена  $W1$  обратной связью структура системы принимает вид (рис. 3.4). Передаточная функция замкнутой системы определяется выражением:  **$W = \text{feedback}(W1, W2)$** .

При положительной обратной связи команда определения  $W$  изменяется:  **$W = \text{feedback}(W1, W2, +1)$** .

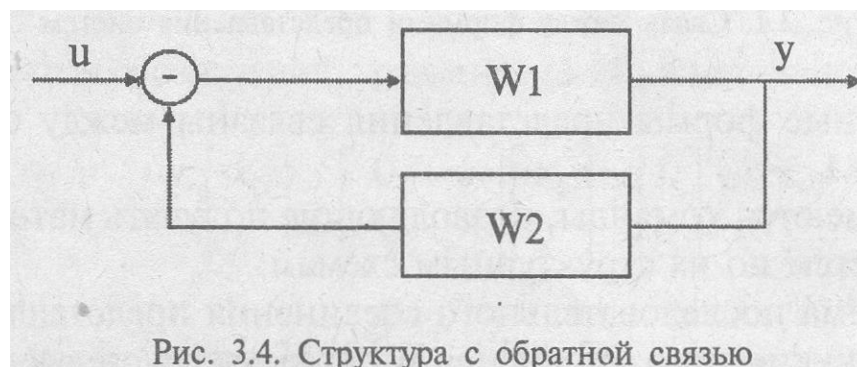


Рис. 3.4. Структура с обратной связью

## 2. Представление математического описания объектов управления мехатронных систем в пакете Simulink

Создание моделей LTI - объектов возможно непосредственно в среде Simulink. Для этого в библиотеке ControlSystemToolbox имеется блок LTISystem, который необходимо поместить в Simulink-модель (рис. 3.5), а в окне параметров блока записать нужную форму динамической модели. В дальнейшем этот блок может быть использован как часть более сложной Simulink-модели.

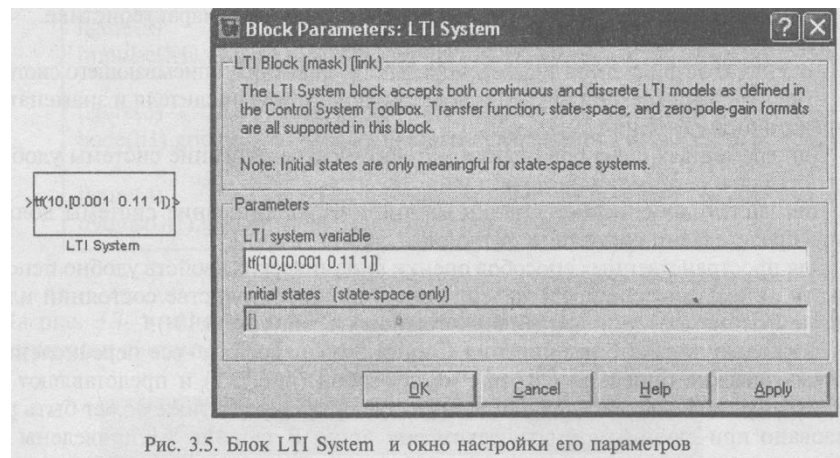


Рис. 3.5. Блок LTI System и окно настройки его параметров

В библиотеке Continuous пакета имеются блоки (см. гл. 2), позволяющие представить объект управления мехатронной системы в виде передаточной функции, уравнений состояния, а также нулями и полюсами передаточной функции. Все эти представления показаны на рис. 3.6.

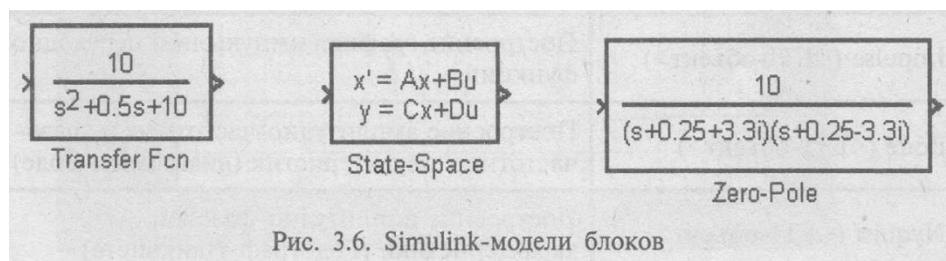


Рис. 3.6. Simulink-модели блоков

### 3. Динамические характеристики объектов управления в ControlSystemToolbox

Динамические характеристики линейных систем оцениваются различными способами. Наиболее распространенными способами

оценки динамических свойств системы являются временные, частотные и пространственные.

Временные способы включают в себя:

- оценку динамических свойств по переходному процессу на ступенчатый входной сигнал;
- оценку динамических свойств по переходному процессу на импульсный входной сигнал.

Частотные способы включают в себя:

- оценку динамических свойств по амлитудно-частотной характеристике;
- оценку динамических свойств по фазо-частотной характеристике;
- оценку динамических свойств по амлитудно-фазовой характеристике.

Пространственные способы включают в себя:

- оценку коэффициентов дифференциального уравнения, описывающего систему;
- оценку распределения нулей и полюсов полиномов числителя и знаменателя передаточной функции.

Для временных способов оценки математическое описание системы удобней представлять передаточной функцией.

Для частотных способов оценки математическое описание системы должно быть представлено системной функцией.

Для пространственных способов оценки динамических свойств удобно использовать математическое представление системы в пространстве состояний или в форме полиномов, записанных виде сомножителей (ур-е 3.10 ).

Поскольку в пакете расширения ControlSystemToolbox все перечисленные математические описания связаны между собой (рис. 3.1) и представляют так называемые LTI-объекты, то получение любой характеристики может быть реализовано при любом математическом

описании. В таблице 3.1 приведены команды для получения перечисленных характеристик, а в листинге 3.4 представлена программа их построения для случая описания системы передаточной функцией.

Синтаксис	Описание
Step (<LTI-объект>)	Построение графика переходного процесса
Impulse (<LTI-объект>)	Построение графика импульсной переходной функции
Bode (<LTI-объект>)	Построение амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик (диаграммы Боде)
Nyquist (<LTI-объект>)	Построение амплитудно-фазовой характеристики (Годограф Найквиста)
Pole (<LTI-объект>)	Вычисление полюсов передаточной функции
Zero (<LTI-объект>)	Вычисление нулей передаточной функции

Таблица 3.1

В результате выполнения программы MATLAB строит соответствующие характеристики.

**Листинг 3.4.**

```

h1=tf([1,10],[1,0.5 10]); %Передаточная функция объекта.

figure(1) %Построение переходной
step(h1),grid on %характеристики объекта.

figure(2) %Построение импульсной
impulse(h1),grid on %характеристики объекта.

figure(3) %Построение амплитудно-частотной и
bode(h1),grid on %фазо-частотной характеристик объекта.

figure(4) %Построение амплитудно-фазовой
nyquist(h1),grid on %характеристики объекта.
    
```

На рис. 3.7, в качестве примера, показаны логарифмические частотные характеристики системы.

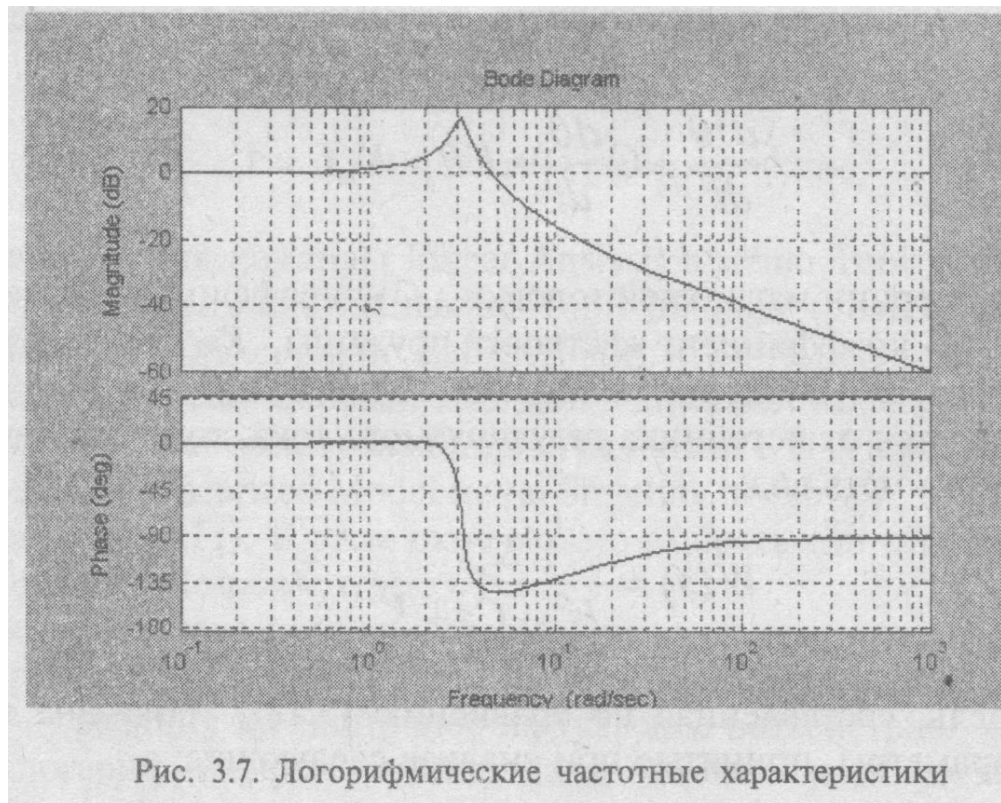


Рис. 3.7. Логорифмические частотные характеристики

### Динамические характеристики объектов управления мехатронных систем в пакете Simulink

Ранее было показано, что система может быть представлена либо передаточной функцией, либо тройкой {нули, полюсы, обобщенный коэффициент передачи}, либо четверкой {A, B, C, D} для моделей в пространстве состояний. Все эти объекты пакета расширения ControlSystemToolbox образуют класс линейных систем с постоянными параметрами (LTI-объекты).

Для анализа динамических характеристик в состав ControlSystemToolbox включено специальное средство просмотра - обозреватель для линейных систем с постоянными параметрами (LTI-Viewer), реализованное на основе графического интерфейса GUI.

Вызов обозревателя осуществляется из Simulink-модели при выполнении команды LinearAnalysis в меню Tools/ControlDesign. Для осу-

ществления анализа на вход и выход системы должны быть подсоединены входной (In) и выходной (Out) порты.

Рассмотрим анализ некоторых объектов управления в мехатронных системах при использовании обозревателя LTI-Viewer.

**Пример 3.1.** Система управления устройством чтения-записи жесткого диска компьютера.

Схема, поясняющая работу устройства, приведена на рис. 3.8.

Дифференциальное уравнение, описывающее динамику движения магнитной головки записи-считывания жесткого диска, записывается в следующем виде [14]:

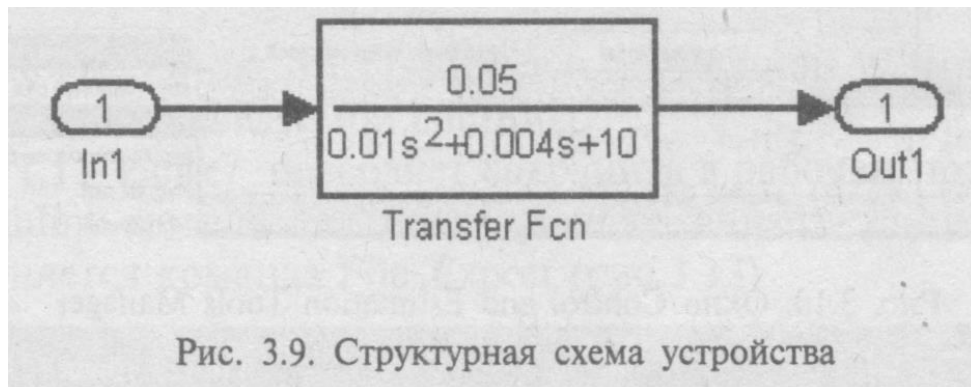
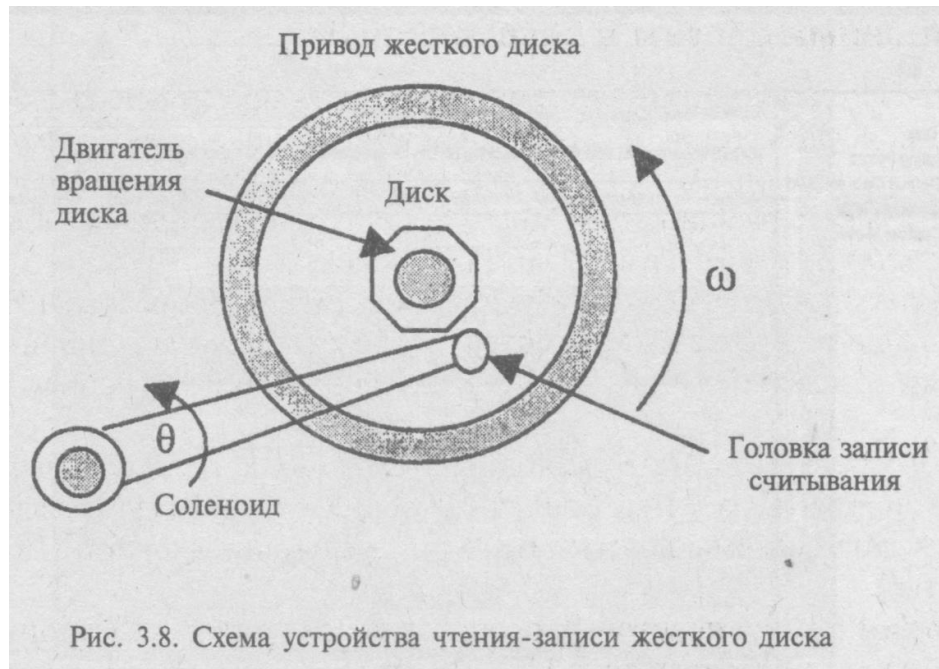
$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} + K\theta = K_m i, \quad (3.17)$$

где  $J$  — момент инерции магнитной головки,  $C$  — коэффициент вязкого трения в подшипниках,  $K$  — коэффициент жесткости пружины,  $K_m$  — моментный коэффициент двигателя,  $\theta$  — угловое положение головки,  $i$  — ток двигателя. Если двигатель управляется от источника регулируемого тока, то передаточная функция системы будет иметь вид:

$$W(s) = \frac{K_m}{Js^2 + Cs + K}, \quad (3.18)$$

Simulink-модель, составленная по уравнению (3.18), показана на рис. 3.9 (файл *Disk*) Параметры, принятые при анализе следующие:

$$J = 1 \cdot 10^{-2} (\text{кг}\cdot\text{м}^2), C = 4 \cdot 10^{-3} (\text{Нмс}), K = 10 (\text{Нм}), K_m = 5 \cdot 10^{-2} (\text{Нм}/\text{А})$$



После выполнения команды `Linear Analysis` в меню `Tools/Control Design` открывается окно `Control and Estimation Tools Manager` (рис. 3.10).

В выпадающем списке можно выбрать одну из динамических характеристик и затем осуществить анализ модели кнопкой (`Linearize-Model`).

Для получения нескольких характеристик в окне `LTI-Viewer` следует инициировать опцию `Get Linearized Model` меню `Simulink` после чего откроется окно `Plot Configuration` (рис. 3.11). В этом окне можно выбрать тип отображаемых характеристик в области `Response type`.

При анализе системы доступны следующие виды динамических характеристик:

- Step— реакция на единичное ступенчатое воздействие.
- Impulse— реакция на единичное импульсное воздействие.
- Bode— логарифмические амплитудная и фазовая частотные характеристики.
- BodeMagnitude— логарифмическая амплитудная частотная характеристика.
- Nyquist — диаграмма Найквиста.
- Nicholse — годограф Николса.
- Sigma — сингулярные числа.
- Pole/Zero— нули и полюса системы.

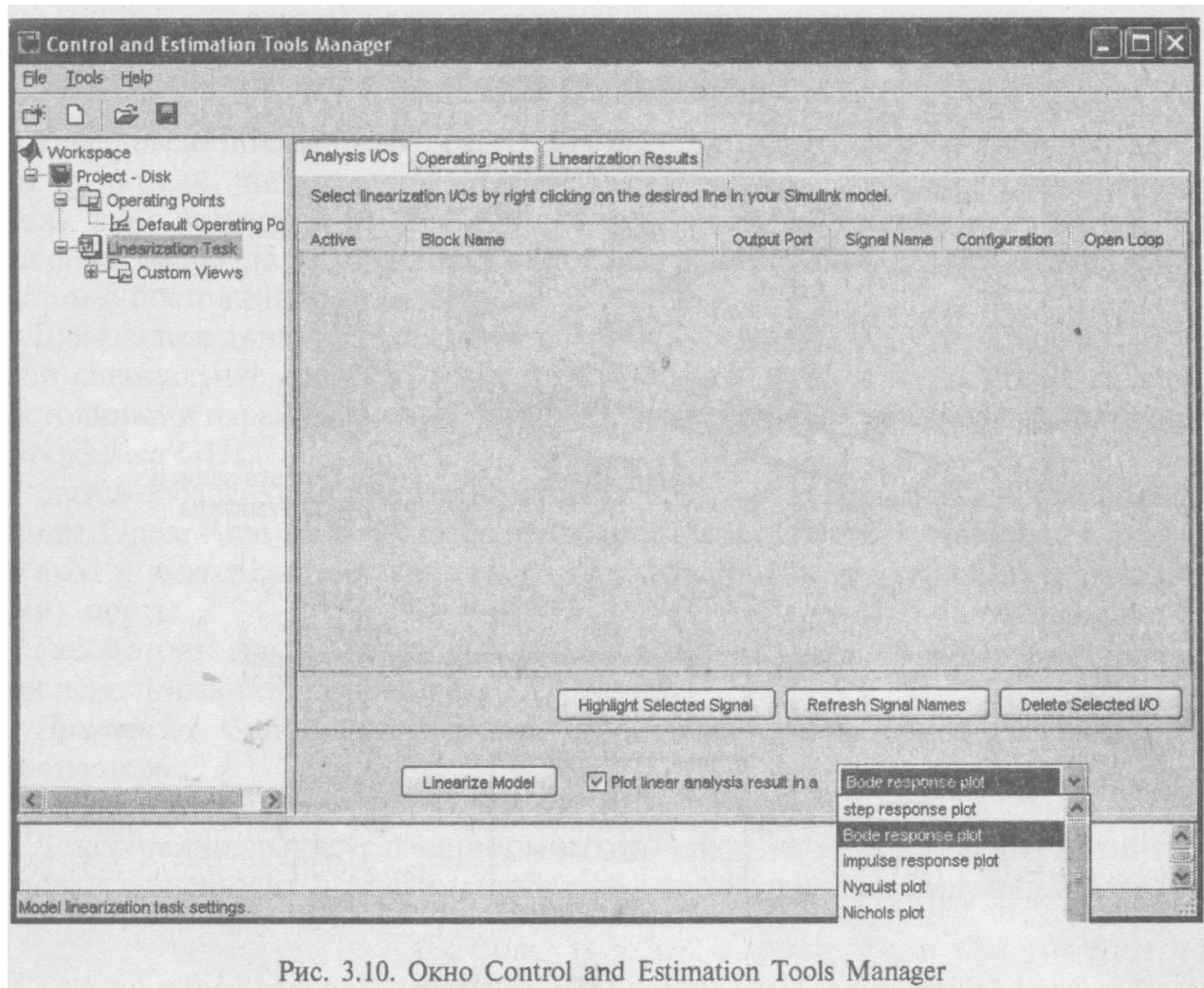


Рис. 3.10. Окно Control and Estimation Tools Manager

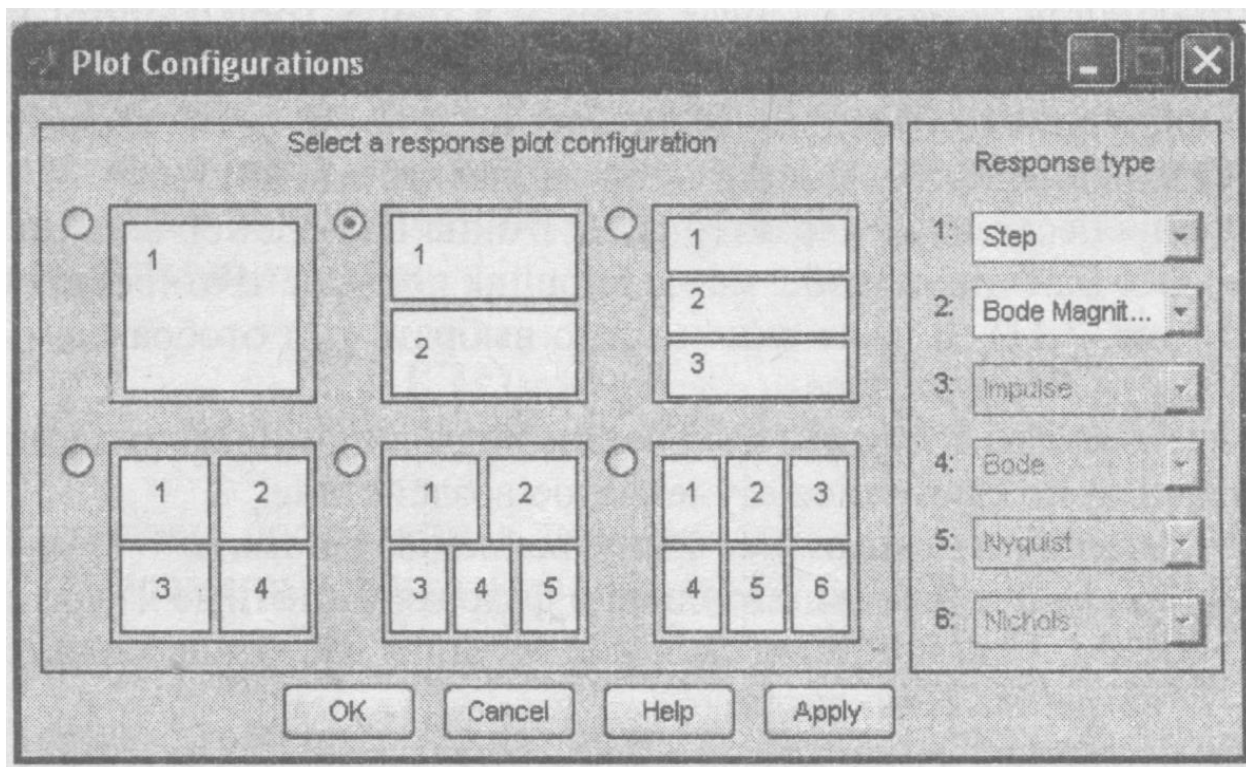


Рис. 3.11. Окно Plot Configuration

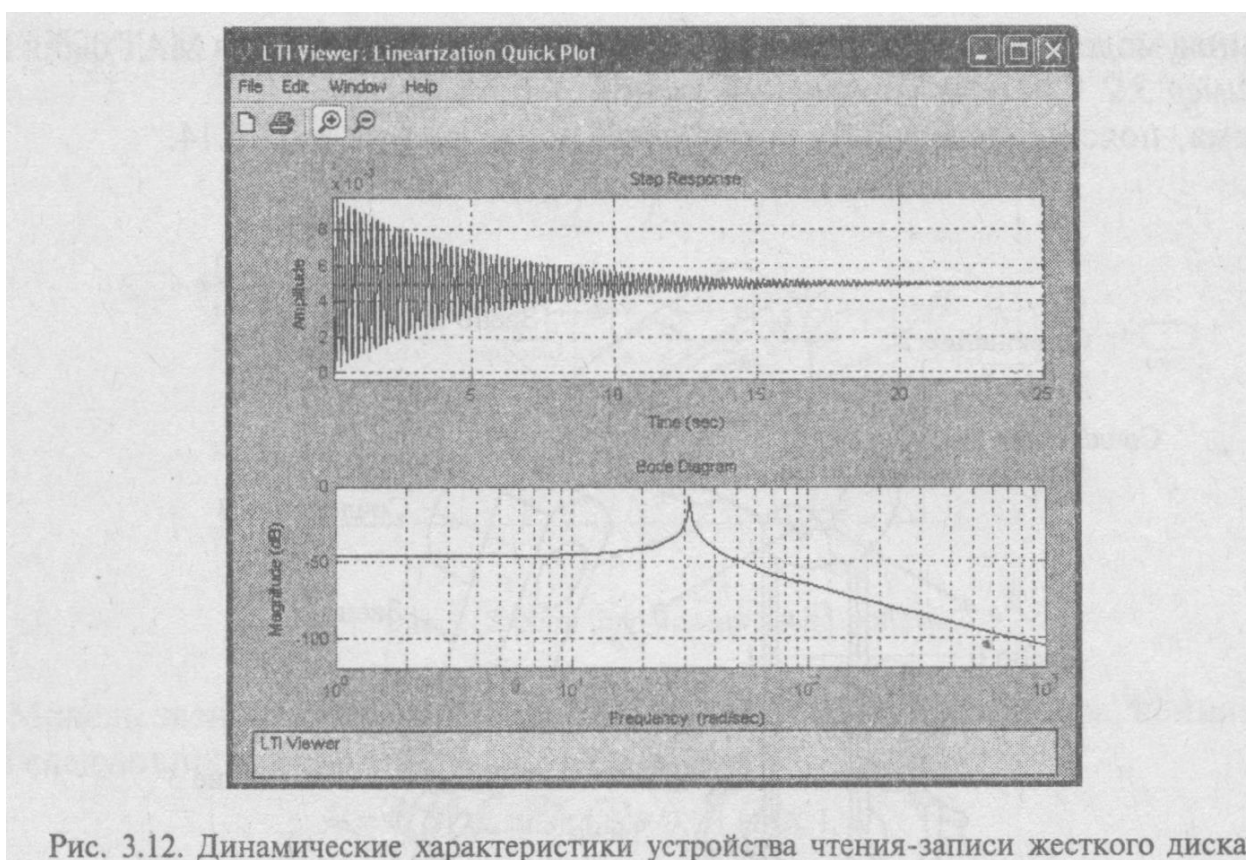


Рис. 3.12. Динамические характеристики устройства чтения-записи жесткого диска

На рис. 3.12 показано окно LTI-Viewers переходной и амплитудно-частотной характеристиками исследуемой системы.

Обозреватель LTI-Viewer позволяет сохранить в рабочем пространстве или в MAT-файле Simulink-модель для последующего синтеза системы управления. Для этого выполняется команда File\Export(рис.3.13)

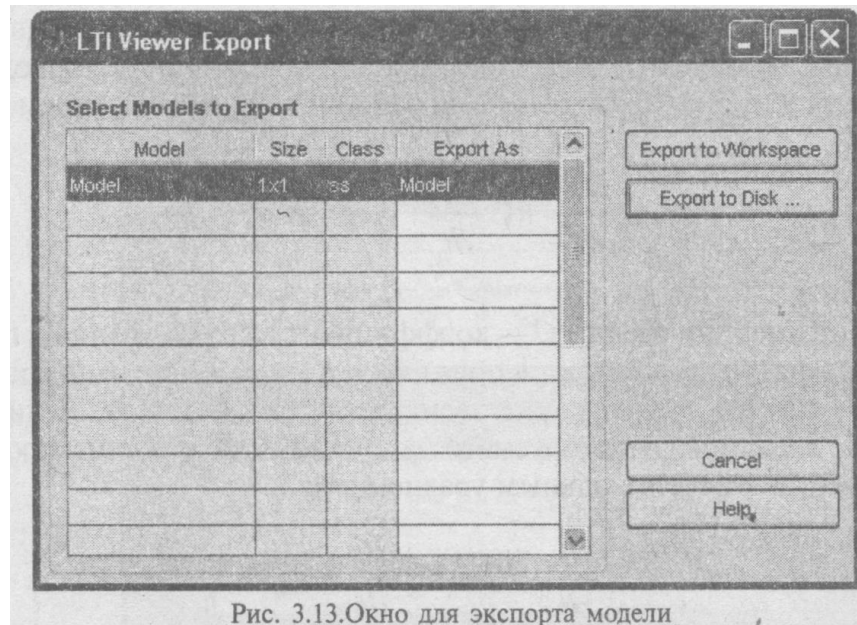


Рис. 3.13.Окно для экспорта модели

При этом Simulink-модель преобразуется в модель пространства состояния (ss- модель). При экспорте модели в файл на диске открывается стандартное Windows- окно, в котором нужно задать название файла и выбрать папку для его сохранения.

Данная модель экспортирована для дальнейших исследований в MAT файл Disk. *Пример 3.2.* Система управления звеном робота [21].Схема, поясняющая работу устройства, приведена на рис. 3.14.

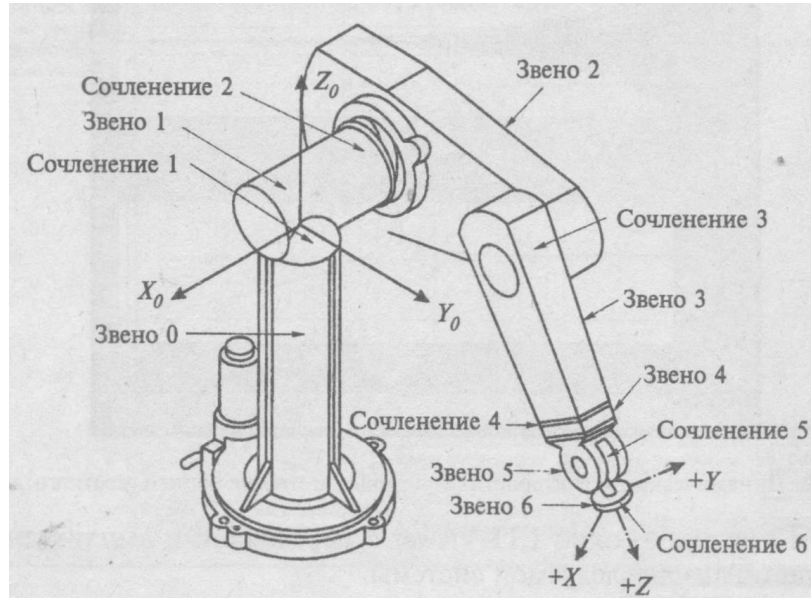


Рис. 3.14. Схема робота

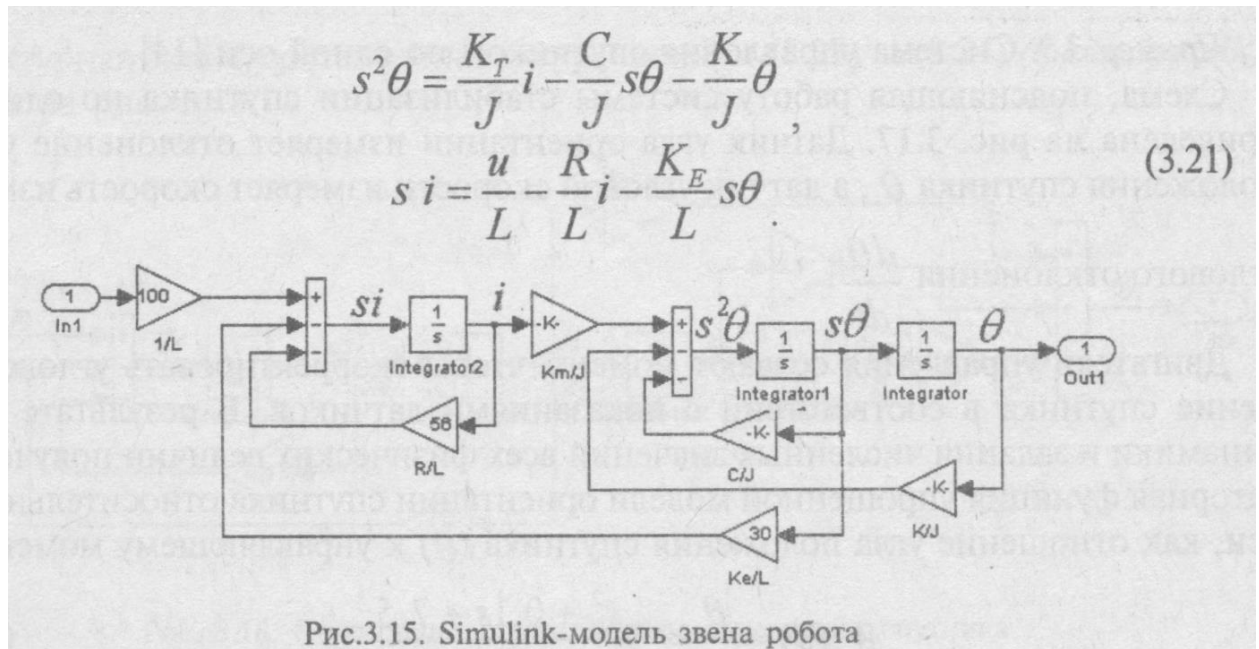
Дифференциальное уравнение, описывающее динамику движения одного звена робота без учета влияния других звеньев, записывается в следующем виде:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + C \frac{d\theta}{dt} + K\theta = K_T i \quad , \quad (3.19)$$

где  $J$  — момент инерции звена,  $C$  — коэффициент вязкого трения в подшипниках,  $K$  — коэффициент жесткости пружины,  $K_T$  — моментный коэффициент двигателя,  $\theta$  — угловое положение звена,  $i$  — ток двигателя. Если двигатель управляется от источника регулируемого напряжения, то его динамика описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + K_E \frac{d\theta}{dt} = u, \quad (3.20)$$

где  $L$  — индуктивность обмотки якоря двигателя,  $R$  — активное сопротивление обмотки якоря двигателя,  $K_E$  — скоростной коэффициент двигателя. Операторное представление уравнений (3.19) (3.20) запишется в виде:



Модель звена робота (рис. 3.15) (*файл Robot*) построена по уравнениям (3.21) для следующих параметров:

$$J = 0,8(\text{кг}\cdot\text{м}^2), C = 0,3(\text{Нм}\cdot\text{с}),$$

$$K = 35(\text{Нм}), K_T = K_E = 0,4(\text{Нм} / \text{А}, \text{Вс}),$$

$$L = 0,01(\text{Г}), R = 0,56(\text{Ом})$$

Переходная и амплитудно-частотная характеристики модели представлены на рис. 3.16.

Экспорт модели для последующего синтеза системы управления осуществляются описанным выше способом в **МАТ-файл** Robot.

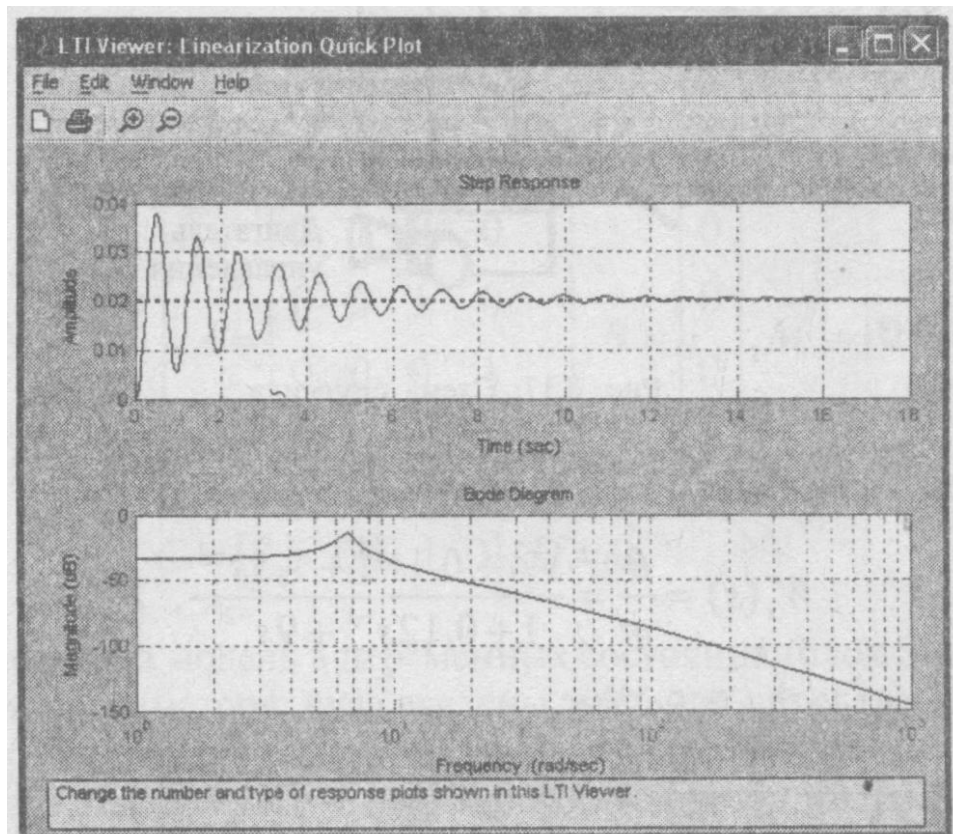


Рис. 3.16. Динамические характеристики звена робота

*Пример 3.3.* Система управления спутником по одной оси [14].

Схема, поясняющая работу системы стабилизации спутника по одной оси, приведена на рис. 3.17. Датчик угла ориентации измеряет отклонение углового положения спутника  $\theta$ , а датчик угловой скорости измеряет скорость изменения углового отклонения  $\frac{d\theta}{dt}$ .

Двигатели управления создают момент, чтобы скорректировать угловое положение спутника в соответствии с показаниями датчиков. В результате анализа динамики и задания численных значений всех физических величин получена операторная функция упрощенной модели ориентации спутника относительно одной оси, как отношение угла положения спутника ( $\theta$ ) к управляющему моменту ( $m$ ):

$$W_s(s) = \frac{\theta}{m} = \frac{s^{2\theta} + 0,1s + 7,5}{s^4 + 0,12s^3 + 9s^2}. \quad (3.22)$$

Передаточная функция (3.22) может быть представлена одним блоком и исследована (например, как на рис. 3.9). Однако далее рассмотрим переход от передаточной функции к уравнениям пространства состояния.

Существует несколько способов преобразования операторной функции в уравнения пространства состояний. Ниже рассмотрен способ прямого программирования.



Рис. 3.17. Схема спутника

Преобразуем выражение (3.22) к виду:

$$W_s(s) = \frac{\theta}{m} = \frac{s^{-2} + 0,1s^{-3} + 7,5s^{-4}}{1 + 0,12s^{-1} + 9s^{-2}}, \quad (3.23)$$

откуда  $\theta = (s^{-2} + 0,1s^{-3} + 7,5s^{-4})e$ ,

где  $e = \frac{m}{1 + 0,12s^{-1} + 9s^{-2}}$  или  $e = m - 0,12s^{-1}e - 9s^{-2}e$  (3.24)

Структурная схема, составленная по уравнениям (3.23) и (3.24) (**файл *Sputnik***), показана на рис. 3.18.

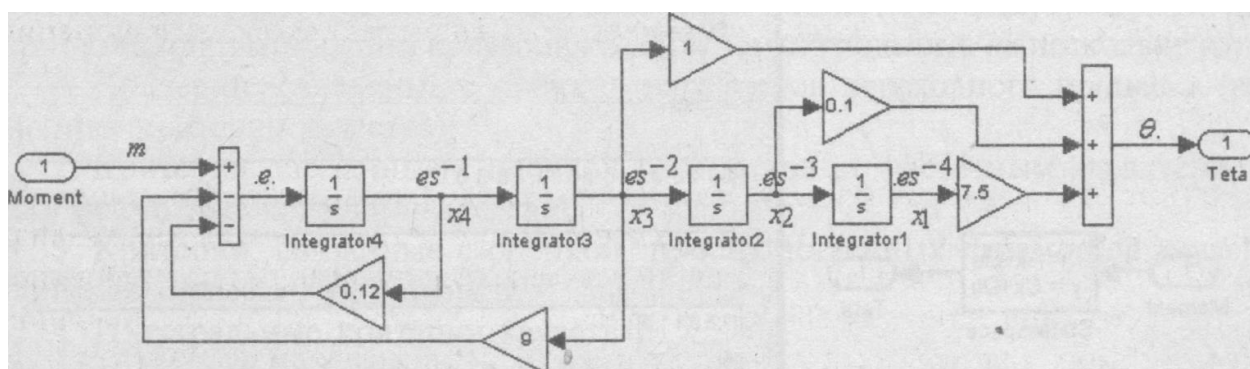


Рис. 3.18. Структурная схема системы ориентации спутника

В соответствии с этой структурной схемой запишем уравнения пространства состояния системы

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= x_3 \\
 \dot{x}_3 &= x_4 \\
 \dot{x}_4 &= -9x_3 - 0,12x_4 + m \\
 \theta &= 7,5x_1 + 0,1x_2 + x_3
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

или

$$\begin{aligned}
 \dot{X} &= AX + BM, \\
 Y &= CX + D\Theta,
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

где

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 9 & -0,12 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, M = [0 \ 0 \ 0 \ m],$$

$$C = [7,5 \ 0,1 \ 1 \ 0], D = 0.$$

На рис. 3.19 показана модель в переменных состояния (блок State-Spacепакета Simulink) и окно параметров, куда введены значения определенных выше матриц. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики системы, полученные при использовании LTI-Viewer, представлены на рис. 3.20.

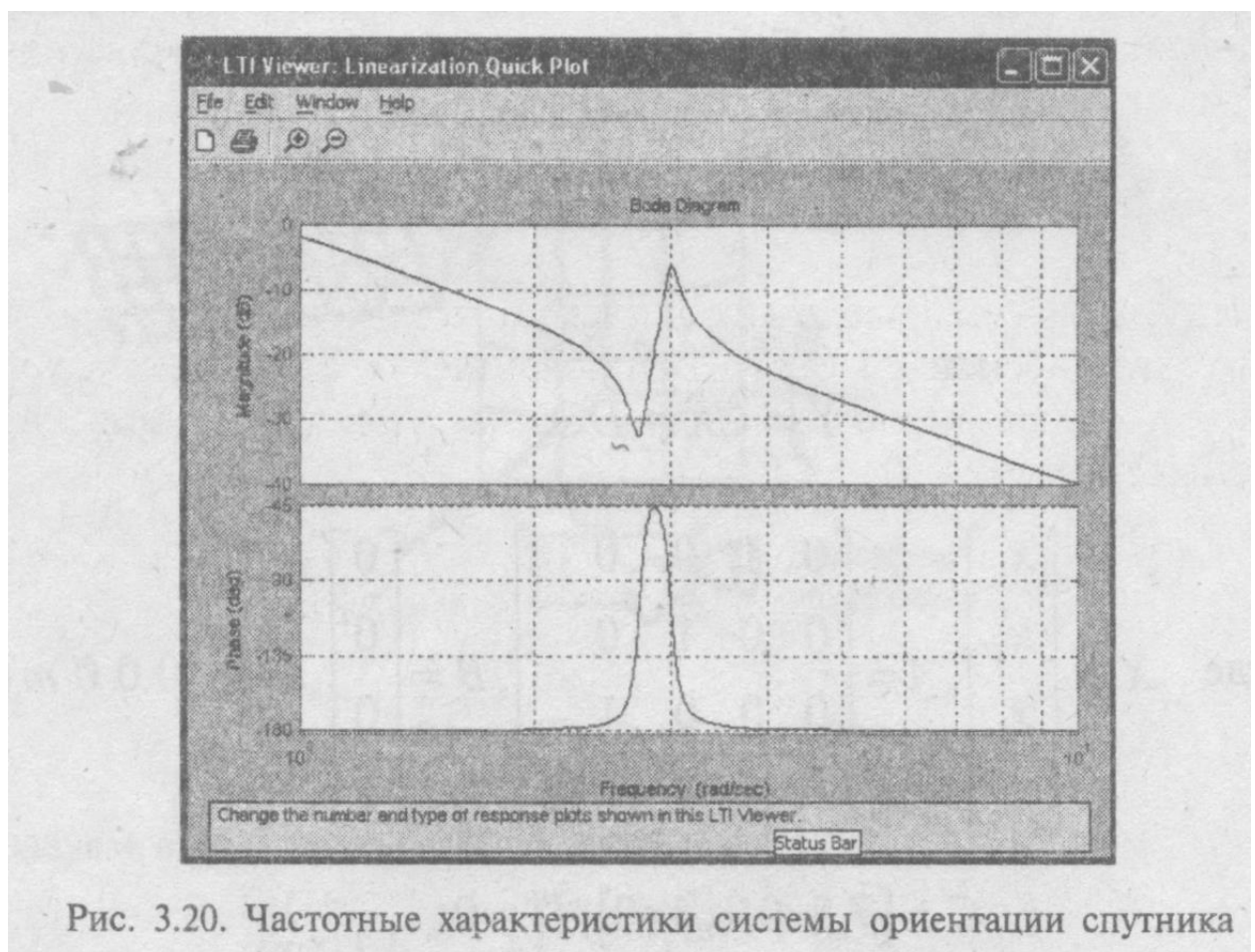


Рис. 3.20. Частотные характеристики системы ориентации спутника

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.2.2. АКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПАКЕТЕ SIM POWER SYSTEM

### ВОПРОСЫ

1. DC Voltage Source. Идеальный источник постоянного напряжения.
2. DC Voltage Source. Идеальный источник переменного (синусоидального) напряжения.
3. AC Current Source. Идеальный источник переменного (синусоидального) тока.
4. Controlled Voltage Source. Управляемый источник напряжения.  
Controlled Current Source. Управляемый источник тока.
5. 3-Phase Source. Трехфазный источник синусоидального напряжения.

### ЛИТЕРАТУРА

3. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. DC Voltage Source. Идеальный источник постоянного напряжения

Блок вырабатывает постоянное по уровню напряжение. Пиктограмма и окно настройки блока приведены на рис. 4.7. В полях окна настройки параметров задаются: *Amplitude* (V) — амплитуда (В) выходного напряжения источника. *Measurements* — измеряемые переменные. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные, которые затем можно увидеть с помощью блока Scope или

измерить с помощью блока Powergui. Значения параметра выбираются из выпадающего списка:

- *None* — нет переменных для отображения,
- *Voltage* — выходное напряжение источника.

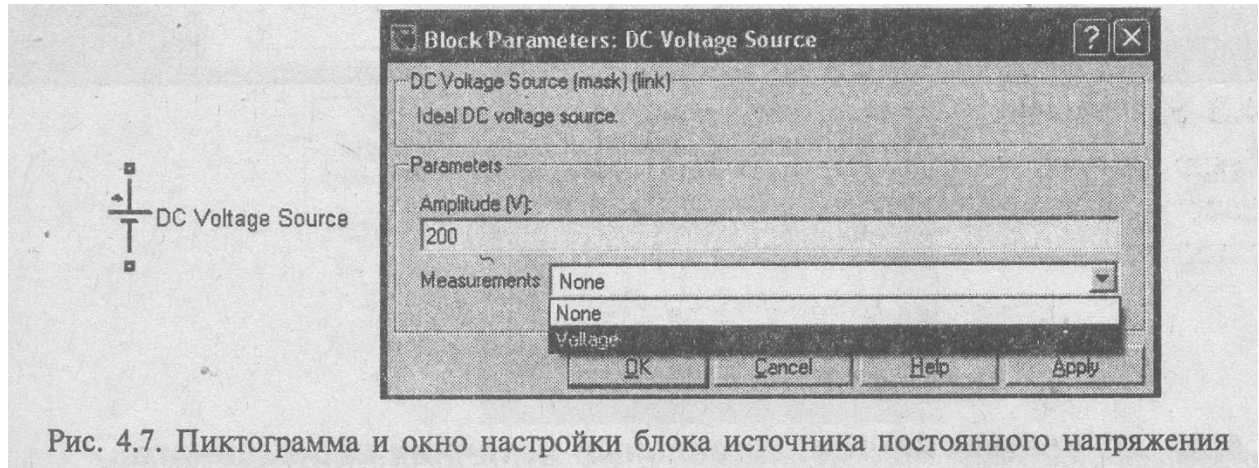


Рис. 4.7. Пиктограмма и окно настройки блока источника постоянного напряжения

Блок является идеальным источником напряжения, т. е. его собственное внутреннее сопротивление равно нулю.

*Пример 4.1.* На рис. 4.8 показан пример включения двух источников постоянного напряжения  $V_1=200\text{В}$ ,  $V_2=300\text{В}$  на общее сопротивление  $R=50\text{ Ом}$  (**файл *El\_Current1***).

В схему модели введены блоки Multimeter и Powergui, измеряющие напряжения источников, напряжение и ток в сопротивлении. Окна блоков с результатами измерений показаны на рис. 4.9.

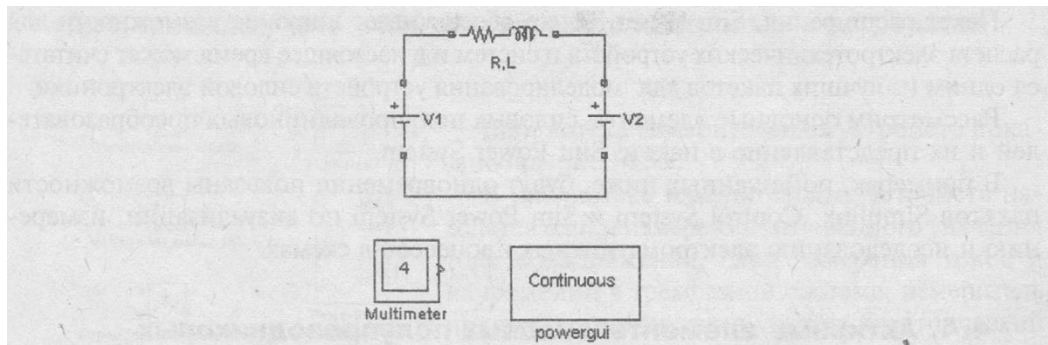


Рис. 4.8. Модель электрической цепи

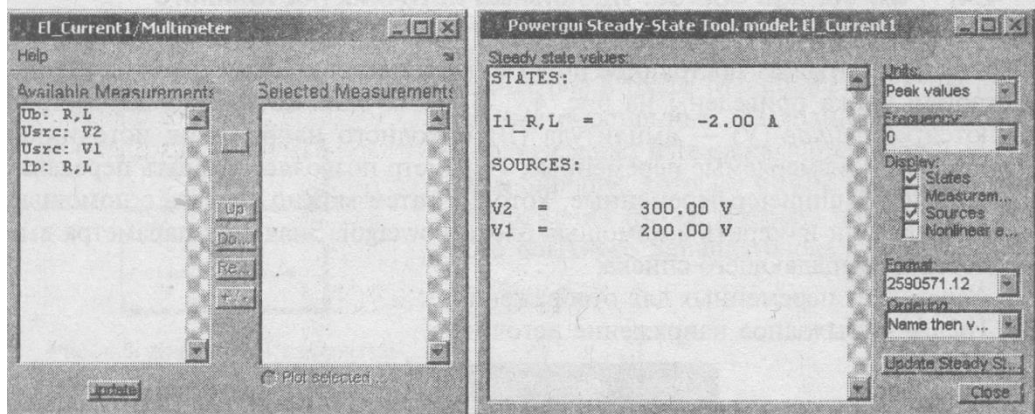


Рис. 4.9. Окна блоков Multimeter, Powergui

## 2. AC Voltage Source. Идеальный источник переменного, (синусоидального) напряжения

Пиктограмма и окно настройки блока приведены на рис. 4.10. В полях окна задания параметров задаются: *Peak Amplitude (V)* — амплитуда выходного напряжения источника; *Phase (deg)* — начальная фаза в градусах; *Frequency (Hz)* — частота источника; *Sample time* — параметр задает шаг дискретизации по времени выходного напряжения источника при создании дискретных моделей; *Measurements* — параметр позволяет выбрать переменные, передаваемые в блок Multimeter.

Блок является идеальным источником напряжения, т. е. его собственное сопротивление равно нулю.

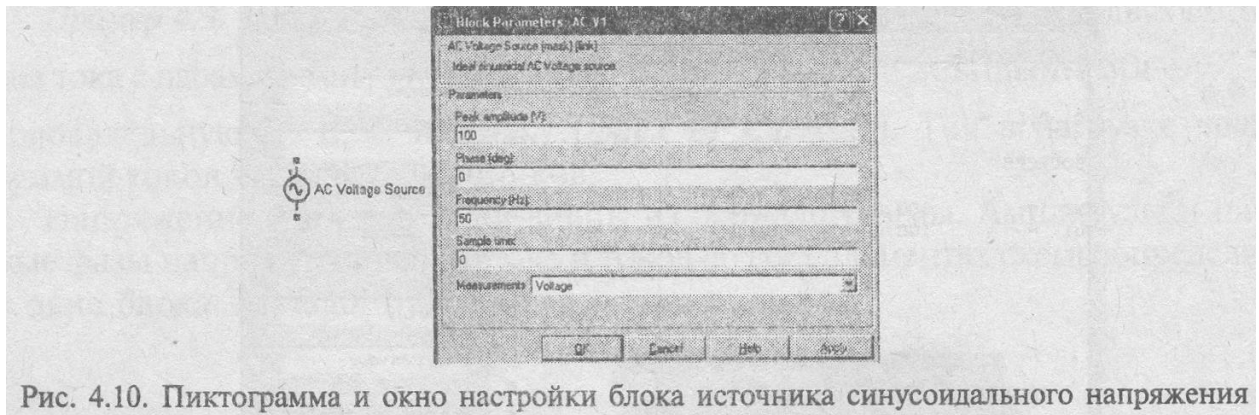


Рис. 4.10. Пиктограмма и окно настройки блока источника синусоидального напряжения

*Пример 4.2.* На рис. 4.11 показана схема последовательного включения двух источников синусоидального напряжения с параметрами  $u_1 = 100 \sin 2\pi * 50t$  и  $u_2 = 100 \sin(2\pi * 50t + \pi/3)$  на катушку индуктивности с параметрами  $R = 3$  Ома,  $L=0,01$  Гн (**файл EI\_Current2**). Напряжение и ток в катушке показаны на осциллограмме. Для наблюдения величин, измеренных блоком Multimeter, необходимо их перенести из поля Available Measurements в поле Selected Measurements(рис. 4.9).

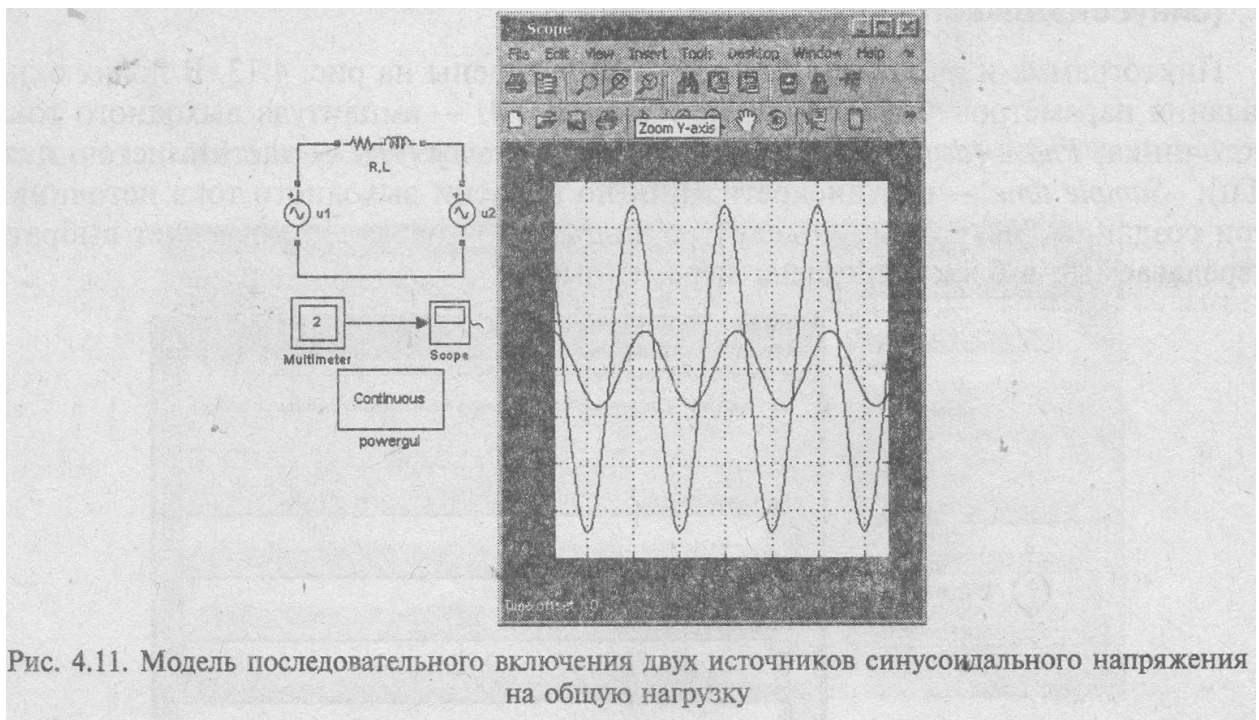


Рис. 4.11. Модель последовательного включения двух источников синусоидального напряжения на общую нагрузку

*Примечание.* Блок Scope из основной библиотеки Simulink имеет черное поле экрана. Для того чтобы иметь возможность редактировать

цвет экрана, цвет и толщину линий осциллограмм, необходимо в рабочем пространстве Matlab набрать и выполнить команды:

***set(0, 'ShowHiddenHandles On') set(gcf, 'menubar 'figure ).***

В этом случае в окне блока появится панель инструментов, позволяющая редактировать экран и осциллограммы.

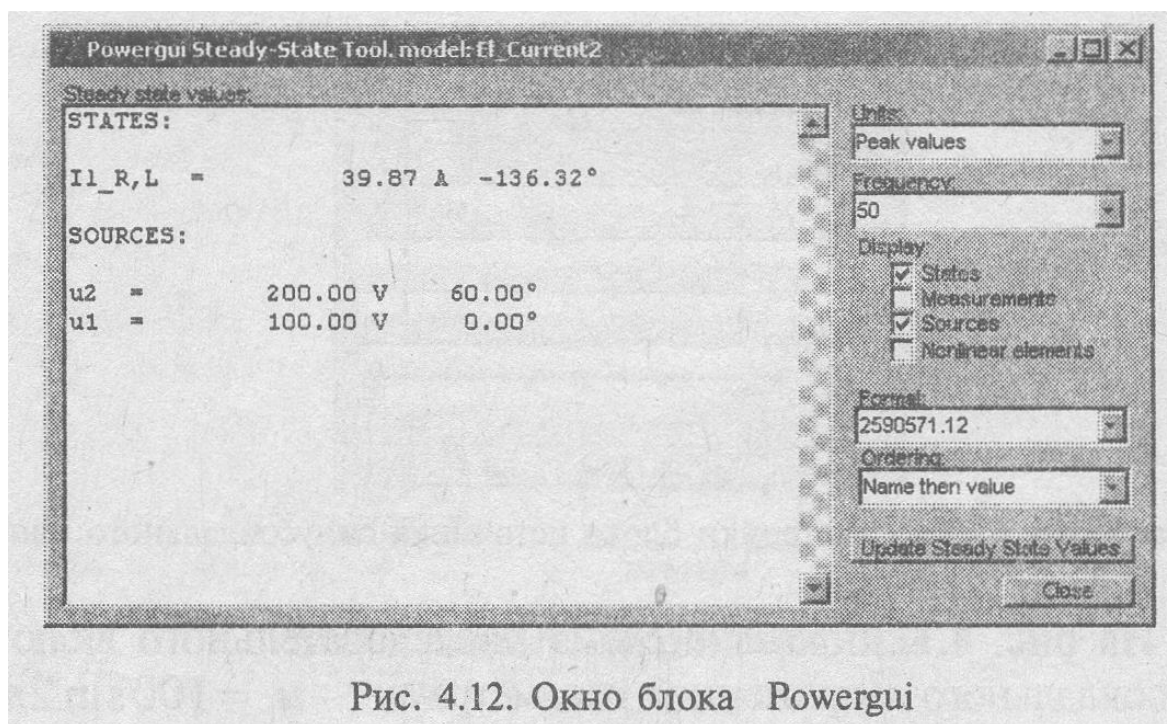


Рис. 4.12. Окно блока Powergui

Измеренные блоком Powergui амплитуды и начальные фазы на всех элементах модели определяются в окне этого блока (рис. 4.12).

### **3. AC Current Source. Идеальный источник переменного (синусоидального) тока**

Пиктограмма и окно настройки блока приведены на рис. 4.13. В полях окна задания параметров задаются: *Peak Amplitude (A)* — амплитуда выходного тока источника; *Phase (deg)* — начальная фаза; *Frequency (Hz)* — частота источника. (Гц); *Sample time* — шаг дискретизации по времени выходного тока источника при создании дискретных моделей; *Measurements* — параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные.

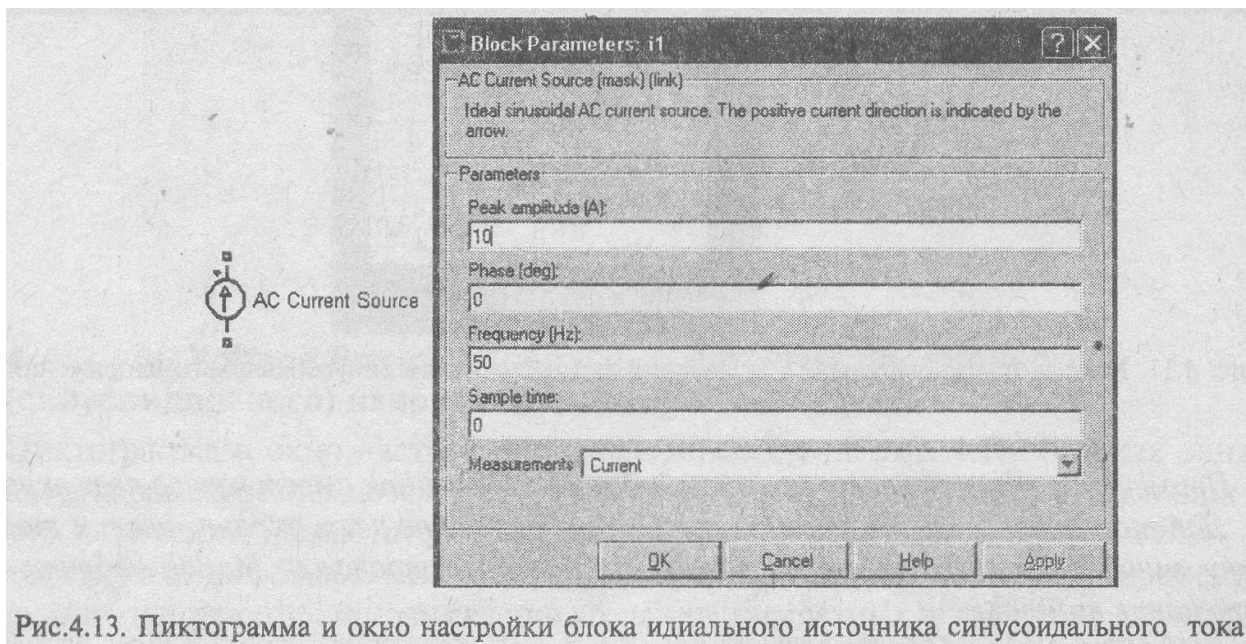


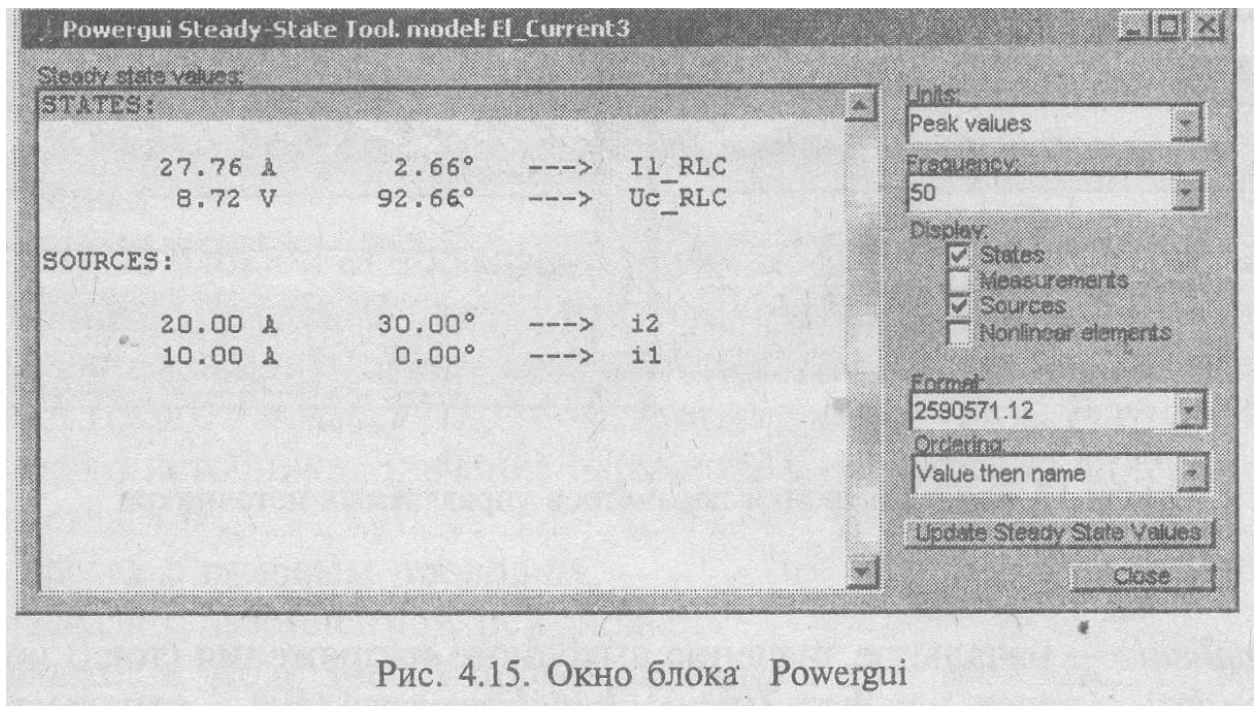
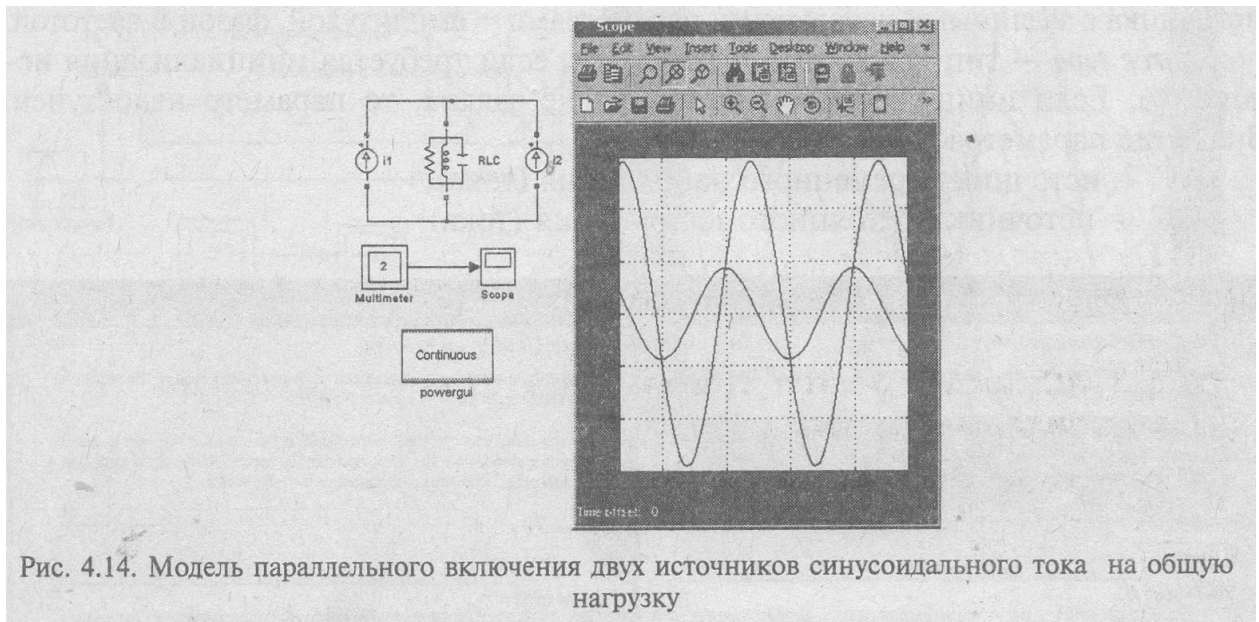
Рис.4.13. Пиктограмма и окно настройки блока идеального источника синусоидального тока

Блок является идеальным источником тока, т. е. его собственное сопротивление равно бесконечности. Не допускается включение параллельно блоку индуктивности без добавочных параллельно включенных R или C.

**Пример 4.3.** На рис. 4.14 показана схема, моделирующая работу двух источников тока с параметрами  $i_1 = 10\sin 2\pi * 50t$  и  $i_2 = 20\sin(2\pi * 50t + \pi/6)$  на

параллельную R, L, C нагрузку (**файл EI\_Current3**). Ток в нагрузке является суммой токов этих двух источников.

Напряжение и ток нагрузки видны из осциллограммы. Амплитуды и начальные фазы напряжения на нагрузке и токов во всех элементах схемы определяются в окне блока Powergui (рис. 4.15).



#### 4. Controlled Voltage Source. Управляемый источник напряжения. Controlled Current Source. Управляемый источник тока

Пиктограммы блоков показаны на рис. 4.16. Блоки вырабатывают напряжение (ток) в соответствии с сигналом управления.

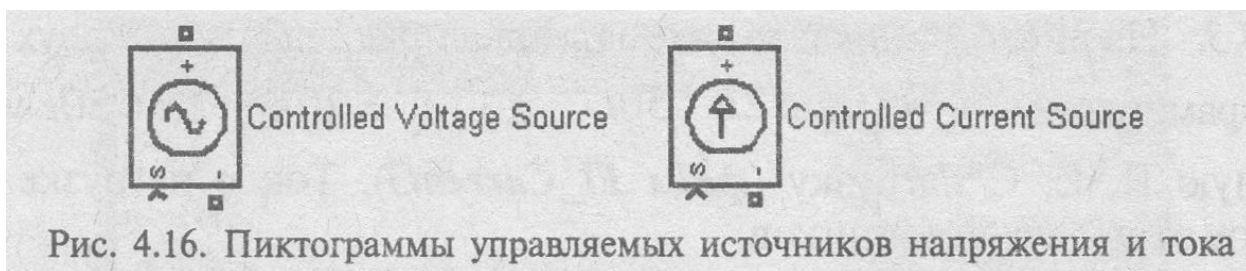


Рис. 4.16. Пиктограммы управляемых источников напряжения и тока

Окна задания параметров блоков показаны на рис. 4.17. В полях окна задаются: *Initialize* - [Инициализация]. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными начальными параметрами — амплитудой, фазой и частотой.

*Source type* — тип источника указывается, если требуется инициализация источника. Если инициализация источника не задана, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- AC — источник переменного напряжения (тока),
- DC — источник постоянного напряжения (тока).

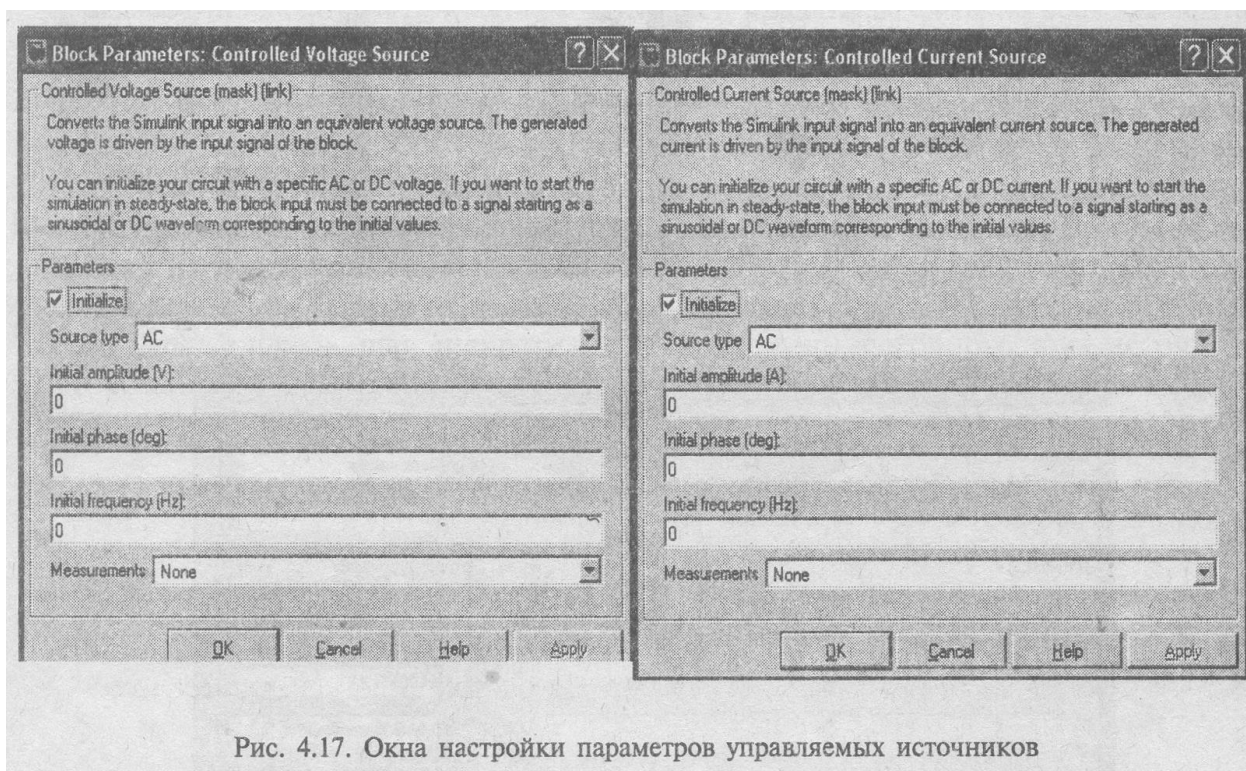


Рис. 4.17. Окна настройки параметров управляемых источников

*Initial amplitude* — начальное значение выходного напряжения (тока) источника. *Initial phase (deg)* — начальная фаза (град). *Initial frequency (Hz)* — начальная частота источника (Гц). *Measurements* — измеряе-

мые переменные. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные.

*Пример 4.4.* На рис. 4.18 показана схема с использованием управляемого источника напряжения и тока, формирующих по сигналу управления синусоидальное напряжение и ток в разветвленной электрической цепи, состоящей из R, L, C элементов (**файл El\_CurrentJ**). На осциллограмме представлены напряжение и ток в параллельной R, L, C ветви.

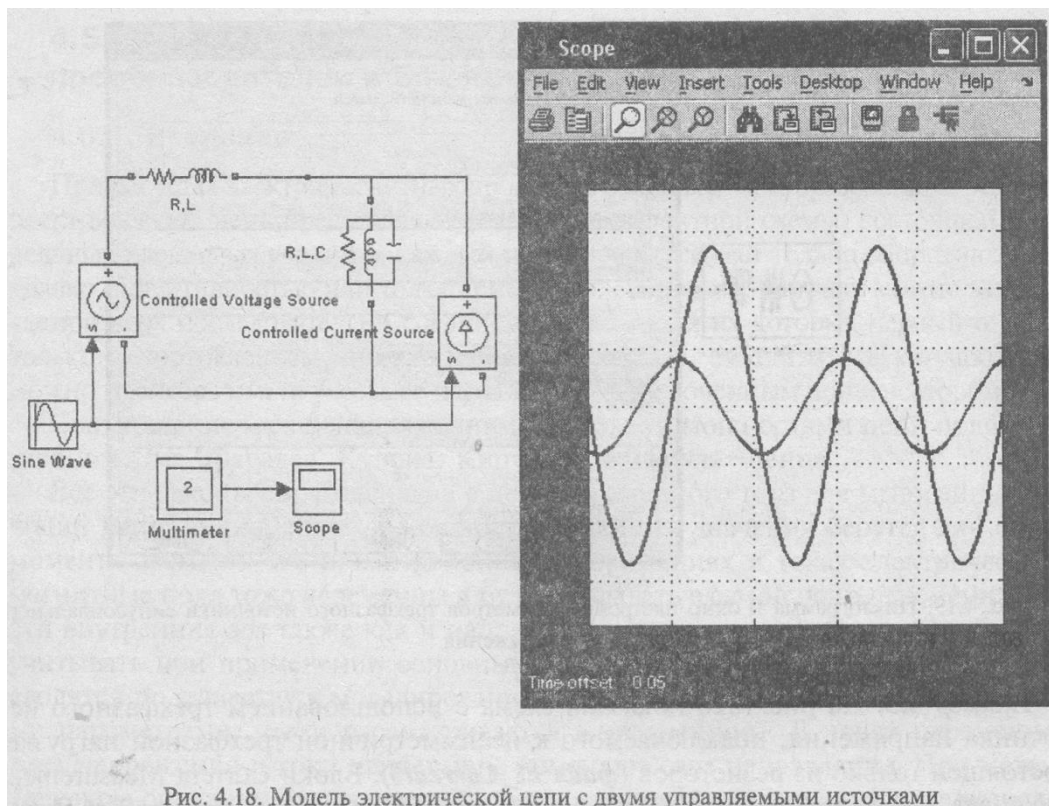


Рис. 4.18. Модель электрической цепи с двумя управляемыми источниками

### 5. 3-Phase Source. Трехфазный источник синусоидального напряжения

Пиктограмма блока и окно Задания параметров показаны на рис. 4.19.

**В** полях окна задаются: *Phase-to-phase rms voltage (V)* — действующее значение линейного напряжения (**В**); *Phase angle of phase A (deg)* — начальная фаза напряжения в фазе А (град); *Frequency (Hz)* —

частота источника (Гц); *Internal connection* — соединение фаз источника. Значение параметра выбирается из списка:

- Y — звезда,
- Yn — звезда с нулевым проводом,
- Yg — звезда с заземленной нейтралью.

Если флажок в поле *Specify impedance using short-circuit level* не установлен, то задаются: внутреннее сопротивление (*Source resistance Ohms*) и индуктивность (*Source inductance H*) источника (рис. 4.19). Если флажок в этом поле установлен, то задаются параметры короткого замыкания источника: *Y-Phase short-circuit level at base voltage (VA)* — мощность короткого замыкания при базовом значении напряжения; *Base voltage (Vrms ph-ph)* — действующее значение линейного базового напряжения; величина базового линейного напряжения источника, при котором определена мощность короткого замыкания; *X/R ratio* — отношение индуктивного и активного сопротивлений.

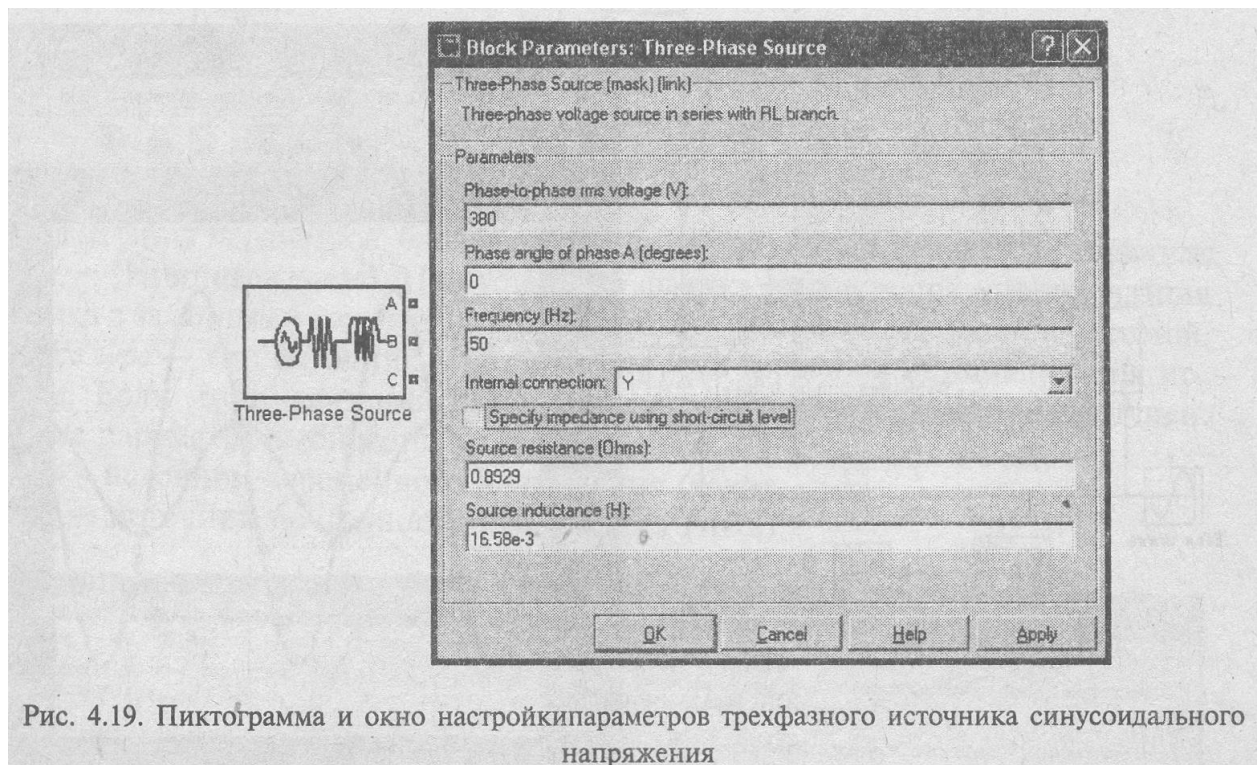


Рис. 4.19. Пиктограмма и окно настройки параметров трехфазного источника синусоидального напряжения

*Пример 4.5.* На рис. 4.20 показана схема с использованием трехфазного источника напряжения, подключаемого к несимметричной трехфазной нагрузке, состоящей только из резисторов (*файл E\_Current5*). Блоки Current Measurement и Voltage Measurement находятся в библиотеке Measurements пакета Sim Power System. Эти блоки не имеют настраиваемых параметров. На осциллограмме представлены напряжение и ток фазы С. Читателю следует задуматься над вопросом, почему в данной электрической цепи при чисто резистивной нагрузке напряжение и ток сдвинуты по фазе?

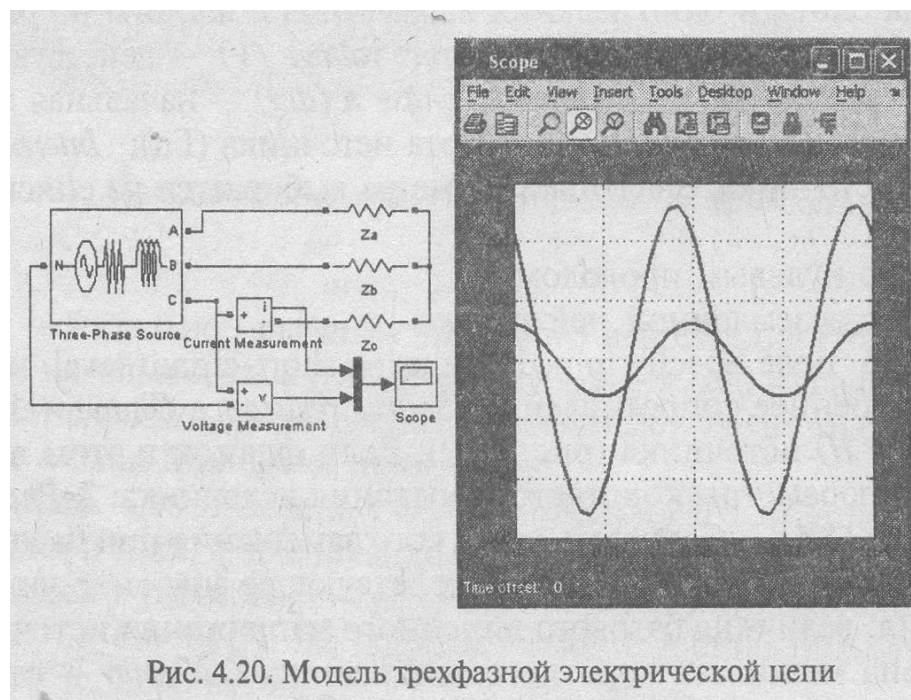


Рис. 4.20. Модель трехфазной электрической цепи

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.2.2. АКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПАКЕТЕ SIM POWER SYSTEM

### ВОПРОСЫ

1. Введение.
2. Series RLC Branch. Последовательная RLC-цепь. Parallel RLC Branch. Параллельная RLC-цепь. 3-Phase Series RLC Branch. Трехфаз-

ная последовательная RLC-цепь. 3-Phase Parallel RLC Branch. Трехфазная параллельная RLC-цепь.

3. Series RLC Load. Последовательная RLC-нагрузка. Parallel RLC Load. Параллельная RLC- нагрузка. 3-Phase Series RLC Load. Трехфазная последовательная RLC- нагрузка. 3-Phase Parallel RLC Load. Трехфазная параллельная RLC- нагрузка.

4. Breaker. Выключатель переменного тока. 3-Phase Breaker. Трехфазный выключатель переменного тока.

5. The Three-Phase Fault block. Трехфазный блок повреждений.

6. Трансформаторы.

7. Three-Phase Transformer (Three Windings). Трехфазный трехобмоточный трансформатор.

## ЛИТЕРАТУРА

4. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. Введение

При расчетах электромагнитных процессов в силовых преобразователях реальную электрическую цепь представляют в виде эквивалентной схемы, состоящей из отдельных идеальных участков, каждый из которых обладает только сопротивлением, только индуктивностью или только емкостью. Например, катушку можно заменить схемой двух последовательно соединенных участков, из которых первый обладает только сопротивлением, второй - индуктивностью, емкостью же катушки часто можно пренебречь или учесть ее параллельно подключенным конденсатором.

Соотношение между напряжениями, токами и мощностями цепи подчинены законом Ома, Фарадея, Кулона, Кирхгофа и Джоуля-Ленца.

Все эти законы справедливы и в цепи переменного тока для мгновенных значений напряжения, токов и мощностей, если эти значения берутся для одного момента времени. Но при переменных напряжениях и токах электрические и магнитные поля тоже переменны и будут создавать в самой цепи переменные ЭДС, эти внутренние ЭДС также как и напряжение, приложенное к цепи, необходимо учитывать при применении основных законов. Таким образом, расчеты цепей сводятся по существу к моделированию эквивалентных схем с сосредоточенными параметрами, что и рассматривается в дальнейшем. В цепях переменного тока напряжения и токи непрерывно изменяют свое направление. При математическом описании электрической схемы составление уравнений осуществляется по законам Ома и Кирхгофа. При этом необходимо задаться произвольным условным направлением напряжений и токов в элементах.

В пакете Sim Power System условные направления токов и напряжений в элементах жестко заданы.

*В горизонтально расположенных элементах за положительное направление тока и напряжения приняты направления слева направо, а в вертикально расположенных— сверху вниз.*

**2. Series RLC Branch. Последовательная RLC-цепь. Parallel RLC Branch. Параллельная RLC-цепь. 3-Phase Series RLC Branch. Трехфазная последовательная RLC-цепь. 3-Phase Parallel RLC Branch. Трехфазная параллельная RLC-цепь**

Пиктограммы пассивных электрических цепей показаны на рис. 4.21.

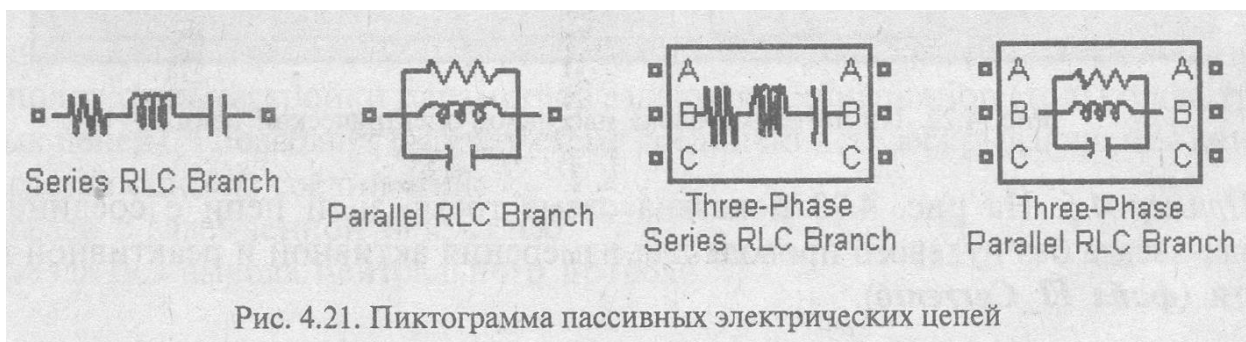


Рис. 4.21. Пиктограмма пассивных электрических цепей

Эти цепи моделируют последовательное или параллельное включение резистора, индуктивности и конденсатора в однофазном или трехфазном симметричном варианте.

Окно задания параметров для всех блоков идентично. Для трехфазной последовательной цепи оно показано на рис. 4.22.

В поле Branch type задается тип цепи. Здесь доступны различные сочетания, которые видны из рис, 4.22. В полях окна задаются:

*Resistance R (Ohms)* — величина резистора(Ом);

*Inductance L (H)* — величина индуктивности (Гн);

*Capacitance C (F)* — величина емкости (Ф);

*Measurements* - измеряемые переменные. Параметр позволяет выбрать, передаваемые в блок Multimeter, переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- *None* — нет переменных для отображения;
- *Branch voltage* — напряжение на зажимах цепи;
- *Branch current* — ток цепи;
- *Branch voltage and current* — напряжение и ток цепи;

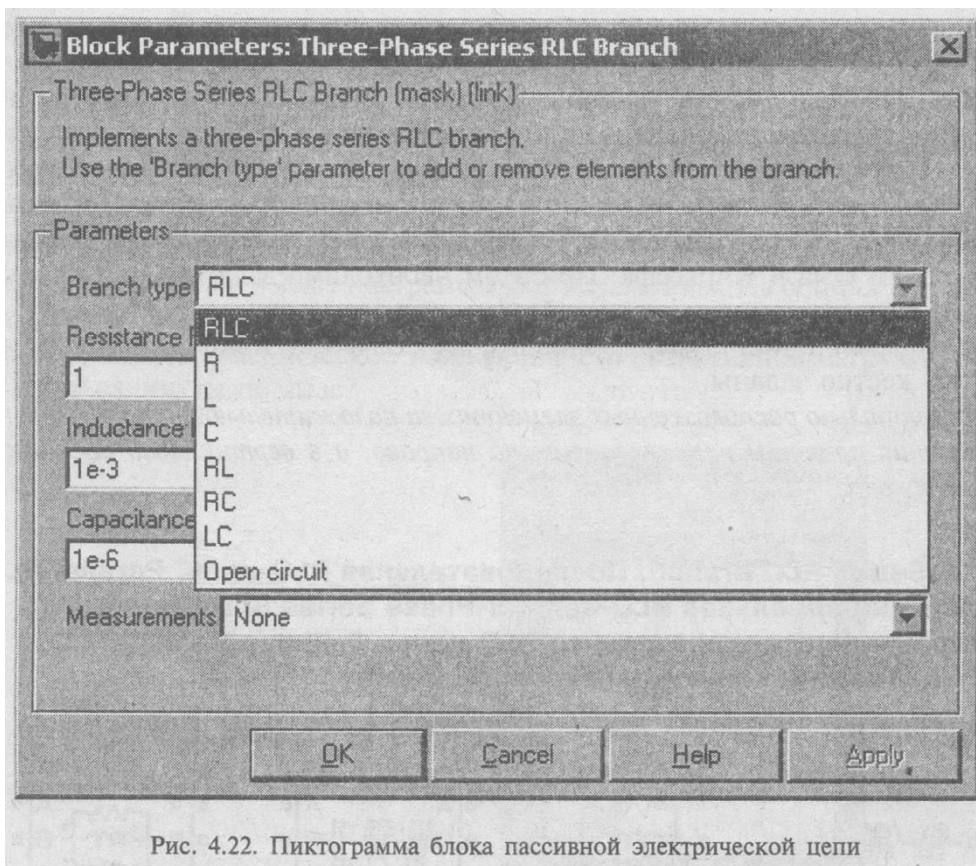


Рис. 4.22. Пиктограмма блока пассивной электрической цепи

Пример 4.6. На рис. 4.23 показана схема трехфазной цепи с соединением звезда-звезда без нулевого провода для измерения активной и реактивной мощности (*файл EI\_Current6*).

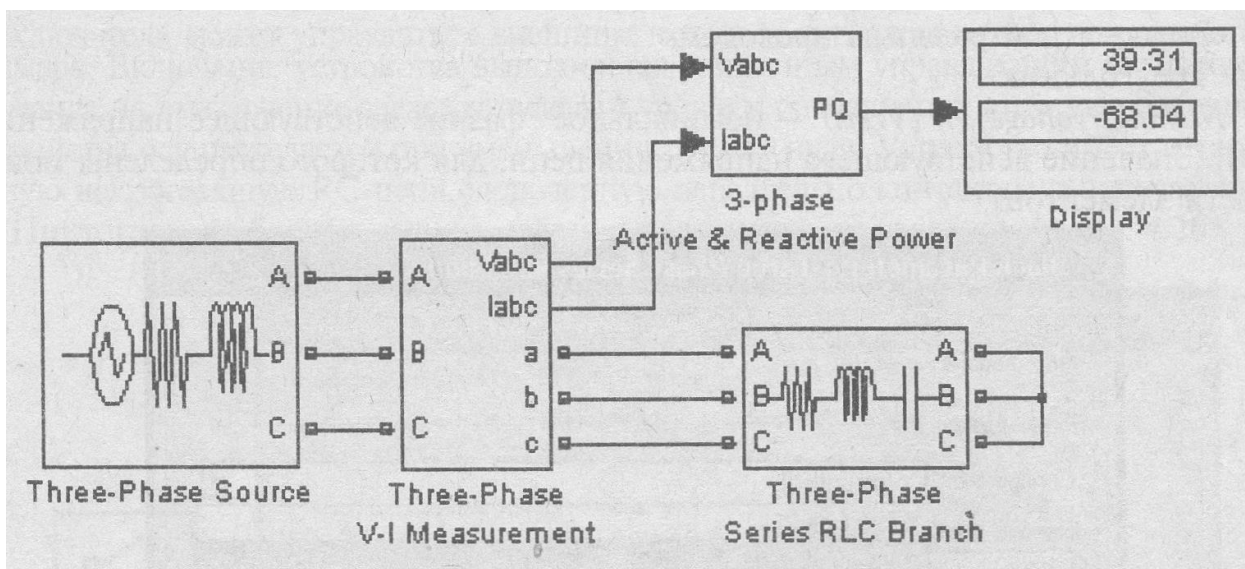


Рис. 4.23. Модель трехфазной электрической цепи

На схеме трехфазный источник переменного напряжения с линейным напряжением 380В и частотой 50Гц подключается к симмет-

ричной трехфазной нагрузке с параметрами:  $R = 1 \text{ Ом}$ ,  $L = 1 \text{ мГн}$  и  $C = 1 \text{ мкФ}$ . Результаты измерения активной и реактивной мощности видны на экране блока Display.

**3. Series RLC Load. Последовательная RLC-нагрузка. Parallel RLC Load. Параллельная RLC- нагрузка. 3-Phase Series RLC Load. Трехфазная последовательная RLC- нагрузка. 3-Phase Parallel RLC Load. Трехфазная параллельная RLC- нагрузка**

Пиктограммы пассивных электрических нагрузок показаны на рис. 4.24.

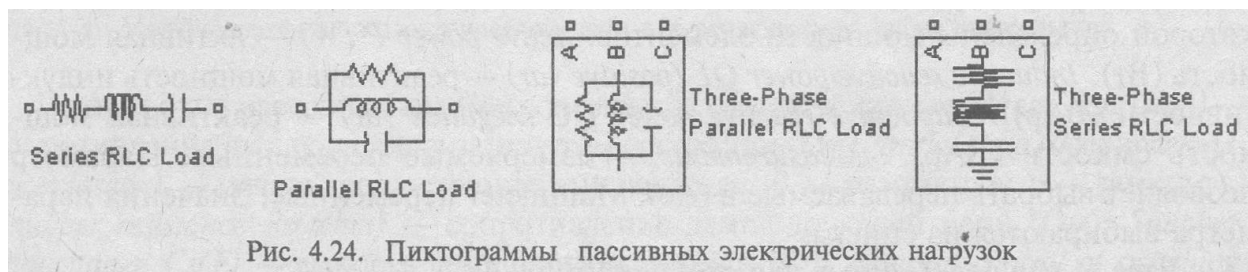


Рис. 4.24. Пиктограммы пассивных электрических нагрузок

Окно задания параметров (рис. 4.25) практически аналогично для всех блоков. В полях окна настройки параметров задаются: Configuration (только для трехфазных цепей) - позволяет выбрать схему соединения. В раскрывающемся списке выбирается одно из соединений:

- Звезда с заземленной нейтралью.
- Звезда без вывода нейтрального провода.
- Звезда с нейтральным проводом.
- Треугольник.

*Nominal voltage  $V_n$  ( $V_{ms}$ )* — номинальное фазное действующее напряжение (В). Значение действующего напряжения цепи, для которого определены мощности элементов.

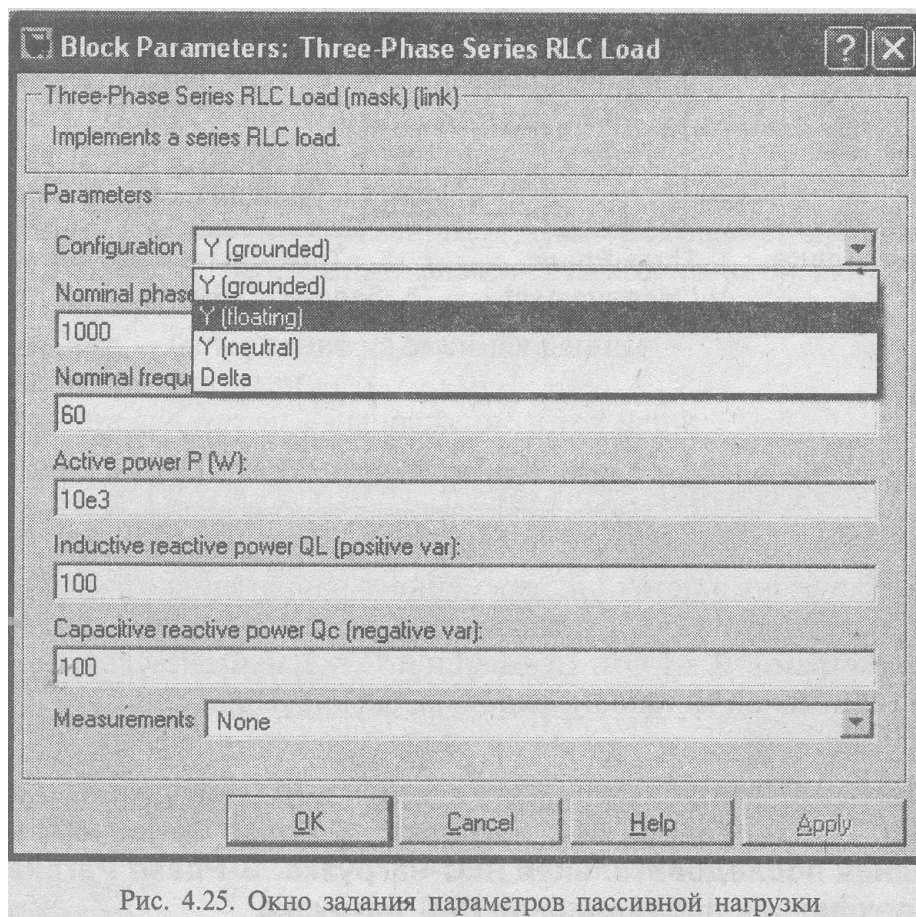


Рис. 4.25. Окно задания параметров пассивной нагрузки

*Nominal frequency  $f_n$  (Hz)* — номинальная частота (Гц). Значение частоты, для которой определены мощности элементов. *Active power  $P$  (W)* — активная мощность (Вт). *Inductive reactive power  $Q_L$  (positive var)* — реактивная мощность индуктивности (ВАр). *Capacitive reactive power  $Q_C$  (negative var)* — реактивная мощность емкости (ВАр). *Measurements* — измеряемые переменные. Параметр позволяет выбрать передаваемые в блок Multimeter переменные. Значения параметра выбираются из списка:

- *None* — нет переменных для отображения,
- *Branch voltage Voltage* — напряжение на зажимах цепи,
- *Branch current* — ток цепи,
- *Branch voltage and current* — напряжение и ток цепи.

#### 4. Breaker. Выключатель переменного тока. 3-Phase Breaker.

#### Трехфазный выключатель переменного тока

Блоки Breaker и 3-Phase Breaker моделируют выключатели переменного тока.

Выключатель может управляться внешним входным сигналом или от встроенного таймера. Включение устройства выполняется единичным управляющим сигналом. Команда на выключение задается нулевым уровнем сигнала, при этом выключение устройства осуществляется при уменьшении тока до нуля. Устройство имеет встроенную искрогасящую RC-цепь, включенную параллельно контактам выключателя.

Пиктограммы блоков и окно задания параметров приведены на рис. 4.26.

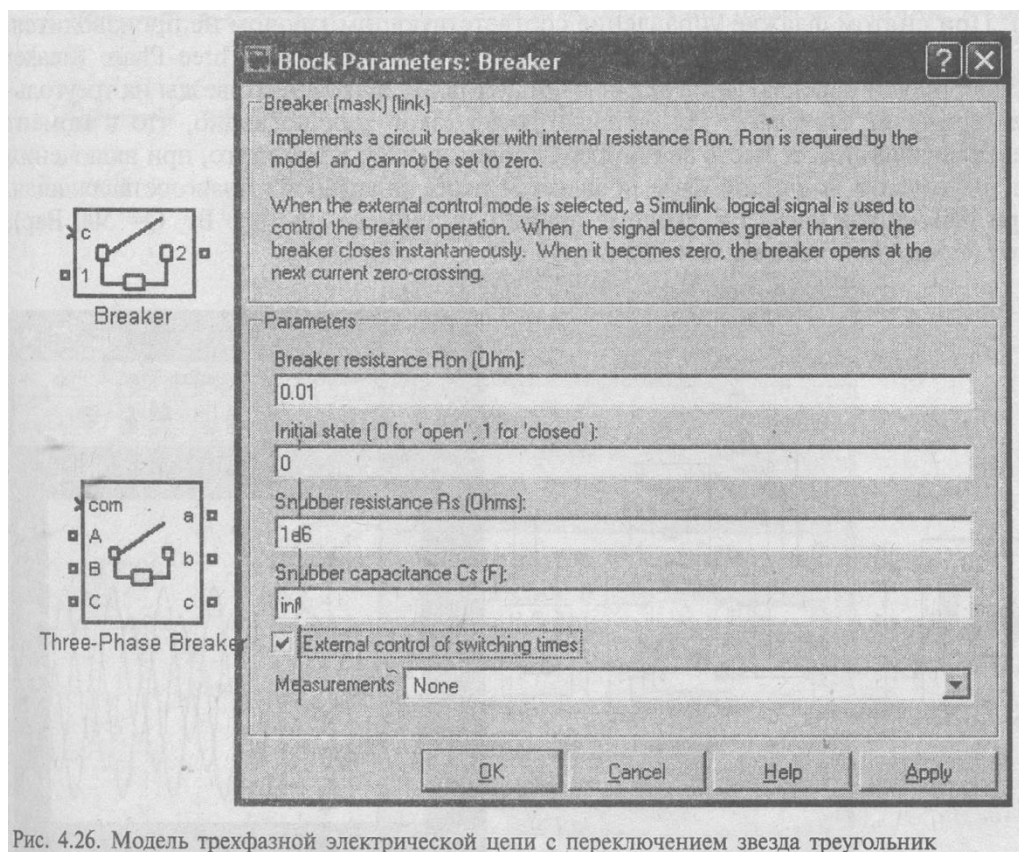


Рис. 4.26. Модель трехфазной электрической цепи с переключением звезда треугольник

В полях окна настройки параметров блока задаются: *Breaker resistance Ron(Ohm)*— сопротивление выключателя в замкнутом состоянии (Ом). *Initial state (0 for «open», 1 for «closed»)* — начальное состояние выключателя (0 — разомкнут, 1 — замкнут).: *Snubber resistance*

$R_s(Ohm)$  — сопротивление демпфирующей цепи (Ом). *Snubber capacitance*  $C_s(F)$  — емкость демпфирующей цепи (Ф). *External control of switching times* — внешнее управление временем срабатывания.

При установке флажка на пиктограмме блока появляется входной управляющий порт. Если флажок в поле *External control of switching times* не поставлен, то появляется дополнительный параметр. *Switching times (s)* — время срабатывания выключателя. Параметр задается в виде вектора, определяющего моменты времени срабатывания выключателя. Например, при разомкнутом начальном состоянии ключа значение параметра, заданное вектором [0.005 0.01 0.02 0.03], означает, что замыкание ключа будет выполняться в моменты времени 0.005с и 0.02с, а размыкание - в моменты времени 0.01с и 0.03с. *Measurements* - измеряемые переменные.

В трехфазном варианте окно параметров содержит три дополнительных поля:

**1 Switching of phase A** (Управление ключом фазы А). **2 Switching of phase B.** (Управление ключом фазы В) **3. Switching of phase C** (Управление ключом фазы С). При снятом флажке управление соответствующим ключом не производится.

*Пример 4.7.* На рис. 4.27 показана схема, в которой блоки Three-Phase Breaker осуществляют переключение активно-индуктивной нагрузки со звезды на треугольник (**файл El\_Current7**). На осциллограмме токов хорошо видно, что в момент переключения имеет место значительный бросок тока. Кроме того, при включении на треугольник в каждой фазе появляется переходная постоянная составляющая. При параметрах нагрузки, которые приняты в примере ( $P=1000$  Вт,  $Q= 500$  Вар), этот переходной процесс длится около 3 с.

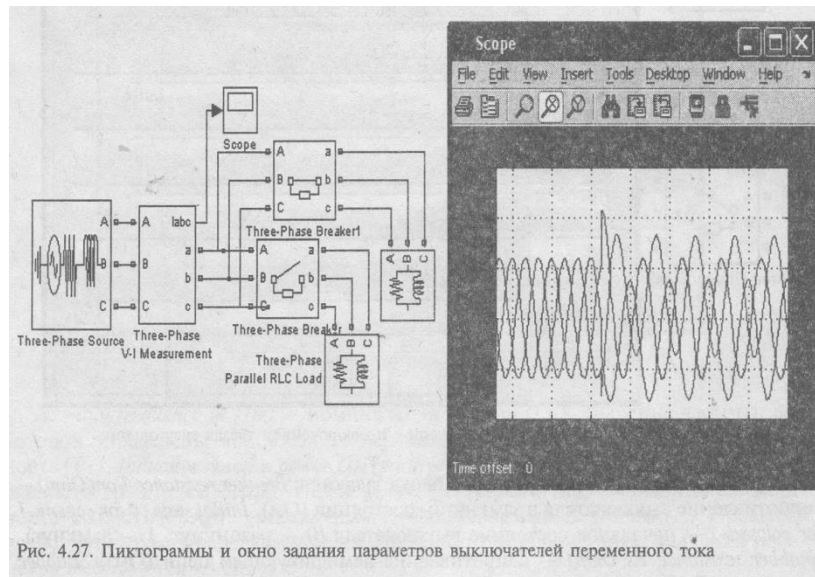


Рис. 4.27. Пиктограммы и окно задания параметров выключателей переменного тока

## 5. The Three-Phase Fault block. Трехфазный блок повреждений

Трехфазный блок повреждений моделирует повреждения в трехфазной электрической цепи или в трехфазном силовом преобразователе, которые могут возникать в линии (между фазами) или в фазе (между фазой и землей). Внутренняя структура блока показана на рис. 4.28. Величина сопротивлений  $R_{оп}$  и  $R_g$  задается в полях окна параметров блока *Fault resistances* и *Ground resistances* (рис. 4.29).

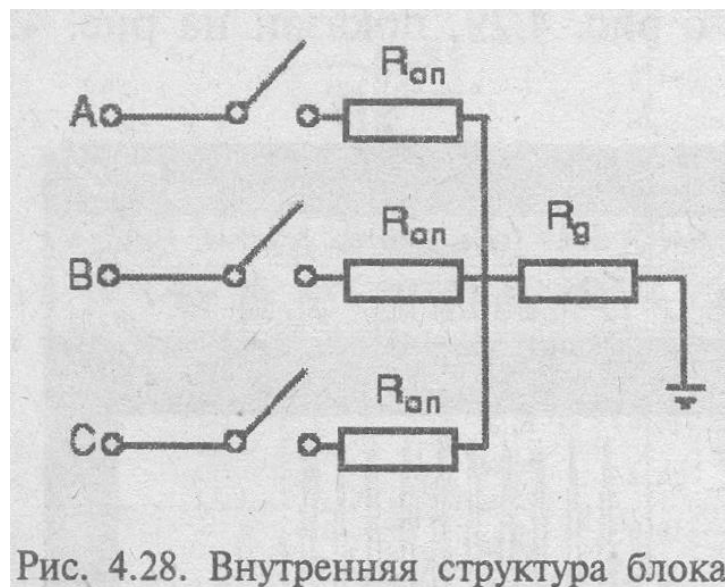


Рис. 4.28. Внутренняя структура блока

В полях *Phase A fault*, *Phase B fault*, *Phase C fault*, *Ground fault* отмечаются ветви с повреждениями.

Если повреждение возникает в линии, то флажок в поле Ground fault не ставится, а отмечаются две фазы той линии, в которой наступило повреждение. При повреждении между фазой и землей (корпусом) флажками отмечается, как на рис. 4.37, фаза (*Phase A fault*) и *Ground fault*.

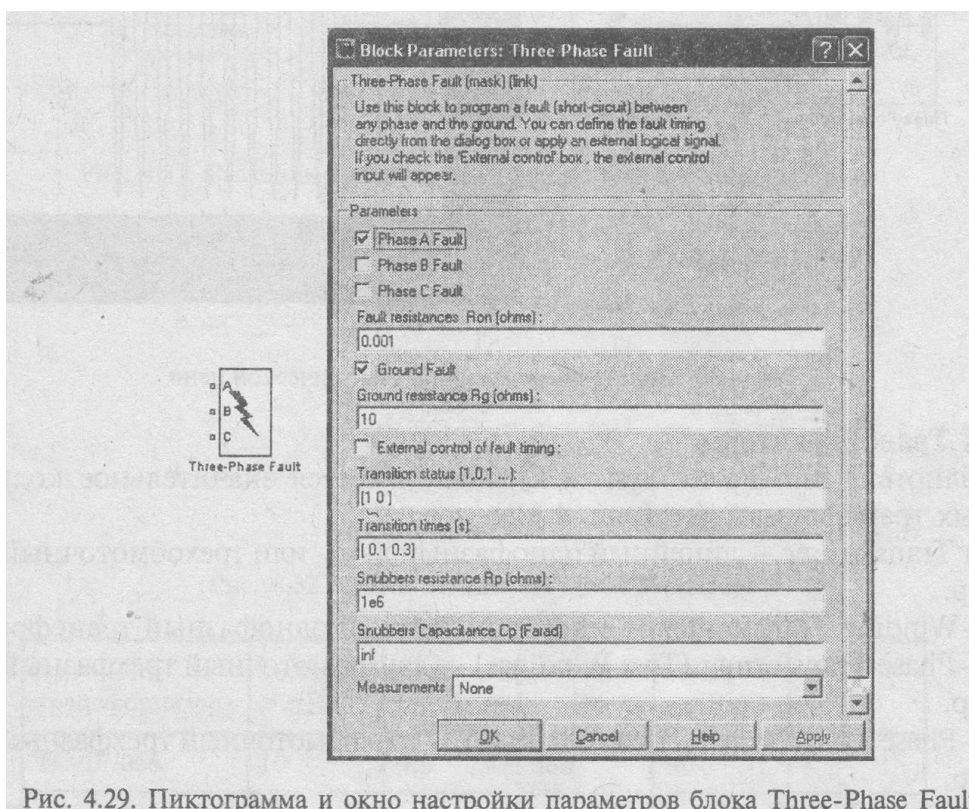


Рис. 4.29. Пиктограмма и окно настройки параметров блока Three-Phase Fault

Время наступления повреждения и его окончания может быть задано в поле Transition time (рис. 4.29). Если установлен флажок в поле External control of fault timing, то началом и концом повреждения можно управлять от внешнего сигнала (в этом случае пиктограмма блока будет содержать дополнительный порт. Состояние цепи до начала повреждения и во время повреждения задается в поле Transition status (1 — не поврежден, 0 — поврежден).

*Пример 4.8.* Пример повреждения (пробоя) между фазой и землей, с параметрами блока, установленными в соответствии с рис. 4.29, показан на рис. 4.30 (**файл *El\_CurrentS***).

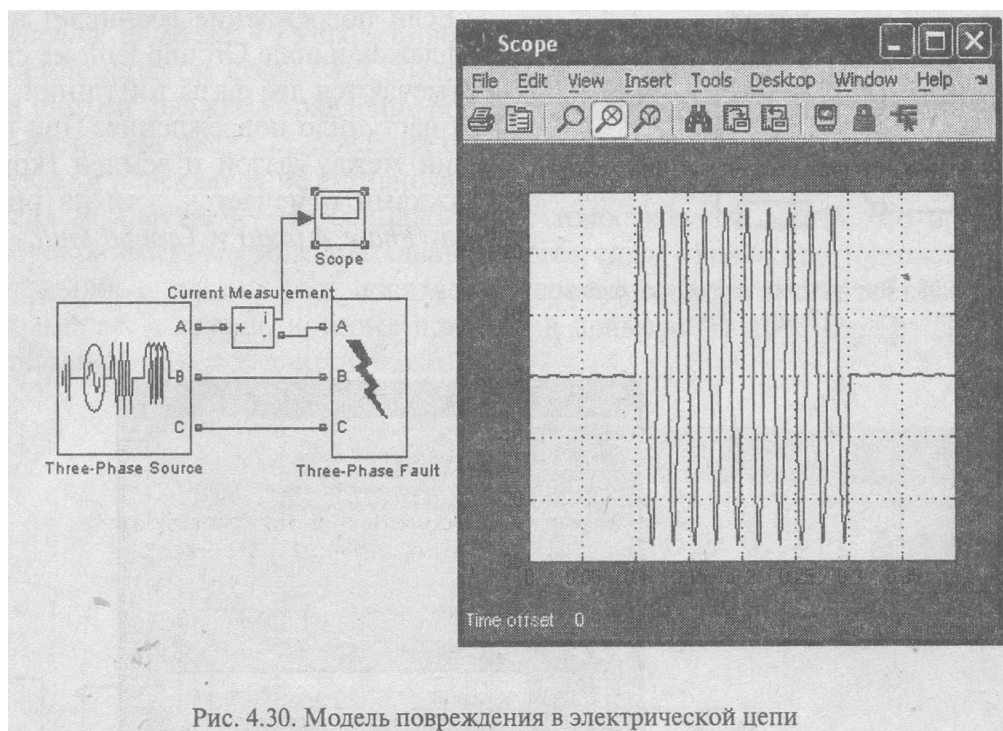


Рис. 4.30. Модель повреждения в электрической цепи

## 6. Трансформаторы

В библиотеке Sim Power System/Elements имеется значительное количество различных трансформаторов (рис. 4.31):

- Linear Transformer — линейный однофазный двух- или трехобмоточный трансформатор.
- Multi-Winding Transformer — многообмоточный однофазный трансформатор.
- Three-Phase Transformer (Two Windings) — двухобмоточный трехфазный трансформатор.
- Three-Phase Transformer (Three Windings) — трехобмоточный трехфазный трансформатор.
- Three-Phase Transformer 12 Terminals — двухобмоточный трехфазный трансформатор с выведенными наружу зажимами всех обмоток.
- Zigzag Phase-Shifting Transformer — трехобмоточный трехфазный трансформатор, у которого первичная и одна из вторичных обмоток соединены в зигзаг, соединение другой вторичной обмотки выбирается из выпадающего списка.

Схема замещения трансформатора приведена на рис. 4.32. Для всех трансформаторов параметры схемы замещения задаются в относительных величинах. Эти параметры рассчитываются исходя из паспортных данных на трансформатор.

Ниже, в качестве примера, приведены паспортные данные (таб. 4.1) на трехфазные силовые трансформаторы и показано, как использовать эти данные для расчета относительных параметров трансформатора.

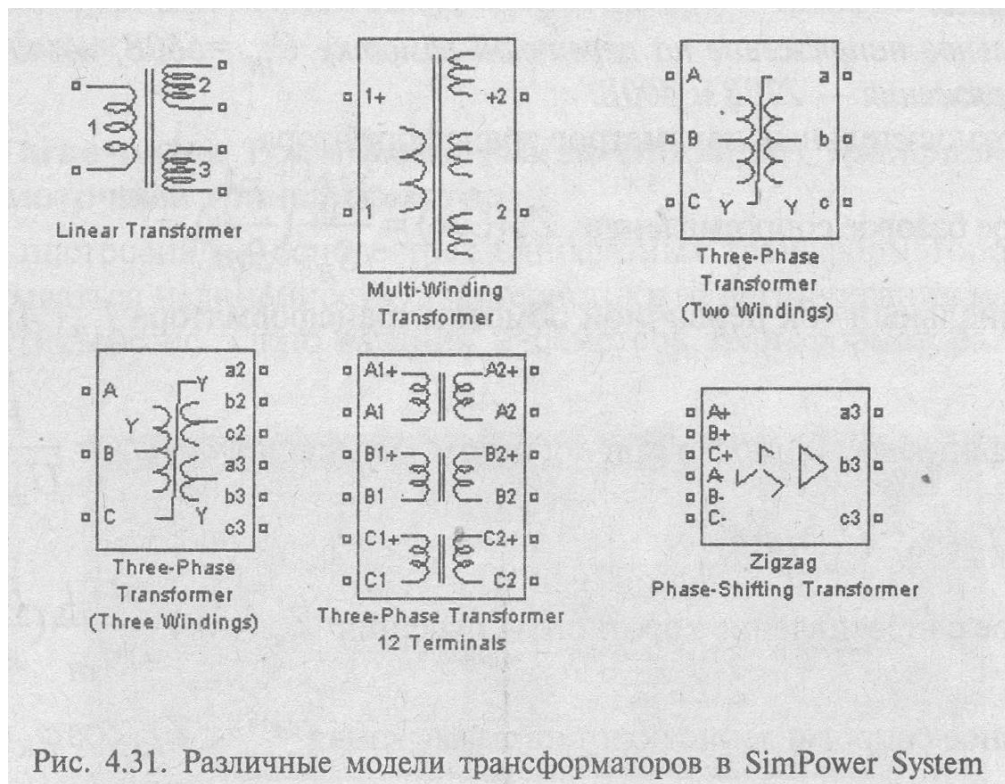
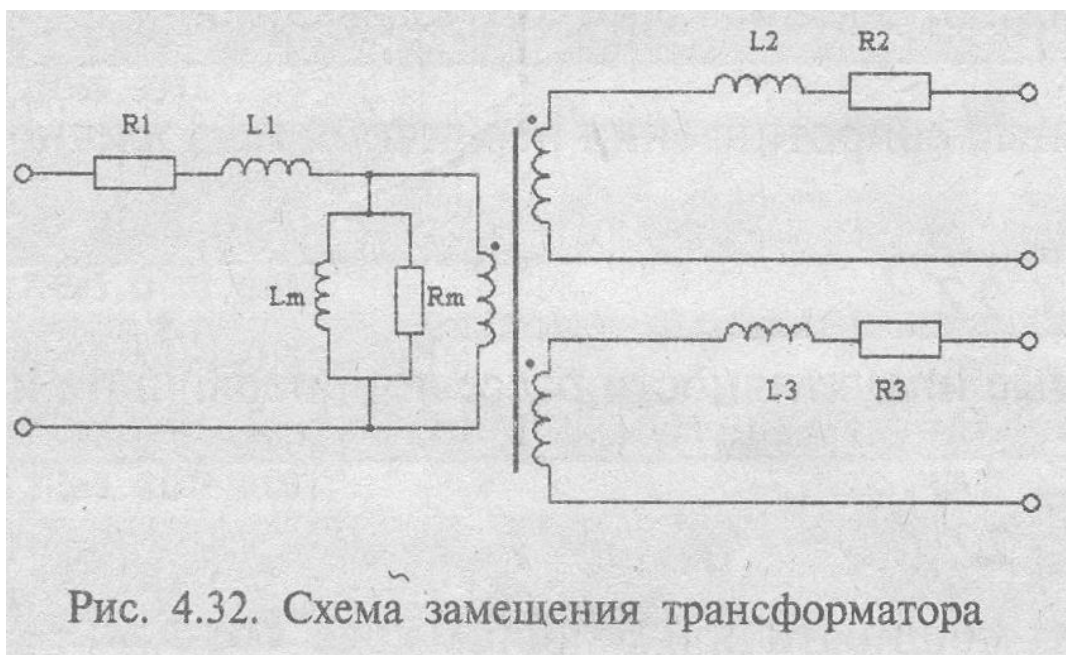


Рис. 4.31. Различные модели трансформаторов в SimPower System



Тип трансформатора	$S_H$ кВА	$U_{кз}$ %	$P_{кз}$ Вт	$P_0$ Вт	$I_0$ %
ТС-10/066	10	4,5	280	90	7
ТС-16/066	16	4,5	400	125	5,8
ТС-25/066	25	4,5	560	180	4,8
ТС-40/066	40	4,5	800	250	4,0
ТС-63/066	63	4,5	1090	355	3,3
ТС-100/066	100	4,5	1500	500	2,7
ТС-160/066	160	4,5	2060	710	2,3

Таблица 4.1.



**Примечание:**

Номинальное напряжение на первичной обмотке  $U_{1H} = 660\text{В}$ , номинальные вторичные напряжения —  $230\text{В}$  и  $400\text{В}$ .

Расчет относительных параметров трансформатора.

1. Полное базовое сопротивление  $Z_B(\text{Ом}) = \frac{U_{1H}^2}{S_H} \left( \frac{B}{\text{Вт}} \right)$ .

2. Номинальный ток первичной обмотки трансформатора  $I_{1H}(\text{А}) = \frac{S_H}{U_{1H}} \left( \frac{\text{ВА}}{\text{В}} \right)$

3. Коэффициент мощности при коротком замыкании  $\cos \varphi_K = \frac{P_{K3}}{U_{K3} I_{1H}} \left( \frac{\text{Вт}}{\text{ВА}} \right)$ ,

где  $U_{K3} = U_{K3}(\%) \cdot U_{1H} / 100$ .

4. Полное сопротивление короткого замыкания  $Z_{K3}(\text{Ом}) = \frac{U_{K3}}{I_{1H}} \left( \frac{\text{В}}{\text{А}} \right)$ .

5. Активное сопротивление короткого замыкания  $r_{K3} = Z_{K3} \cos \varphi_K(\text{Ом})$ .

6. Реактивное сопротивление короткого замыкания  $x_{K3} = Z_{K3} \sin \varphi_K(\text{Ом})$ .

7. Относительные сопротивления первичной и вторичной обмоток

$$R_1(\text{пу}) = R_2(\text{пу}) = \frac{r_{K3}}{2Z_B}$$

8. Относительные индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток

$$L_1(\text{пу}) = L_2(\text{пу}) = \frac{x_{K3}}{2Z_B}$$

9. Коэффициент мощности при холостом ходе  $\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1H} I_0} \left( \frac{\text{Вт}}{\text{ВА}} \right)$ , где  $I_0(\text{А}) = I_0(\%) \cdot I_{1H} / 100$ .

10. Полное сопротивление холостого хода  $Z_0(\text{Ом}) = \frac{U_{1H}}{I_0} \left( \frac{\text{В}}{\text{А}} \right)$ .

11. Активное сопротивление холостого хода  $r_0 = Z_0 / \cos \varphi_0(\text{Ом})$ .

12. Реактивное сопротивление холостого хода  $x_0 = Z_0 / \sin \varphi_0(\text{Ом})$ .

13. Относительное сопротивление ветви намагничивания  $R_m(\text{пу}) = \frac{r_0}{Z_B}$ .

14. Относительная индуктивность ветви намагничивания  $L_m(\text{пу}) = \frac{x_0}{Z_B}$ .

Ниже рассматривается один тип трансформатора — трехфазный трехобмоточный трансформатор.

#### 4.5.7. Three-phase Transformer (Three Windings). Трехфазный трехобмоточный трансформатор

Модель построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника и гистерезис. Окно задания параметров трансформатора показано на рис. 4.33

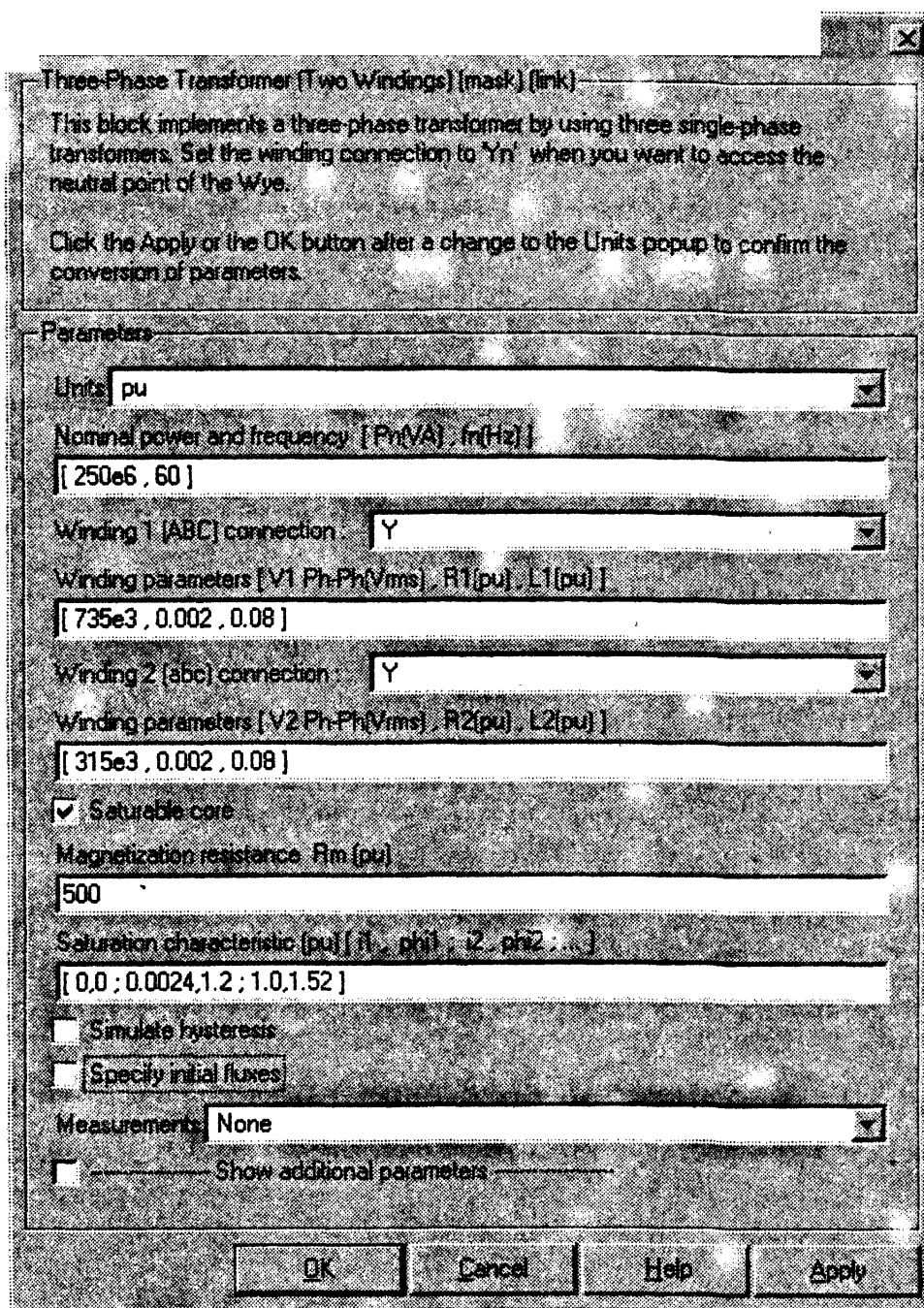


Рис. 4.33. Окно задания параметров трансформатора

В поле Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)] задаются номинальная полная мощность трансформатора (ВА) и частота (Гц).

*Замечание. Обычно полная мощность обозначается буквой S.*

В поле Winding 1 (ABC) connection выбирается схема соединения первичной обмотки из списка:

- Y — звезда,
- Yn — звезда с нейтралью,
- Yg — звезда с заземленной нейтралью,
- Delta(D1) — треугольник первой группы,
- Delta(D11) — треугольник одиннадцатой группы.

В поле Winding parameters [V1 Ph-Ph(V), R1(pu), L1(pu)] задаются параметры первичной обмотки. Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.). В поле Winding 2 (abc) connection выбирается схема соединения вторичной обмотки из списка:

- Y — звезда,
- Yn — звезда с нейтралью,
- Yg — звезда с заземленной нейтралью,
- Delta(D1) — треугольник первой группы,
- Delta(D11) — треугольник одиннадцатой группы. Параметры вторичной обмотки задаются в поле Winding parameters [U2 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu)]. Линейное напряжение (В), активное сопротивление обмотки (о.е.), индуктивность обмотки (о.е.).

При установленном флажке в поле Saturable core [Насыщающийся сердечник] используется нелинейная модель трансформатора. В этом случае задается только сопротивление цепи намагничивания (о.е.) в поле Magnetization resistance Rm(pu).

*Поле Magnetization reactance Lm(pu) — реактанс цепи намагничивания (о.е.) доступно только при моделировании линейного трансформатора (флажок Saturable core не установлен).*

В поле Saturation characteristic (pu) [i1, phi1; i2, phi2;... задаются значения намагничивающего тока и магнитного потока в относительных единицах. Нелинейная характеристика в модели задается как кусочно-линейная зависимость между магнитным потоком сердечника и током намагничивания (рис. 4.34, а). В модели имеется возможность задать остаточный магнитный поток в сердечнике.

В этом случае вторая точка нелинейной характеристики должна соответствовать нулевому току (рис. 4.34, б).

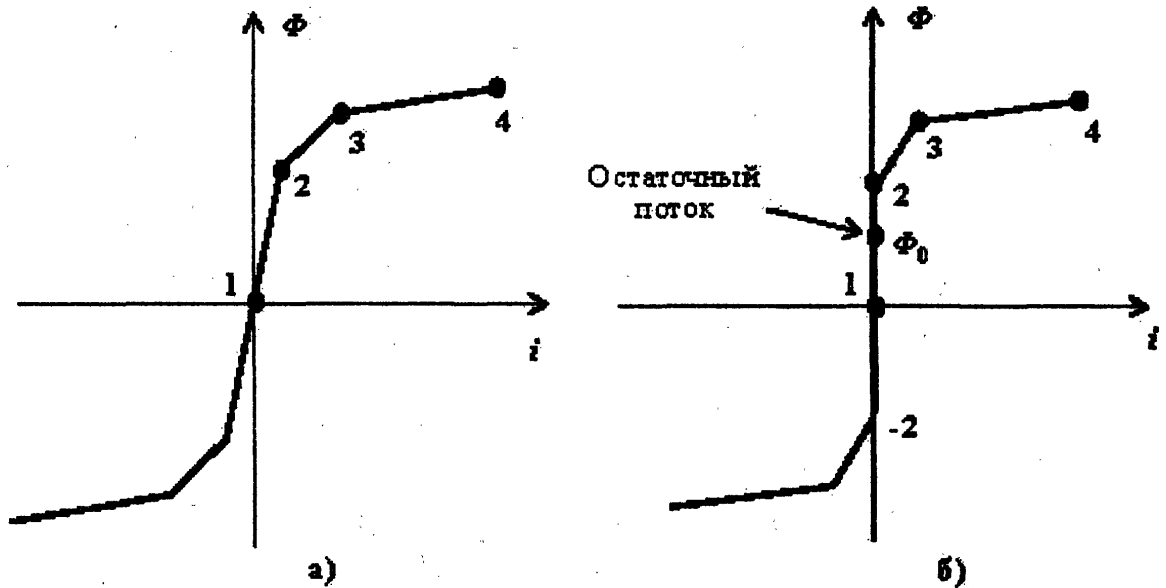


Рис. 4.34. Нелинейные характеристики намагничивания трансформатора

М. Шадрин &amp; Э. Шадрин. Проектирование мехатронных систем

151

Характеристика намагничивания задается парами значений намагничивающего тока и потока в относительных единицах, начиная с точки (0, 0). Относительные значения тока и потока определяются по выражениям:

$$\Phi(pu) = \frac{\Phi}{\Phi_b}, \quad I(pu) = \frac{I}{I_b},$$

$I$  и  $\Phi$  — абсолютные значения тока и потока,

$$I_b = \frac{\sqrt{2}P_H}{U_{1H}}, \quad \Phi_b = \frac{\sqrt{2}U_{1H}}{2\pi \cdot f_H} \text{ — базовые значения тока и потока.}$$

$U_{1H}$  — номинальное напряжение первичной обмотки,  $f_H$  — номинальная частота.

При установленном флажке Simulate hysteresis в характеристике намагничивания учитывается гистерезис. При этом в поле Hysteresis Data Mat file вводится имя файла данных, содержащего гистерезисную характеристику. Файл данных может быть создан с помощью блока Powergui. Параметр доступен при установленном флажке Simulate hysteresis. При установленном флажке в поле Specify initial fluxes задаются начальные потоки для фаз ABC. Параметр доступен при моделировании нелинейного трансформатора (флажок Saturable core установлен).

Из раскрывающегося списка Measurements выбираются величины для измерения блоком Multimeter и Powergui:

- Winding voltages — напряжения обмоток,
- Winding currents — токи обмоток,
- Flux and excitation current (Imag\_IRm) — поток и ток холостого хода,
- Flux and magnetization current (Imag) — поток и ток намагничивания,
- All Measurements (V, I, Flux) — все напряжения, токи и поток.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.2.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ПАКЕТЕ SIM POWER SYSTEM

### ВОПРОСЫ

1. Классификация полупроводниковых приборов преобразователей.
2. Силовые полупроводниковые диоды.
3. Тиристор.
4. Полностью управляемые GTO тиристоры.
5. Биполярные IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) транзисторы .
6. Полевые Mosfet (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) транзисторы .
7. Интегрально-модульные конструкции в Sim Power System.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### **1. Классификация полупроводниковых приборов преобразователей**

Силовые полупроводниковые элементы в преобразователях, как правило, работают в ключевом режиме. Этот режим работы характеризуется двумя состояниями: 1 — открыт для диода и тиристора, насыщен для транзистора; 2 — закрыт.

В первом состоянии силовой полупроводниковый элемент имеет очень малое сопротивление для протекания тока, во втором — практически бесконечное сопротивление. Благодаря такому режиму работы, потери в силовом полупроводниковом элементе малы по сравнению с преобразуемой мощностью. Эти потери складываются из потерь при протекании прямого тока, когда силовой полупроводниковый элемент открыт или насыщен, потерь при протекании обратного тока, когда силовой полупроводниковый элемент закрыт, и потерь при переключении из одного состояния в другое.

Параметры, приводимые в справочных данных, позволяют рассчитать эти потери. Классификация силовых полупроводниковых элементов представлена на рис.4.35



Рис. 4.35. Классификация силовых полупроводниковых элементов

В качестве первого критерия классификации выбран тип элемента. По этому критерию все силовые полупроводниковые элементы разделены на диоды, тиристоры и транзисторы.

В качестве второго критерия классификации выбраны физические свойства элемента.

Силовые полупроводниковые элементы находятся в библиотеке Power Electronics пакета Sim Power System.

#### 4.6.2. Силовые полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называют прибор, который имеет два электрода и содержит один (или несколько)  $p-n$ -переходов. Силовые полупроводниковые диоды можно разделить на две группы: выпрямительные и быстродействующие. Выпрямительные диоды предназначены для выпрямления переменного тока. Быстродействующие диоды в схемах полупроводниковых преобразователей служат в качестве обратных диодов. Они создают пути протекания тока нагрузки при запираии транзисторов.

*Выпрямительные диоды.*

Строение диода видно на рис. 4.36 а, его изображение на принципиальной схеме показано на рис.4.36б, а его вольт-амперная характеристика - на рис. 4.36 в.

Вольт-амперную характеристику диода в открытом состоянии можно аппроксимировать двумя отрезками прямых, что позволяет определить необходимые

параметры ( $U_f$  — пороговое напряжение,  $R_{on} = \frac{\Delta U_{ak}}{\Delta I_{ak}}$  — динамическое сопротивление) для анализа, расчета и моделирования.

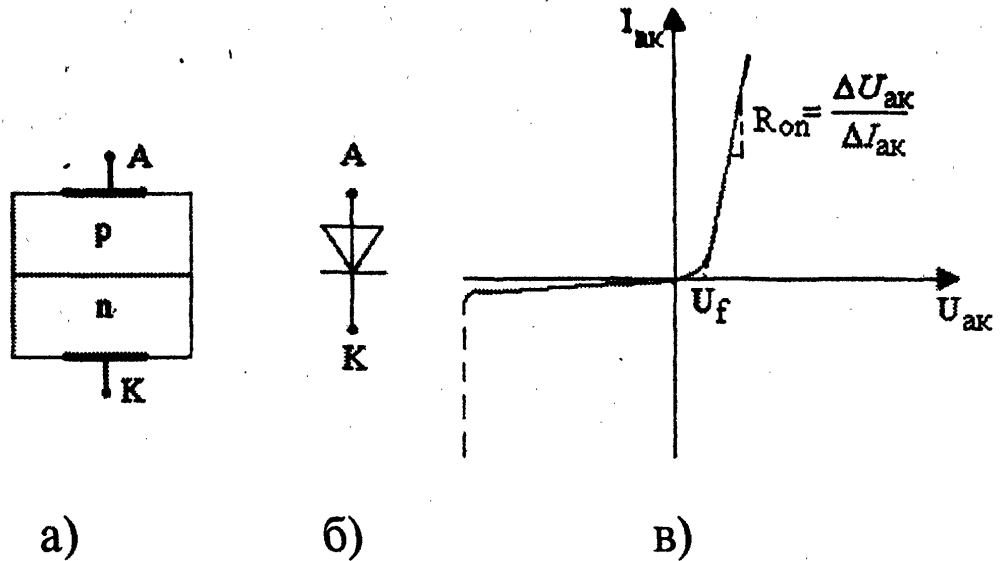


Рис. 4.36. Строение, обозначение и характеристика диода

При прямом напряжении на диоде и  $U_{ак} < U_f$  ток через диод равен нулю. Для  $U_{ак} > U_f$  диод аппроксимируется сопротивлением  $R_{он}$ . Таким образом, модель диода в открытом состоянии описывается линейным уравнением

$$U_{ак} = U_f + R_{он} I_{ак} \quad (4.1)$$

В закрытом состоянии сопротивление диода принимается бесконечным, а ток через диод равным нулю.

Силовые диоды обычно характеризуют набором статических, предельно допустимых и динамических параметров. К статическим параметрам диода относятся, рассмотренные выше пороговое напряжение и сопротивление в проводящем состоянии, а также:

- падение напряжения  $U_{np}$  на диоде при некотором значении прямого тока;
- обратный ток  $I_{обр}$  при некотором значении обратного напряжения;
- среднее значение прямого тока  $I_{np,ср}$ .

В качестве предельно допустимых параметров в паспортных данных на диоды приводятся следующие:

- максимальный прямой ток  $I_{np,макс}$ ;
- максимальное обратное напряжение  $U_{обр,макс}$ ;
- импульсное обратное напряжение  $U_{обр,и}$ ;
- прямой импульсный ток  $I_{np,имп}$ , при оговоренной длительности импульса.

К динамическим параметрам диода относятся его временные и частотные характеристики:

- время восстановления  $t_{восст}$  обратного напряжения;
- время нарастания прямого тока  $t_{нар}$ ;
- предельная частота без снижения режимов диода  $f_{макс}$ .

Модель диода (Diode) состоит из последовательно включенных резистора  $R_{он}$ , индуктивности  $L_{он}$ , источника постоянного напряжения  $V_f$  и ключа  $SW$  (рис. 4.37). Резистор  $R_{он}$  моделирует сопротивление диода в открытом состоянии. Индуктивность  $L_{он}$  моделирует динамические процессы переключения диода. Напряжение  $V_f$  моделирует падение напряжения на открытом диоде. Блок

логики управляет работой ключа. При положительном напряжении на диоде ( $V_{ak} - V_f$ ) происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток. Размыкание ключа (выключение диода) выполняется при снижении тока  $I_{ak}$ , протекающего через диод, до нуля. В модели параллельно самому диоду включена последовательная  $R_s, C_s$ -цепь, выполняющая демпфирующие функции.

Пиктограмма и окно задания параметров диода показаны на рис. 4.38

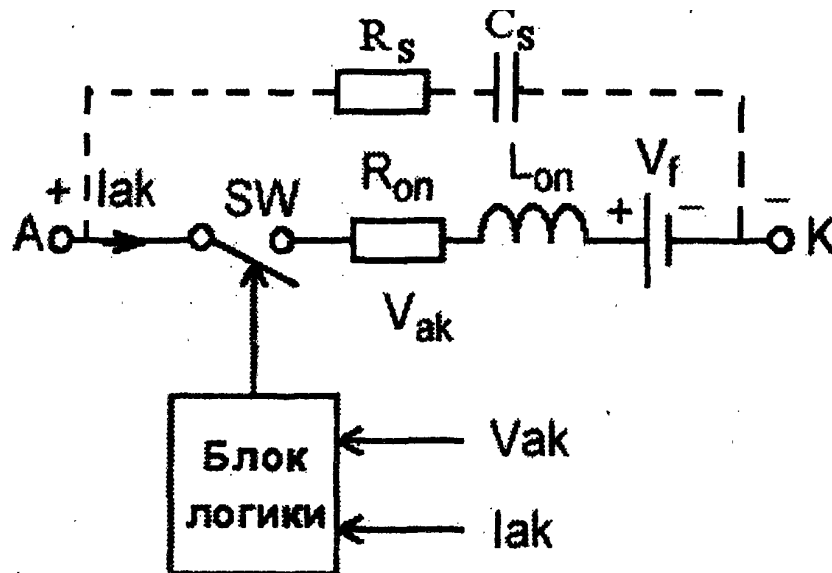


Рис. 4.37. Модель диода

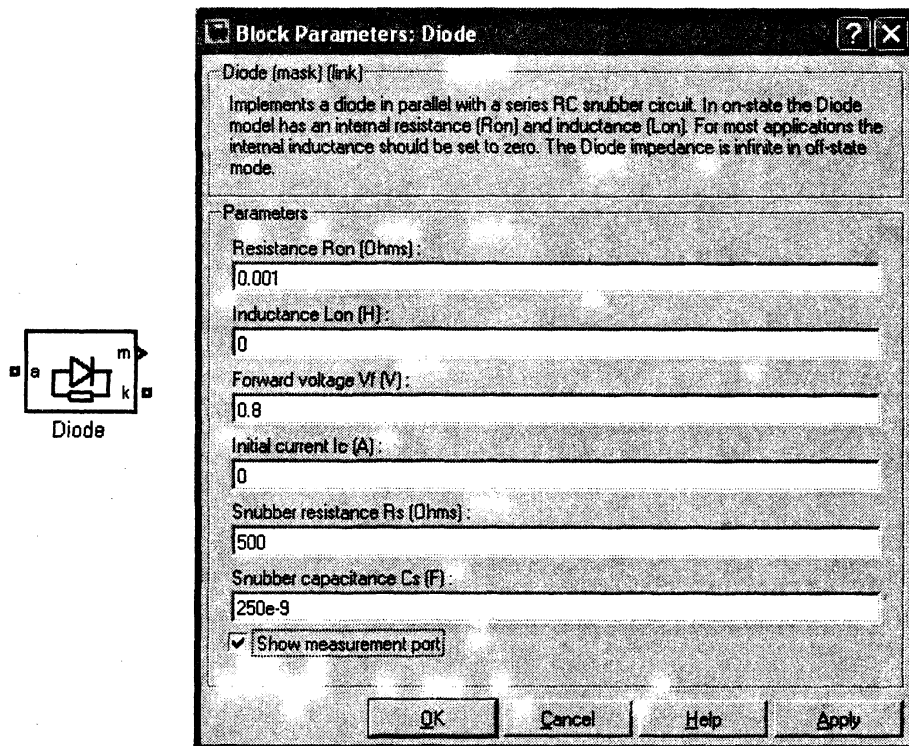


Рис.4.38. Пиктограмма и окно задания параметров диода

В окне параметров блока задаются: Resistance  $R_{on}$  (Ohm) — сопротивление во включенном состоянии (Ом), Inductance  $L_{on}$  (H) — индуктивность во включенном состоянии (Гн). Forward voltage  $U_f$  (V) — падение напряжения в прямом направлении (В). Initial current  $I_c$  (A) — начальное значение тока (А). При значении параметра равно нулю моделирование начинается при закрытом состоянии диода. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии диода. Snubber resistance  $R_s$  (Ohm) — сопротивление демпфирующей цепи (Ом). Snubber capacitance  $C_s$  (F) — емкость демпфирующей цепи (Ф). При установленном флажке в поле Show measurement port создается выходной порт  $m$ , на котором формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент — анодный ток диода, второй — напряжение анод-катод диода.

*Пример 4.9.* На рис. 4.39 показана схема модели, однополупериодного выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку (*файл Diode*).

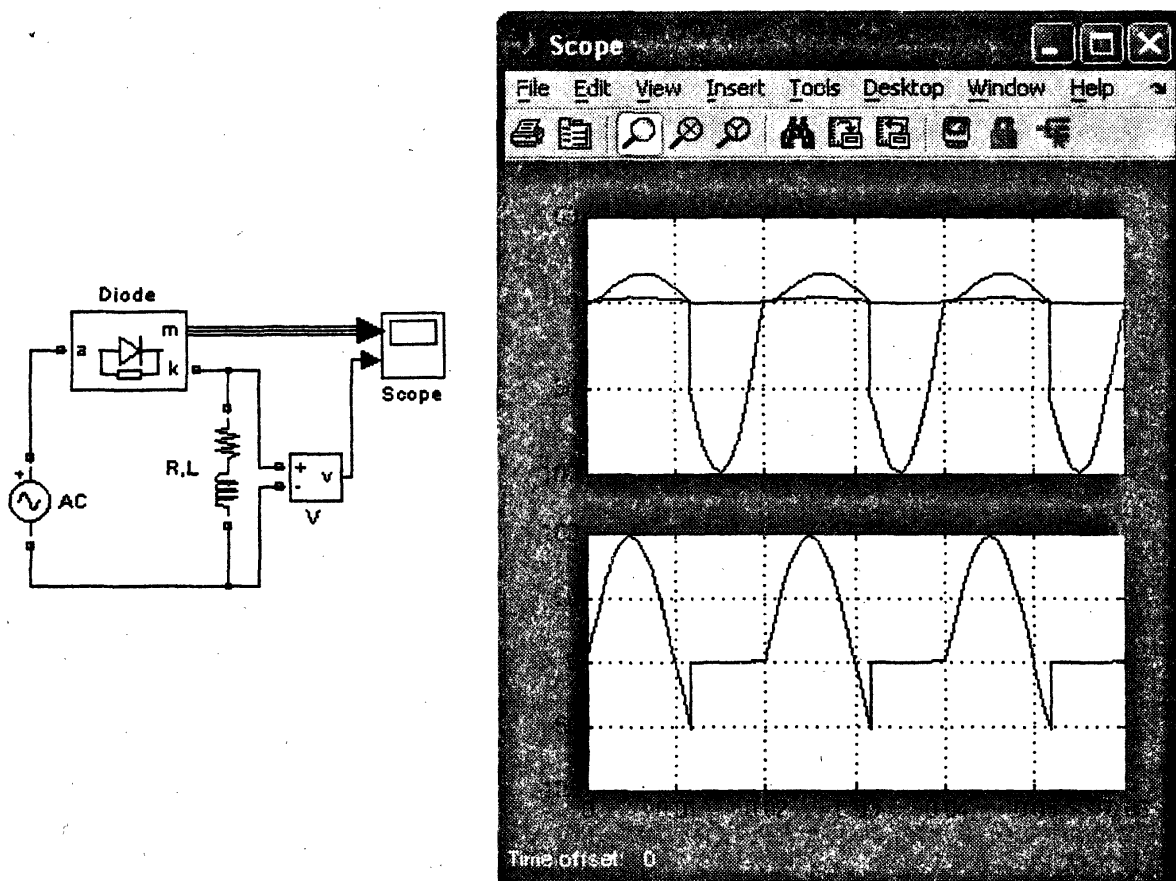


Рис. 4.39. Модель электрической цепи с диодом

На верхней осциллограмме показано напряжение и ток в диоде, на нижней осциллограмме – напряжение на нагрузке. За счет энергии, накопленной в индуктивности нагрузки, ток некоторое время продолжает протекать после изменения полярности напряжения питания. Этим объясняется наличие отрицательного напряжения на нагрузке.

### 4.6.3. Тиристор

Тиристор является элементом с четырехслойной полупроводниковой структурой (рис. 4.40).

В статическом режиме тиристор может находиться в трех состояниях:

- запертое состояние при отрицательном напряжении на аноде относительно катода;
- запертое состояние при положительном напряжении на аноде относительно катода;
- открытое состояние.

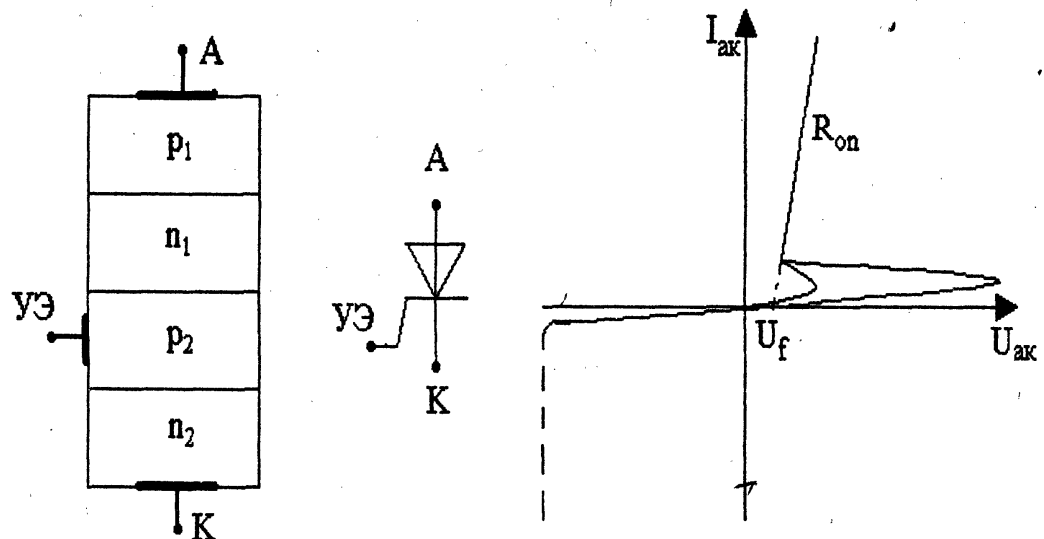


Рис. 4.40. Строение, обозначение и характеристики тиристора

Переход из второго состояния в третье называется включением тиристора. Переход из открытого состояния в запертое называется выключением тиристора. Обозначение тиристора на принципиальной схеме и вольт-амперная характеристика тиристора приведены на рис. 4.40. При увеличении тока управления снижается напряжение включения. Таким образом, тиристор является прибором

ром с управляемым напряжением включения.

После включения управляющий электрод теряет управляющие свойства и, следовательно, с его помощью выключить тиристор нельзя. Тиристор может выключиться самостоятельно в том случае, когда анодный ток станет меньше тока удержания. Обычно считается, что ток удержания равен нулю. Однако в некоторых случаях, для точных расчетов его следует учитывать. Основные параметры тиристора во включенном состоянии повторяют параметры диода. К предельно допустимым параметрам тиристора относятся:

- допустимое обратное напряжение  $U_{обр}$  ;
- допустимый прямой ток  $I_{пр}$  .

К динамическим параметрам относятся времена включения  $t_{вкл}$  и выключения  $t_{выкл}$ . Динамические процессы переключения тиристора представлены на рис. 4.41. Для надежного включения тиристора необходимо, чтобы параметры импульса тока управления на начальном участке — его амплитуда  $I_{у.мах}$  , длительность и

скорость нарастания  $\frac{dI_y}{dt}$  — отвечали определенным требованиям, которые

обеспечивают быстрое и надежное включение тиристора. При включении тиристора после подачи импульса тока на управляющий электрод проходит некоторое время, необходимое для включения тиристора.

Процесс нарастания тока в тиристоре начинается спустя некоторое время задержки  $t_{зд}$ , которое зависит от амплитуды импульса тока  $I_{у. max}$  управления на начальном участке. В течение времени задержки ток в тиристоре нарастает до значения тока удержания  $I_{уд}$ . Этот ток обычно принимается равным  $I_{уд} = 0,1 I_H$ . При достаточно большом токе управления время задержки достигает долей микросекунды (от 0,1 до 1...2 мкс).

Затем происходит нарастание тока через прибор, которое обычно называют временем нарастания  $t_{нар}$ . После включения тиристора амплитуда импульса тока управления может быть значительно уменьшена.

Процесс выключения тиристора складывается из трех фаз (рис.4.41):

- фаза нарастания обратного тока через тиристор ( $t_1$ );
- фаза спада обратного тока до нуля ( $t_2$ );
- фаза восстановления запирающих свойств тиристора ( $t_3$ ).

Только спустя время включения  $t_{выкл} = t_1 + t_2 + t_3$  к тиристору можно повторно прикладывать прямое напряжение.

Потери в тиристоре состоят из потерь при протекании прямого тока, коммутационных потерь и потерь в цепи управления. Потери при протекании прямого тока рассчитываются так же, как в диодах. Коммутационные потери и потери в цепи управления зависят от способа включения и выключения тиристора.

Способы выключения тиристора (способы коммутации) можно разделить на два:

- коммутация от сети (естественная);
- искусственная коммутация, которая, как правило, осуществляется от предварительно заряженной емкости.

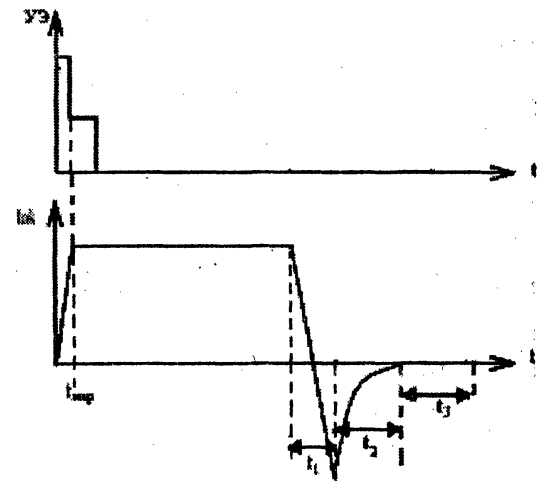


Рис. 4.41. Динамические процессы переключения тиристора

Естественная коммутация имеет место в управляемых выпрямителях, ведомых сетью инверторах и непосредственных преобразователях частоты.

Способы искусственной коммутации и схемы, реализующие эту коммутацию (коммутирующие устройства), достаточно разнообразны. На рис. 4.42, 4.43 приведены в упрощенном виде наиболее распространенные схемы коммутирующих устройств. В схемах на рис. 4.42 процесс коммутации обуславливается образованием колебательного контура после включения вспомогательного тиристора  $T_k$ .

Время  $t_{пв}$ , предоставляемое на восстановление силового тиристора  $T$  в этом случае, равно продолжительности протекания тока через встречно включенный диод  $D$ . При этом к тиристору прикладывается небольшое обратное напряжение, равное прямому падению напряжения на диоде. Рассмотренная коммутация часто называется «мягкой». В схемах рис. 4.43 при включении вспомогательного тиристора  $T_k$  к силовому тиристору сразу прикладывается большое обратное напряжение, равное начальному напряжению на конденсаторе. Поэтому силовой тиристор практически мгновенно запирается, а время, предоставляемое силовому тиристору на восстановление, равно продолжительности действия отрицательного напряжения на тиристоре.

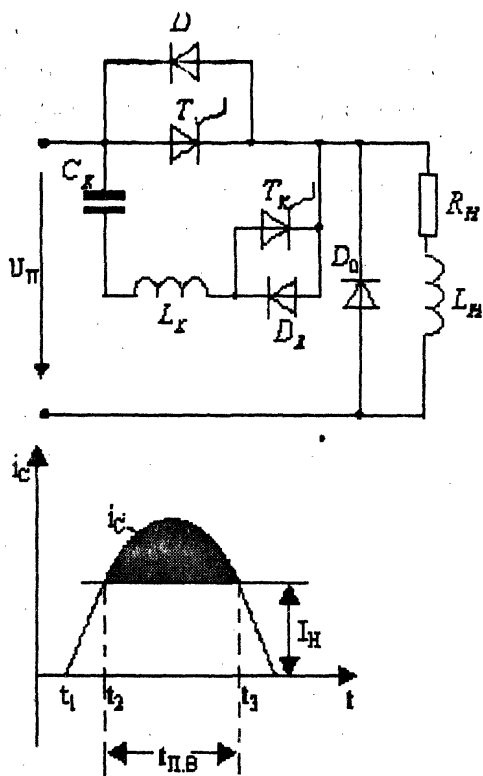


Рис. 4.42. Схемы с «мягкой» коммутацией

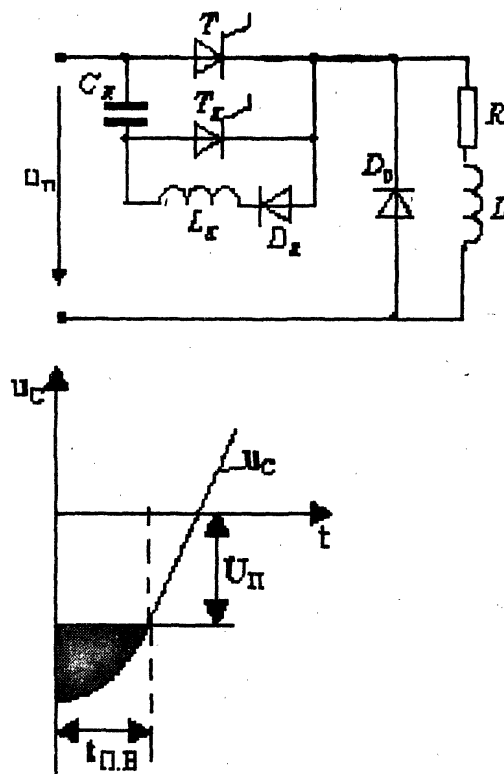


Рис. 4.43. Схемы с «жесткой» коммутацией

Рассмотренная коммутация часто называется «жесткой». Тиристоры подвержены самопроизвольному включению при быстром изменении напряжения на аноде. Это явление получило название «эффекта  $\frac{dU}{dt}$ ».

Даже при небольшом напряжении на аноде тиристор может включиться при большой скорости его изменения. Большие значения  $\frac{dU}{dt}$  может также вывести тиристор из строя.

К такому же результату может привести большая скорость нарастания тока при включении тиристора. Уменьшить потери при переключении и защитить тиристор от самопроизвольного включения и выхода из строя позволяют цепи формирования траектории (снаберы). При моделировании тиристорных схем используются виртуальные блоки из библиотеки Power System Blockset.

В библиотеке SimPowerSystem имеется две модели тиристора: Thyristor (упрощенная модель) и Detailed Thyristor (уточненная модель).

Упрощенная модель тиристора состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$ , источника постоянного напряжения  $V_f$  и ключа SW (рис. 4.44). Блок логики управляет работой ключа. При положительном

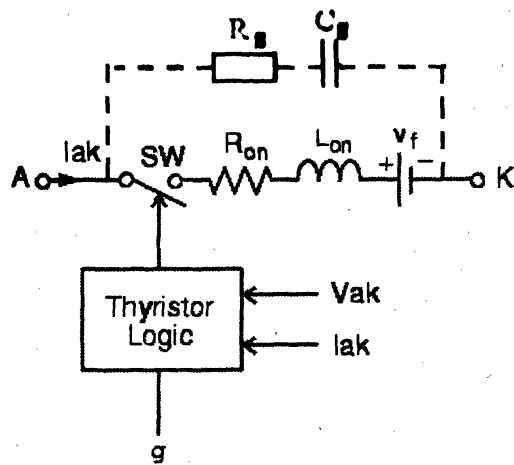


Рис. 4.44. Упрощенная модель тиристора

напряжении на тиристоре ( $V_{ak}-V_f$ ) и наличии положительного сигнала на управляющем электроде ( $g$ ) происходит замыкание ключа и через прибор начинает протекать ток. Размыкание ключа (выключение тиристора) выполняется при снижении тока  $I_{ak}$ , протекающего через тиристор, до нуля.

Пиктограмма и окно задания параметров тиристора показано на рис. 4.45.

В полях окна вводятся параметры тиристора во включенном состоянии и параметры снабера аналогично тому, как это осуществлялось для диода.

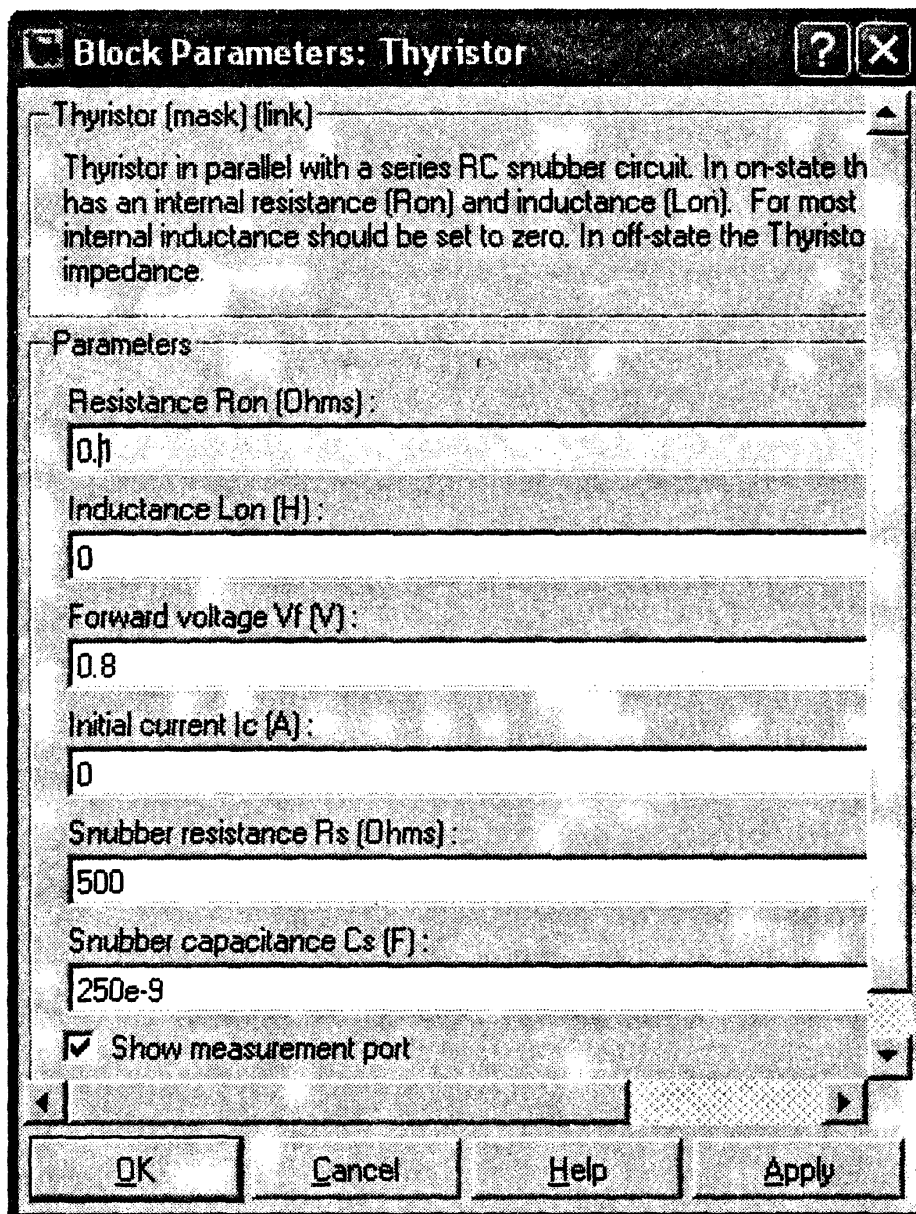
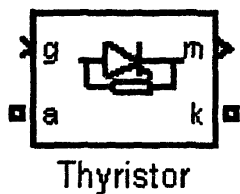


Рис. 4.45. Пиктограмма и окно настройки тиристора

В полях окна задаются: Resistance  $R_{on}$  (Ohm) — сопротивление во включенном состоянии (Ом). Inductance  $L_{on}$  (H) — индуктивность во включенном состоянии (Гн). Forward voltage  $U_f$  (V) — падение напряжения в прямом направлении (В). Initial current  $I_c$  (A) — начальное значение тока (А). При значении параметра равно нулю, моделирование начинается при закрытом состоянии тиристора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии тиристора. Snubber resistance  $R_s$  (Ohm) — сопротивление демпфирующей цепи (Ом). Snubber capacitance  $C_s$  (F) — емкость демпфирующей цепи (Ф).

В уточненной модели дополнительно задаются: Latching current  $I_i$  (A) — величина тока удержания (А). Turn of time  $T_q$  (s) — время выключения (с). При установленном флажке в поле Show measurement port создается выходной порт  $m$ , на котором формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент — анодный ток тиристора, второй — напряжение анод-катод тиристора.

*Пример 4.10.* На рис. 4.46 показана схема модели управляемого однополупериодного выпрямителя, работающего на активно-индуктивную нагрузку (*файл Thyristor*). Импульсы управления тиристором формируются блоком Pulse Generator, при этом величина угла управления тиристором определяется длительностью фазовой задержки (Phase Delay) генератора. На осциллограммах (рис. 4.46) представлены импульсы управления, напряжение, ток тиристора и напряжение на нагрузке.

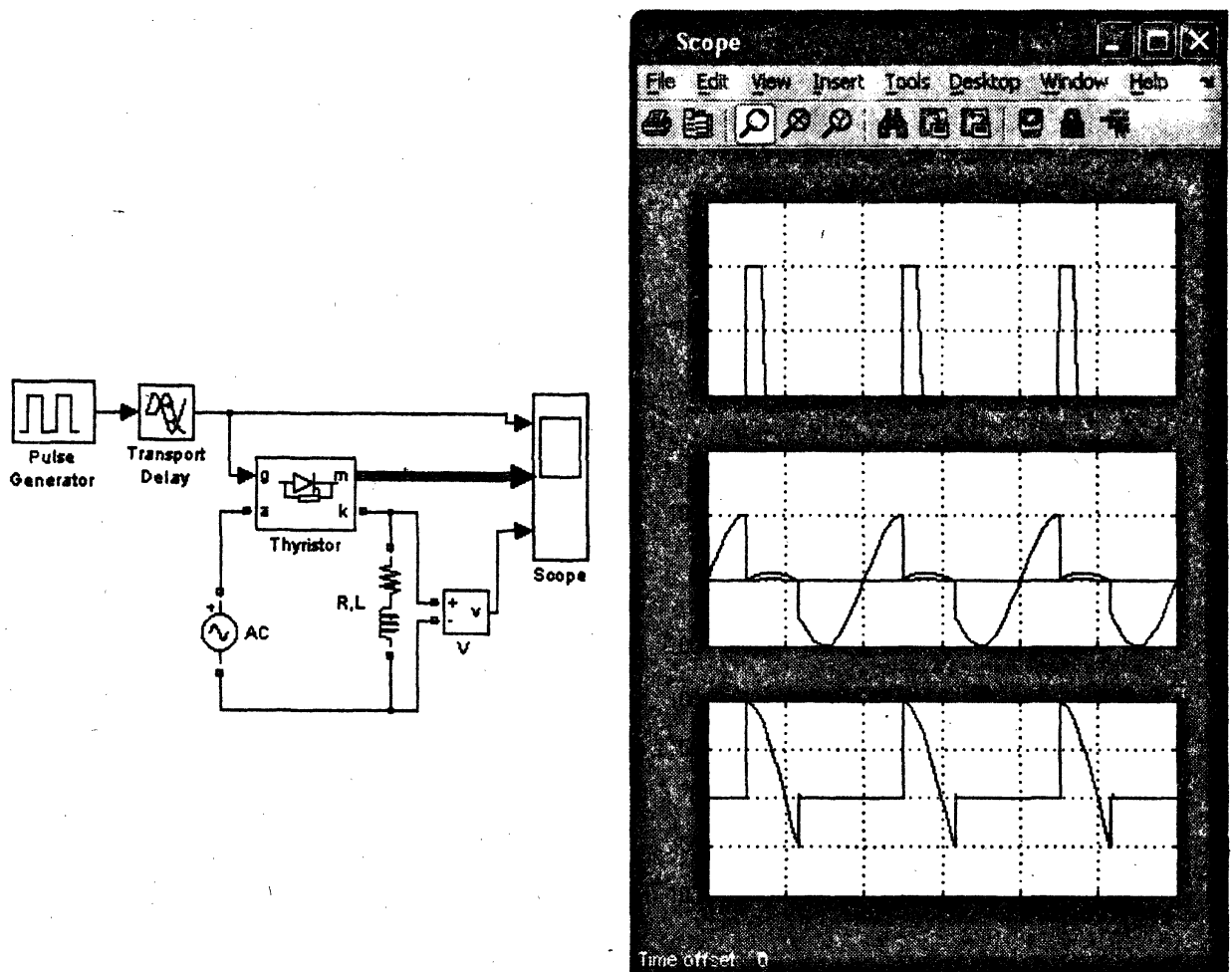


Рис. 4.46. Модель однополупериодного управляемого выпрямителя

#### 4.6.4. Полностью управляемые GTO тиристоры

Структура GTO тиристора в областях анода и катода состоит из большого числа технологических элементов, представляющих отдельные тиристоры, включенные параллельно, в результате чего он приобретает способность выключаться по управляющему электроду. Строение GTO-тиристора показано на рис. 4.47 а, его изображение на принципиальной схеме на рис. 4.47 б.

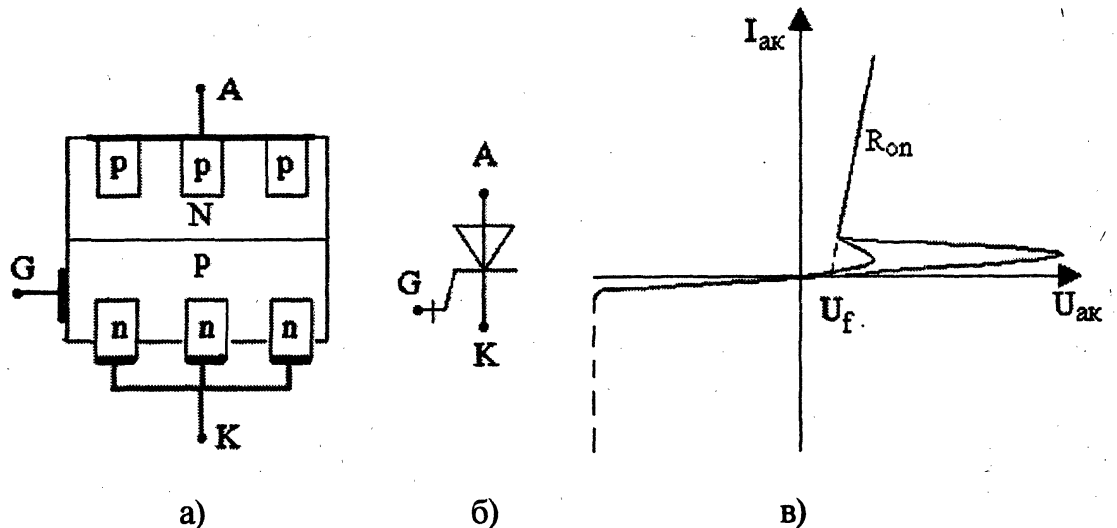


Рис. 4.47 Строение-GTO тиристора, его графическое изображение и вольт-амперная характеристика

Вольт-амперная характеристика GTO-тиристора показана на рис. 4.47 в. Она повторяет характеристику обычного тиристора. Во включенном состоянии GTO-тиристор характеризуется параметрами:

- $U_f$  – пороговое напряжение;
- динамическим сопротивлением  $R_{on}$ .

Для GTO тиристоров характерен довольно медленный процесс выключения, состоящий из двух стадий (рис. 4.48).

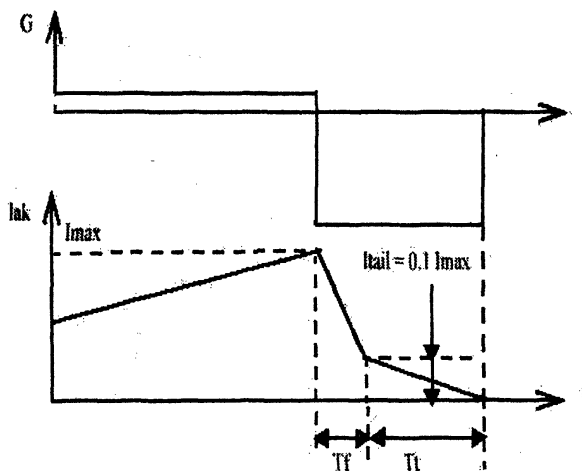


Рис. 4.48. Динамический процесс выключения GTO-тиристора

На первой стадии ток тиристора спадает ( $T_f \approx 0,1$  до от своего первоначального значения. На второй стадии ( $T_t$ ) происходит достаточно медленное уменьшение тока. Время затягивания процесса выключения (время «хвоста») обычно больше времени спада и его необходимо учитывать.

Отрицательный ток управляющего электрода, выключающий тиристор, должен иметь значительную скорость нарастания

$$\frac{di}{dt} > 20 \text{ A}/\mu\text{s}$$

и значительную амплитуду.

Для современных GTO-тиристоров эта амплитуда доходит до 30% от амплитуды тока анода. Для снижения динамических потерь при переключении и обеспечения надежной работы в схемах с GTO-тиристорами используются снаберы, аналогичные рассмотренным выше.

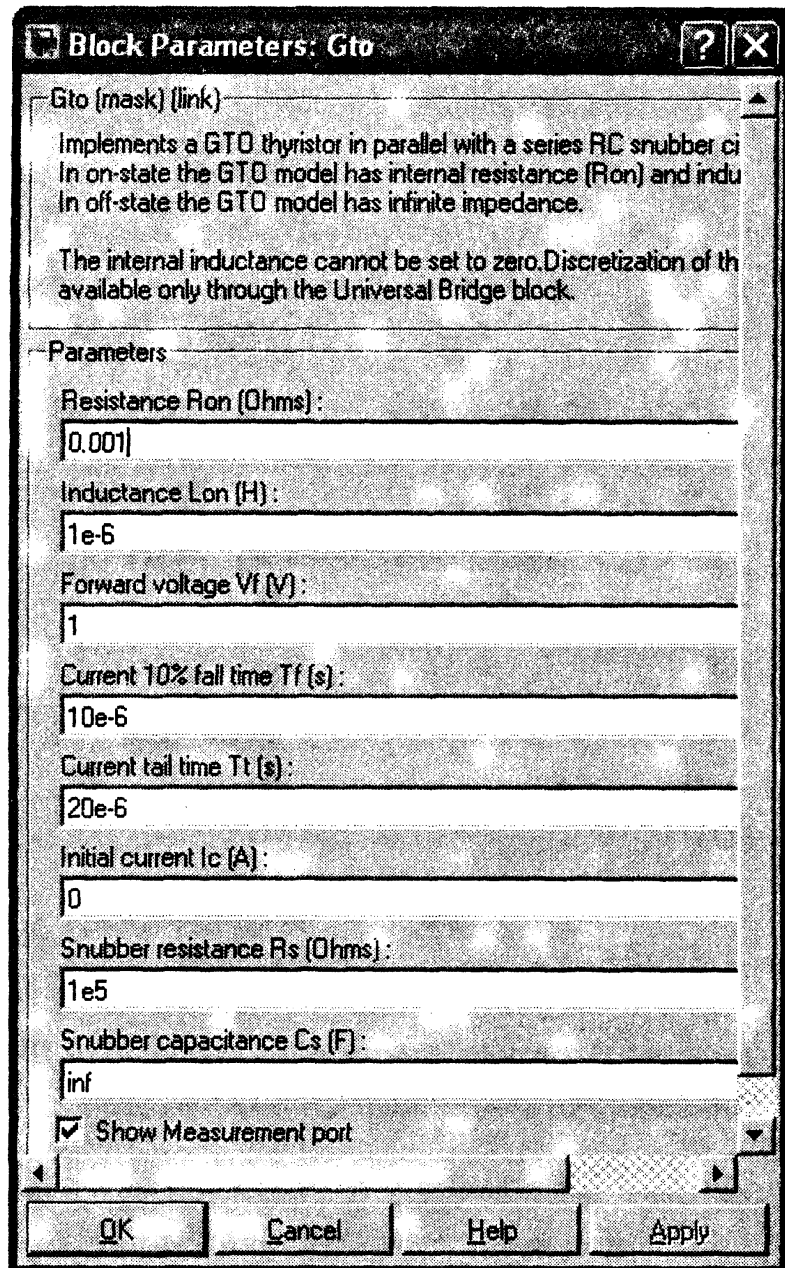
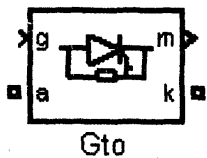


Рис. 4.49. Пиктограмма и окно настройки параметров GTO-тиристора

Пиктограмма GTO-тиристора и окно настройки параметров модели показано на рис. 4.49. В отличие от диодов и обычных тиристоров здесь добавлено два поля для ввода динамических параметров. В поле Current 10% fall time вводится время спада (Tf) в секундах, а в поле Current tail time вводится время затягивания (Tl) в секундах.

При установленном флажке в поле Show Measurement port создается выходной порт *m*, на котором формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент — анодный ток тиристора, второй — напряжение анод-катод тиристора

*Пример 4.11.* На рис. 4.50 показана модель и результаты моделирования, импульсного регулятора (стабилизатора) напряжения (*файл GTO*). Величина среднего значения напряжения задается на входе гистерезисного регулятора (Relay) и может поддерживаться постоянной, когда схема используется в качестве стабилизатора, или может изменяться для регулирования напряжения (тока) нагрузки. На рисунке представлены графики напряжения нагрузки, тока нагрузки и тока в цепи питания.

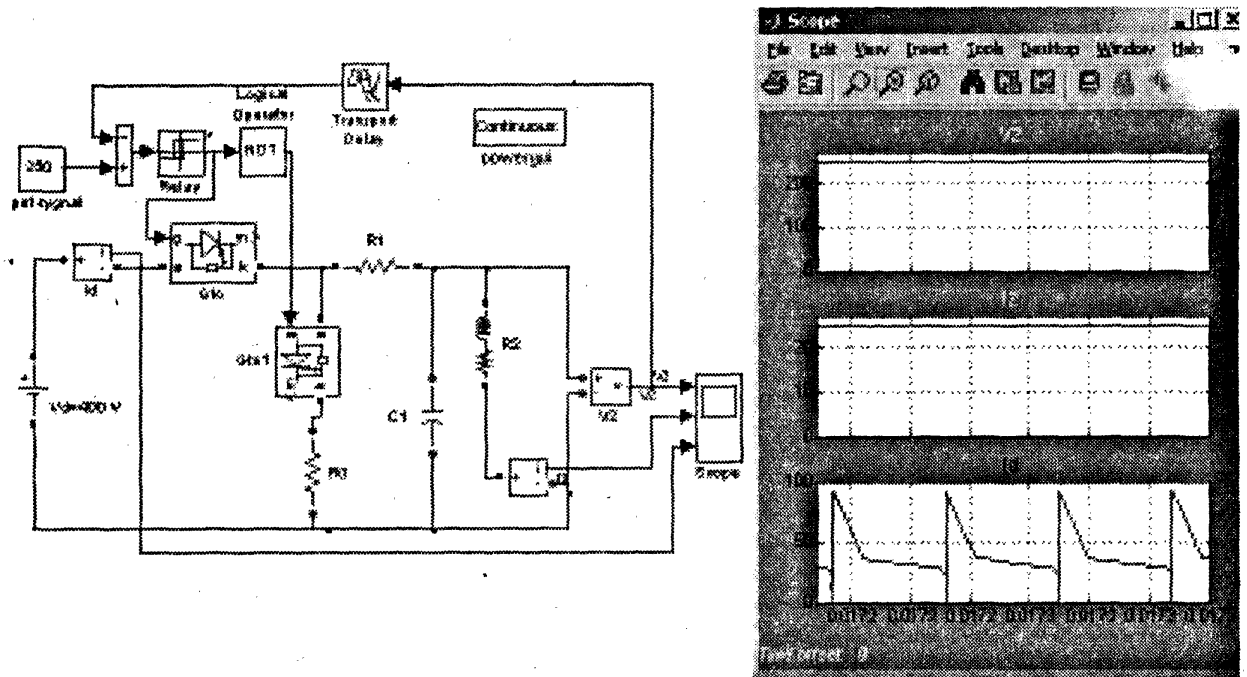


Рис. 4.50. Модель стабилизатора (регулятора) постоянного напряжения

#### 4.6.5. Биполярные IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) транзисторы

Биполярные транзисторы с изолированным затвором выполнены как сочетание входного униполярного (полевого) транзистора с изолированным затвором и выходного биполярного п-р-п-транзистора. Имеется много различных способов создания таких приборов, однако наибольшее распространение получили приборы, в которых удачно сочетаются особенности полевых транзисторов и дополнительного биполярного транзистора.

Схематическое изображение такого транзистора приведено на рис. 4.51 а.

На этой схеме VT – полевой транзистор с изолированным затвором, VT1 – биполярный транзистор, R1 – последовательное сопротивление канала полевого транзистора, R2 – сопротивление, шунтирующее переход база-эмиттер биполярного транзистора VT1. Благодаря сопротивлению R2 биполярный транзистор заперт и не оказывает существенного влияния на работу полевого транзистора VT. Структура транзистора IGBT дополнена еще одним р-п-переходом, благодаря которому в схеме замещения появляется еще один р-п-р-транзистор VT2 (рис. 4.51 б).

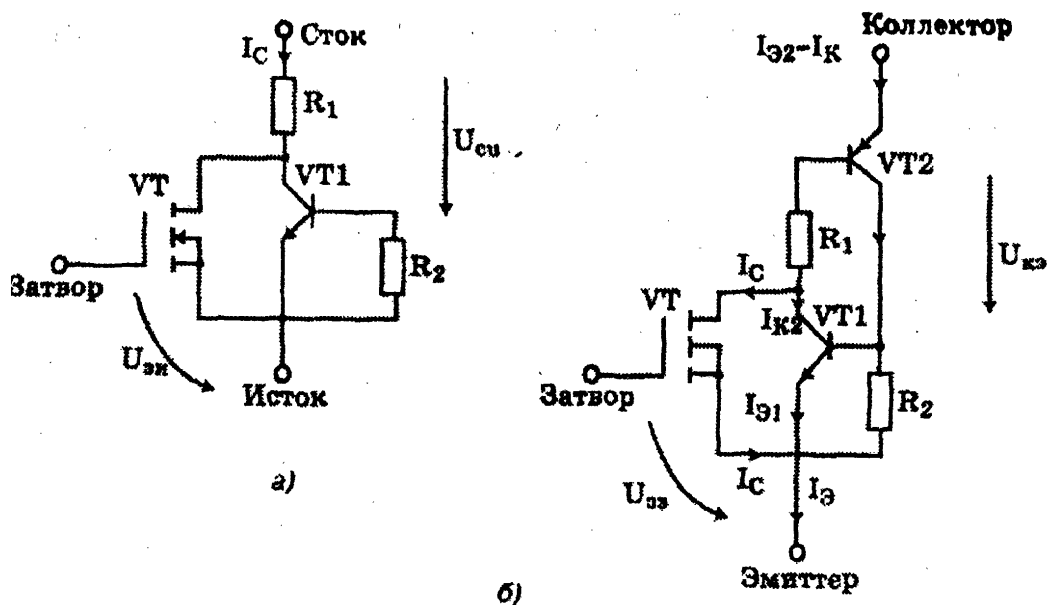


Рис. 4.51. Схематическое изображение IGBT-транзистора

Образовавшаяся структура из двух транзисторов VT1 и VT2 имеет глубокую внутреннюю положительную обратную связь, т. к. ток коллектора транзистора VT2 влияет на ток базы. Условное схематическое изображение транзистора IGBT и его модель приведены на рис. 4.52.

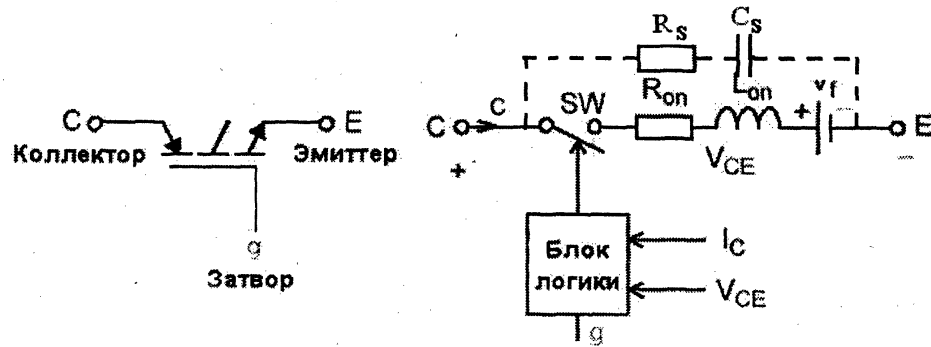


Рис. 4.52. Условное схематическое изображение транзистора IGBT и его модель

Модель IGBT-транзистора состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$ , источника постоянного напряжения  $V_f$  и ключа  $SW$ . Блок логики управляет работой ключа. Включение прибора происходит в случае, если напряжение коллектор-эмиттер положительно и больше, чем  $V_f$ , и на затвор транзистора подан положительный сигнал ( $g > 0$ ). Выключение прибора происходит при нулевом ( $g = 0$ ), или отрицательным ( $g < 0$ ) сигнале на затворе. В модели параллельно самому прибору включена последовательная  $R_s$   $C_s$ -цепь, выполняющая демпфирующие функции.

Динамические параметры IGBT-транзистора аналогичны параметрам GTO-тиристора.

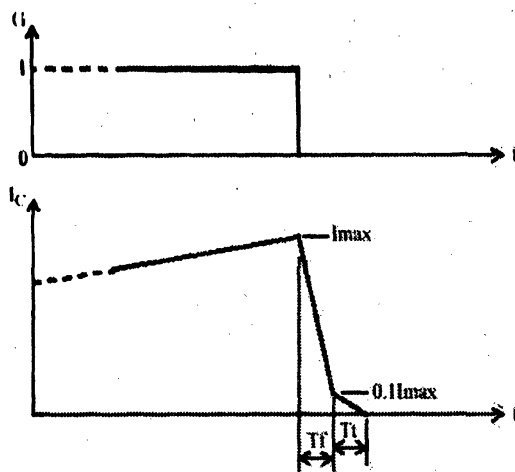


Рис. 4.53. Динамический процесс выключения IGBT-транзистора

В модели учитывается конечное время выключения транзистора. Процесс выключения разбит на два участка (рис. 4. 53.) и характеризуется, соответственно, временем спада ( $T_f$ ), при котором ток коллектор-эмиттер уменьшается до 0,1 от тока в момент выключения ( $I_{max}$ ) и временем затягивания ( $T_t$ ), при котором ток уменьшается до нуля.

Пиктограмма и окно настройки параметров транзистора показано на рис. 4.54.

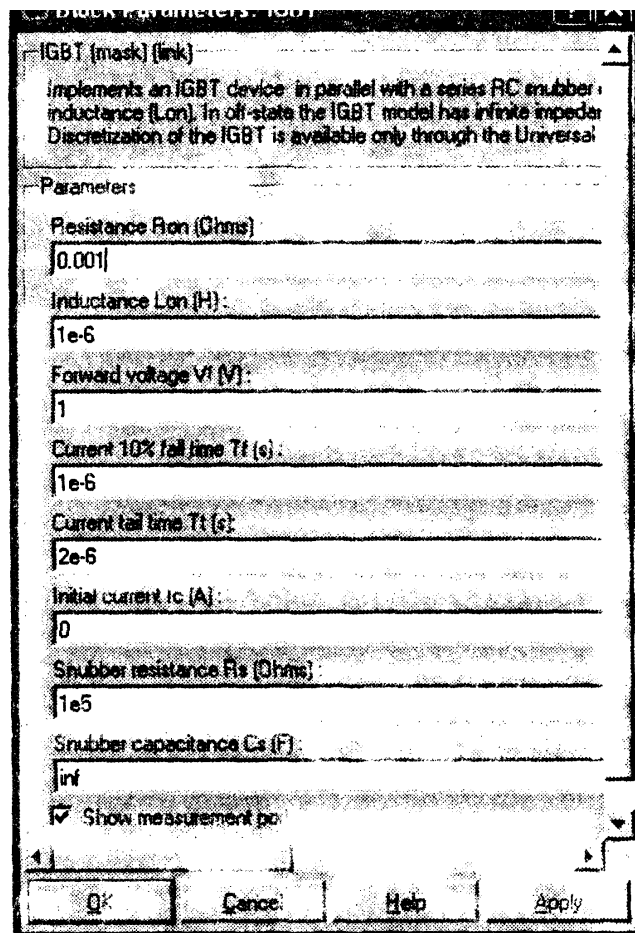
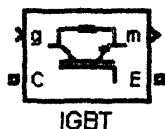


Рис. 4.54. Пиктограмма и окно параметров IGBT-транзистора

В полях окна задаются: Resistance Ron (Ohm) — сопротивление во включенном состоянии (Ом). Inductance Lon (H) — индуктивность во включенном состоянии (Гн). Forward voltage Vf (V) — падение напряжения в прямом направлении (В). Current 10% fall time Tf (s) — время спада тока до уровня 0,1 от тока в момент выключения (с). Current tail time Tt (s) — время затягивания (с) — время, за которое ток уменьшится до нуля от уровня 0,1 тока в момент выключения. Initial current Ic (A) — начальное значение тока (А). При значении параметра

равном нулю моделирование начинается при закрытом состоянии прибора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии прибора. Snubber resistance Rs (Ohm) — сопротивление демпфирующей цепи (Ом). Snubber capacitance Cs (F) — емкость демпфирующей цепи (Ф)]. На выходном порту блока обозначенном *m*, формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент — ток коллектор-эмиттер транзистора, второй — напряжение коллектор-эмиттер транзистора.

*Пример 4.12.* На рис. 4.55 показана схема модели генератора СВЧ с параллельным включением транзистора по отношению к нагрузке (*файл IGBT*). На рисунке представлены графики тока транзистора (верхняя осциллограмма) и напряжения в активно-емкостной нагрузке (на транзисторе). Аналогичные схемы используются в микроволновых печах.

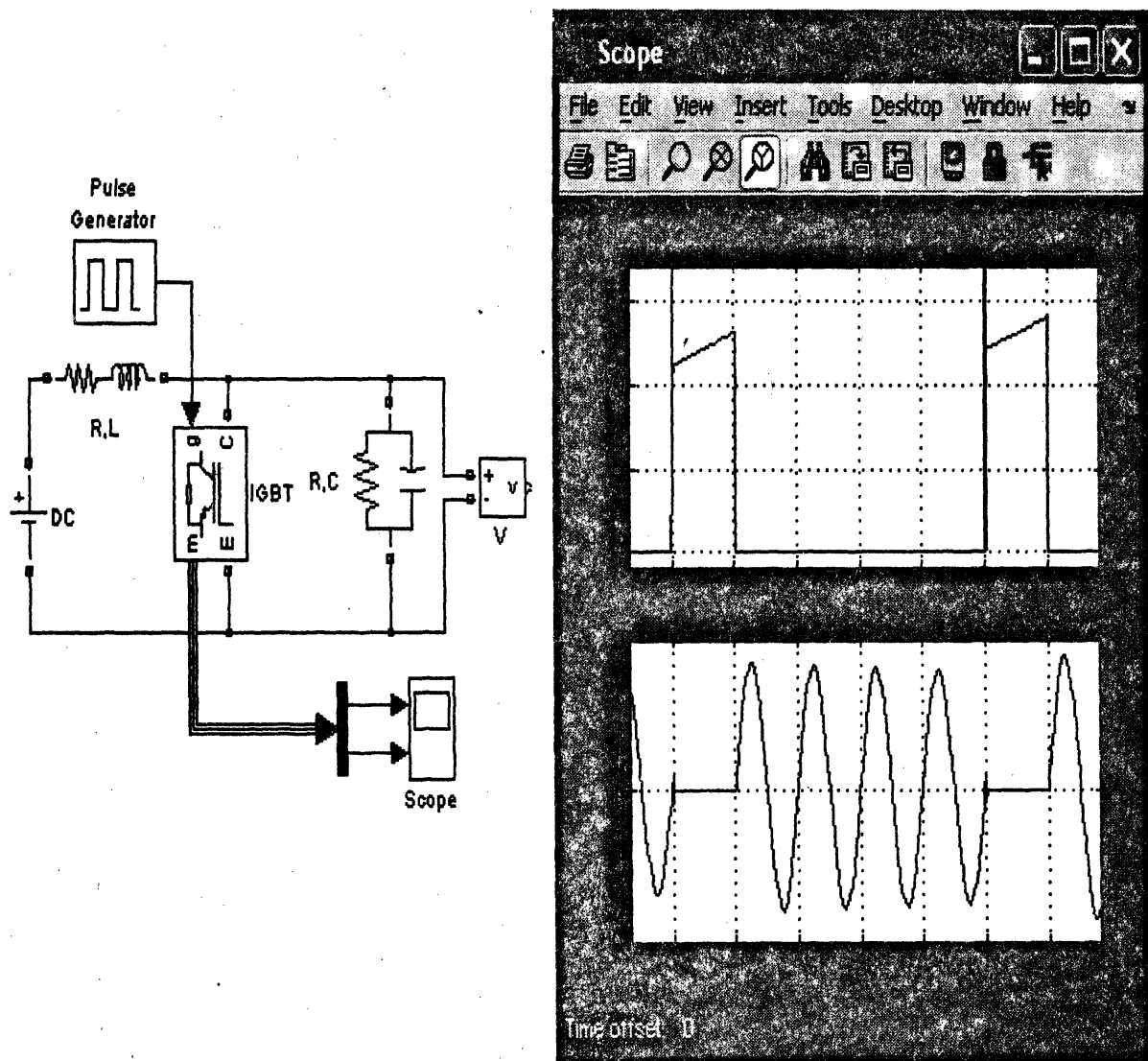


Рис. 4.55. Модель и электромагнитные процессы в СВЧ-генераторе

#### 4.6.6. Полевые MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) транзисторы

В полевых или униполярных транзисторах изменение проводимости проводящего канала осуществляется с помощью электрического поля, перпендикулярного направлению тока. Электроды, подключенные к проводящему каналу, называются стоком (Drain) и истоком (Source), а управляющий электрод называется затвором (Gate). Напряжение управления, которое создает поле в канале, подключается между затвором и истоком. В силовых транзисторах MOSFET используется конструктивно изолированный от проводящего канала затвор. Условное схематическое изображение транзистора MOSFET и его модель приведены на (рис. 4.56).

Модель Mosfet-транзистора состоит из последовательно включенных резистора  $R_{on}$ , индуктивности  $L_{on}$  и ключа SW. Блок логики управляет работой ключа. Включение прибора происходит в случае, если напряжение сток-исток положительно и на затвор транзистора подан положительный сигнал ( $g > 0$ ). Выключение прибора происходит при уменьшении сигнала на затворе до нуля ( $g = 0$ ). При отрицательном напряжении коллектор-эмиттер транзистор находится в выключенном состоянии и ток проводит обратный диод. В модели параллельно самому прибору включена последовательная RC-цепь, выполняющая демпфирующие функции.

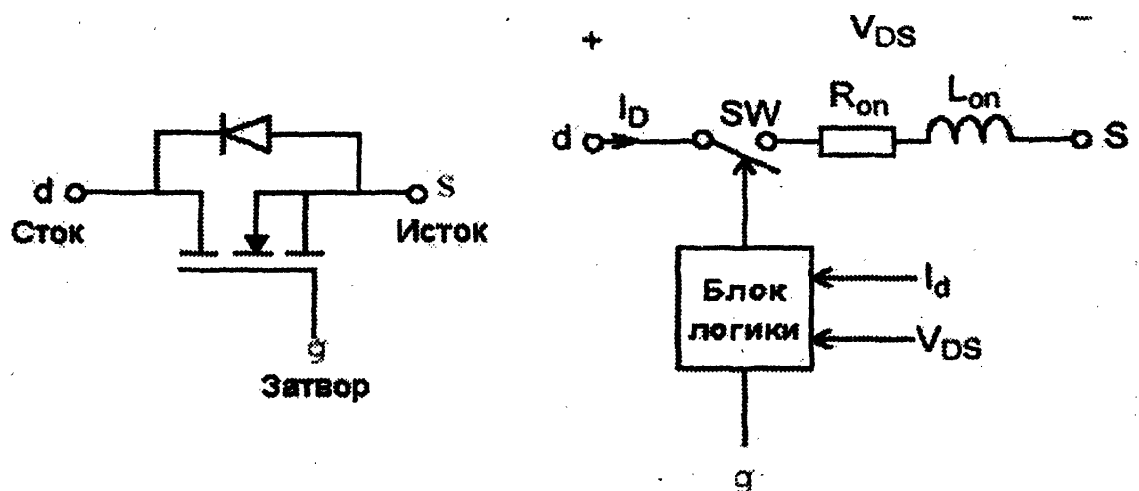


Рис. 4.56. Схематическое изображение и модель транзистора MOSFET

Статические характеристики полевых транзисторов при ключевом режиме работы аналогичны транзисторам IGBT. Динамические процессы выключения полевого транзистора происходят значительно быстрее, чем в транзисторах IGBT, поэтому при выключении не учитываются времена спада ( $T_f$ ) и затягивания процесса выключения ( $T_l$ ).

Пиктограмма и окно настройки параметров транзистора показано на рис. 4.57.

В полях окна задаются: Resistance  $R_{on}$  (Ohm) — сопротивление во включенном состоянии (Ом).

Inductance  $L_{on}$  (H) — индуктивность во включенном состоянии (Гн).

Initial current  $I_c$  (A) — начальное значение тока (А). При значении параметра равном нулю моделирование начинается при закрытом состоянии прибора. Если параметр задан положительным значением, то моделирование будет начато при открытом состоянии прибора.

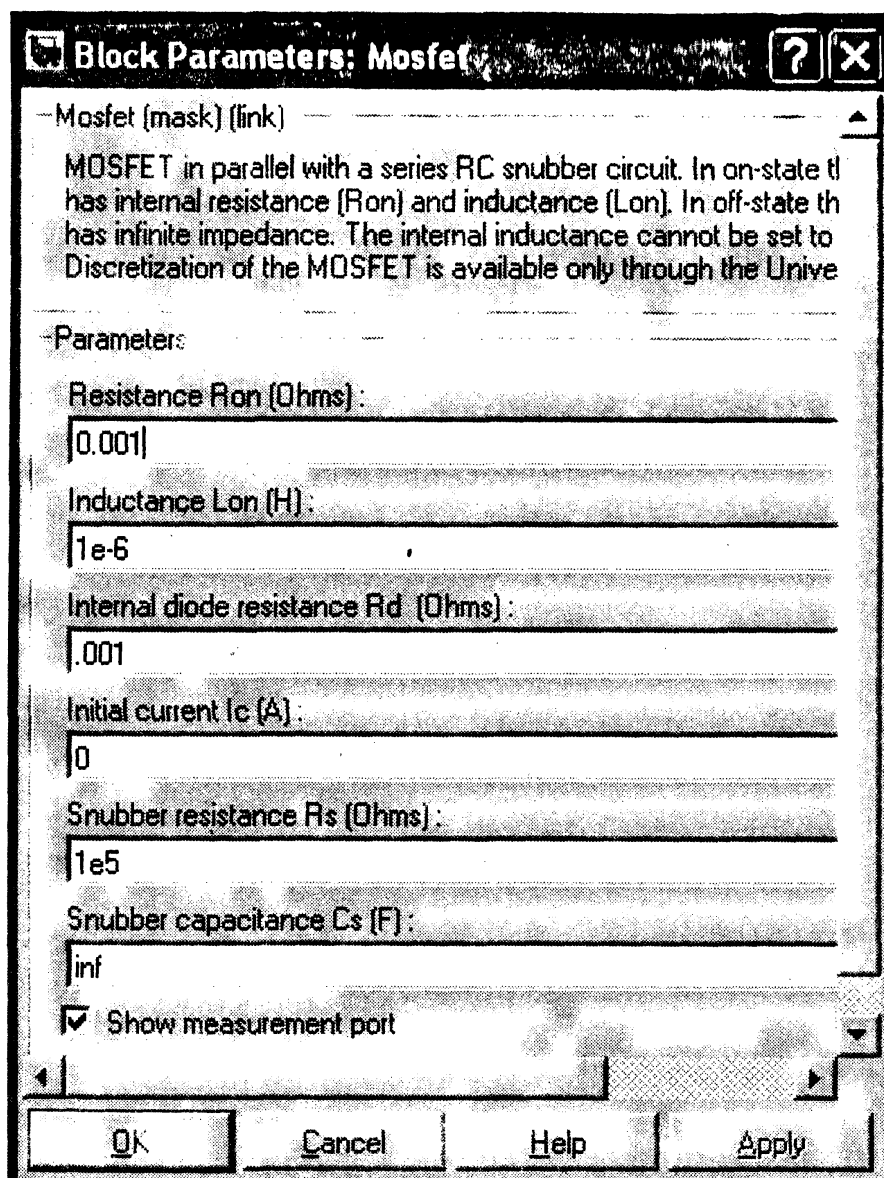
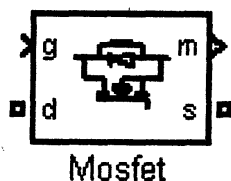


Рис. 4.57. Пиктограмма и окно настройки транзистора MOSFET

Snubber resistance  $R_s$  (Ohm) — сопротивление демпфирующей цепи (Ом). Snubber capacitance  $C_s$  (F) — емкость демпфирующей цепи (Ф). На выходном порту блока обозначенном  $m$ , формируется векторный Simulink-сигнал из двух элементов. Первый элемент — ток сток-исток транзистора, второй — напряжение сток-исток транзистора.

**Пример 4.13.** На рис. 4.58 показана схема модели импульсного регулятора постоянного напряжения (*файл Mosfet*). Среднее напряжение на нагрузке регулируется длительностью импульса на выходе блока Pulse Generator. На рисунке представлены также графики напряжения и тока в транзисторе (верхние осциллограммы) и напряжения на нагрузке.

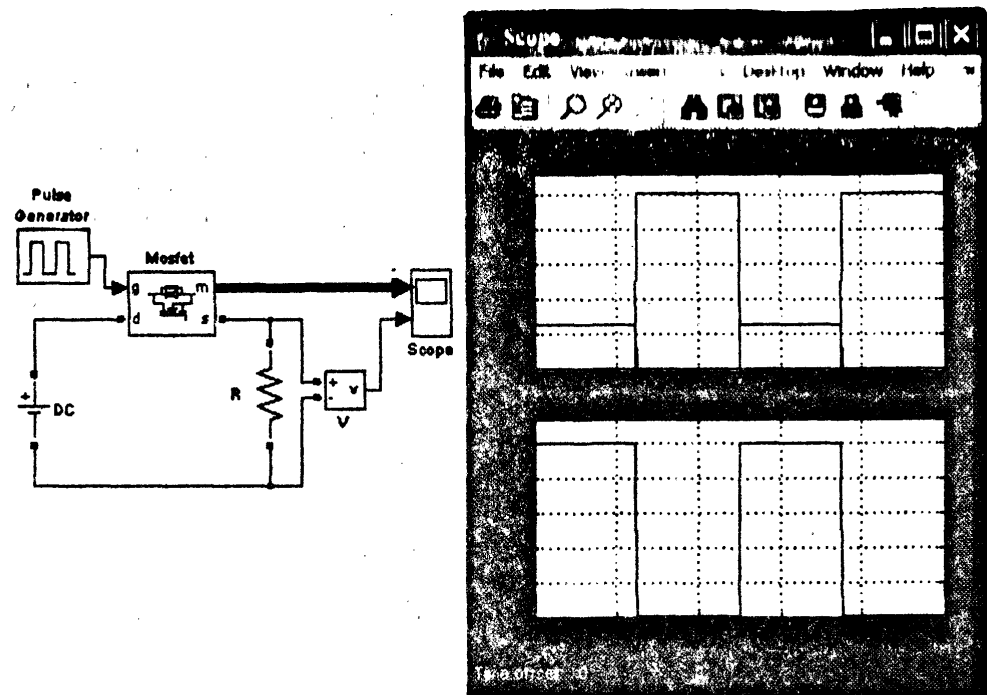


Рис. 4.58. Модель и электромагнитные процессы в импульсном регуляторе

#### 4.6.7. Интегрально-модульные конструкции в Sim Power System

Развитие технологии изготовления силовых полупроводниковых элементов привело к созданию модульных и интегральных конструкций. В модульных конструкциях, как правило, технологически соединены несколько полупроводниковых элементов, объединенных в схему. В интегральных конструкциях (PIC-Power Integrated Circuit) объединено несколько модулей, образующих силовой полупроводниковый преобразователь. В пакете расширения Power System реализован интегральный модуль, являющийся универсальным силовым полупроводниковым преобразователем.

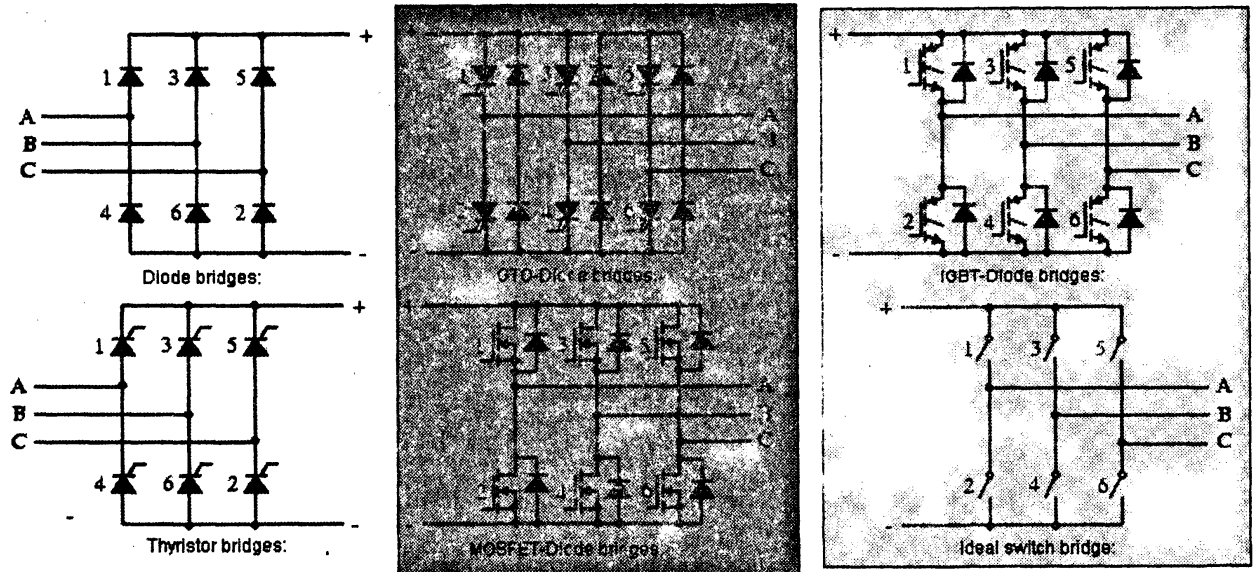


Рис. 4.59. Принципиальные схемы модульных конструкций в Sim Power System

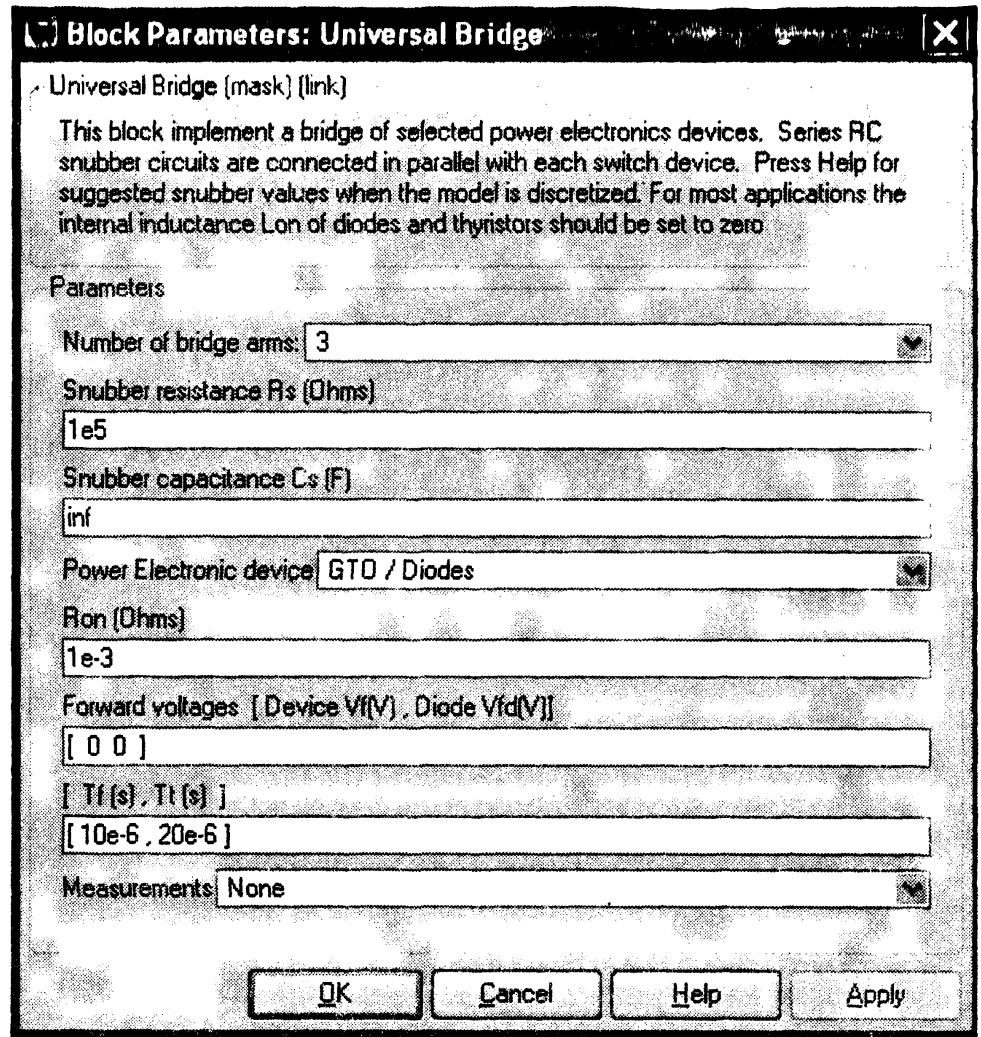
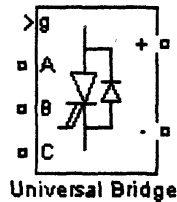


Рис. 4.60 Пиктограмма и окно настройки универсального преобразователя

Принципиальные схемы всех реализуемых преобразователей приведены на рис. 4.59. При этом могут быть реализованы однофазные одноплечевые схемы, когда используется только одно плечо, мостовые однофазные схемы, содержащие два плеча и трехфазные мостовые схемы.

Пиктограмма и окно настройки универсального преобразователя показано на рис. 4.60. В полях окна задаются следующие параметры универсального моста:

- количество плеч моста;
- параметры демпфирующих цепей;
- полупроводниковые элементы моста;
- статические параметры этих элементов в открытом (насыщенном) состоянии;
- динамические параметры полупроводниковых элементов;
- в поле Measurement выбираются переменные состояния, которые измеряются блоком Multimeter.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.2.5. МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ)**

### **ВОПРОСЫ**

1. Введение.
2. Силовые полупроводниковые преобразователи в системах мехатроники.
3. Основные характеристики устройств силовой электроники.
4. Управляемые выпрямители :
  - Вводные замечания;
  - Однофазный управляемый выпрямитель;
  - Управляемый выпрямитель в режиме инвертора, ведомого сетью;
  - Трехфазные управляемые выпрямители;
  - Высшие гармоники первичного тока управляемых выпрямителей;
  - Энергетические и электромагнитные характеристики управляемых выпрямителей;
  - Моделирование управляемого выпрямителя.

### **ЛИТЕРАТУРА**

2. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

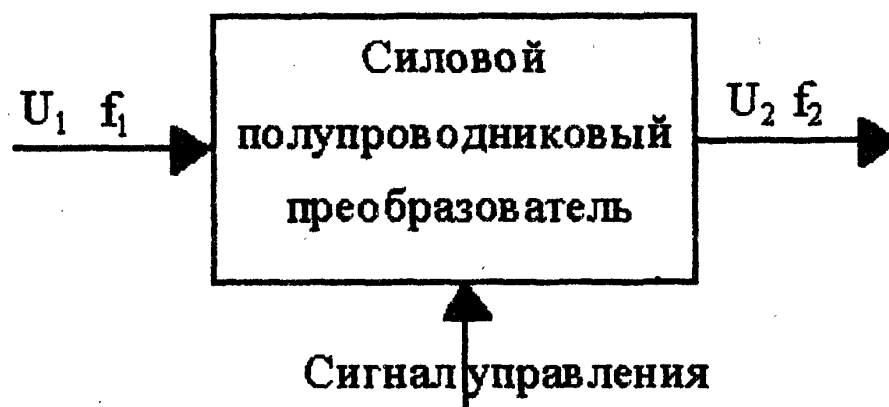
#### **1. Введение**

Преобразовательная техника, которая последние годы стала именоваться силовой электроникой, является областью нелинейной электротехники, в которой изучаются свойства полупроводниковых преобразователей.

Полупроводниковые преобразователи, построенные на силовых полупроводниковых приборах (диоды, тиристоры, мощные транзисторы), служат для преобразования параметров, характеризующих электрическую энергию. К этим параметрам относятся:

- тип и форма напряжения и тока (например, постоянные, переменные, синусоидальные, несинусоидальные периодические, импульсные и т. д.);
- величина (значение) напряжения и тока (среднее для постоянных, действующее, амплитудное для переменных);
- частота;
- число фаз.

Блок-схема полупроводникового преобразователя изображена на рис. 5.1.



Полупроводниковый преобразователь преобразует электрическую энергию с параметрами  $u_1, f_1$  в электрическую энергию с параметрами  $u_2, f_2$  при воздействии сигналов управления.

Кроме силовых полупроводниковых элементов в состав полупроводникового преобразователя, как правило, входят и другие элементы, к ним, в первую очередь, относятся:

- активные элементы — неуправляемые и управляемые источники напряжения и тока;
- реактивные элементы — конденсаторы, катушки индуктивности, дроссели;
- электромагнитные преобразующие элементы — силовые трансформаторы, измерительные трансформаторы;
- выключатели и переключатели;
- система управления, которая в общем случае представляет собой сложное электронное устройство, реализованное либо на элементах интегральной микросхемотехники, либо на микроконтроллере;
- система защиты и сигнализации аварийных режимов.

## 5.2. Силовые полупроводниковые преобразователи в системах мехатроники

Силовые полупроводниковые преобразователи в системах мехатроники выполняют функцию регулирования скорости и момента электрического двигателя. Они включены между двигателем и основным источником питания. По принципу действия силовые преобразователи разделяются на следующие базовые типы:

- широтно-импульсные преобразователи (ШИП), связывающие источник постоянного тока с двигателем постоянного тока;
- управляемые выпрямители (УВ), связывающие источник переменного тока с двигателем постоянного тока, частным случаем управляемого выпрямителя является выпрямитель неуправляемый, который используется во вторичных источниках питания (В);
- автономные инверторы (АИ), связывающие источник постоянного тока с двигателем переменного тока;
- непосредственные преобразователи частоты (НПЧ), связывающие источник переменного тока с двигателем переменного тока.

Функциональные схемы базовых преобразователей показаны на рис. 5.2.

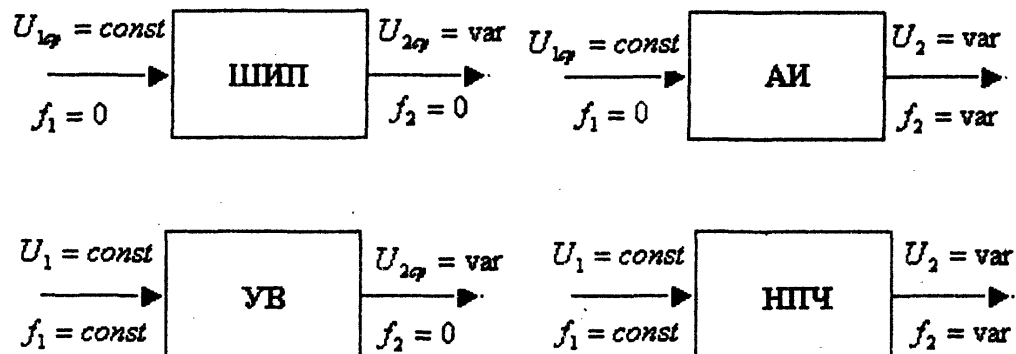


Рис. 5.2. Функциональные схемы силовых полупроводниковых преобразователей

Здесь следует напомнить, что постоянные напряжения характеризуются средними значениями, а переменные — действующими значениями.

Принципы функционирования базовых преобразователей представлены на рис. 5.3.

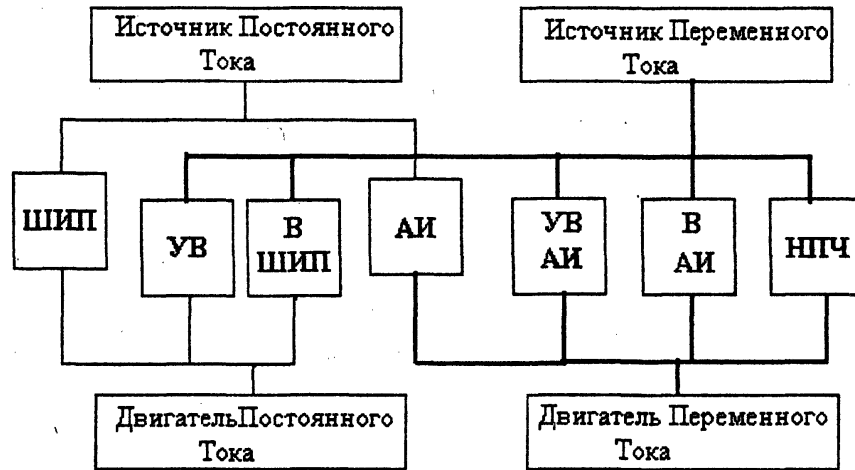


Рис. 5.3. Принципы функционирования базовых преобразователей в системах мехатроники

Широтно-импульсный преобразователь преобразует постоянное напряжение питания в постоянное регулируемое напряжение на выходе.

Управляемый выпрямитель преобразует переменное, обычно синусоидальное напряжение частоты 50 Гц постоянного действующего значения (обычно 220 В) в постоянное регулируемое напряжение на выходе.

Автономный инвертор преобразует постоянное напряжение питания в переменное напряжение на выходе с регулируемым действующим значением и регулируемой частотой.

Непосредственный преобразователь частоты преобразует переменное, обычно синусоидальное напряжение частоты 50 Гц постоянного действующего значения (обычно 220 В) в переменное напряжение на выходе с регулируемым действующим значением и регулируемой частотой.

Возможные варианты применения базовых силовых преобразователей в системах мехатроники постоянного и переменного тока показаны на рис. 5.3.

В системах постоянного тока исполнительным двигателем является двигатель постоянного тока. При питании от источника постоянного тока (аккумулятор, солнечная батарея, генератор постоянного тока) в качестве силового преобразователя используется ШИП, если источником питания является сеть переменного тока, то может быть применен УВ либо сочетание В+ШИП (рис. 5.3).

В системах переменного тока исполнительным двигателем является машина переменного тока. В этом случае при питании от источника постоянного тока применяется АИ, а при питании от источника переменного тока НПЧ, сочетания УВ+АИ, либо В+АИ.

Следует отметить, что для управления двигателями постоянного тока необходимо регулировать только напряжение, а для управления двигателями переменного тока — напряжение и частоту.

Далее рассматриваются силовые полупроводниковые преобразователи, получившие в последнее время преимущественное распространение в системах мехатроники. К таким преобразователям в системах постоянного тока относятся УВ, ШИП, а в системах переменного тока — АИ.

### **5.3. Основные характеристики устройств силовой электроники**

Свойства систем силовой электроники изучаются на основе их основных характеристик, которые можно разделить на статические (установившиеся режимы работы), квазиустановившиеся и динамические (переходные режимы работы).

К статическим характеристикам относятся:

- нагрузочные (внешние) характеристики, представляющие собой зависимости выходного напряжения от тока нагрузки;
- регулировочные характеристики, представляющие собой зависимости выходного напряжения (тока) от сигнала управления;
- электромагнитные характеристики, представляющие собой зависимости токов в цепи питания преобразователя, а также токов в полупроводниковых элементах преобразователя от тока нагрузки;

- энергетические характеристики, представляющие собой зависимости активной, реактивной и полной мощности в цепи питания преобразователя и в нагрузке, а также мощности потерь в полупроводниковых элементах преобразователя от тока нагрузки или от мощности на выходе;
- спектральные характеристики.

Нагрузочная характеристика определяет внутреннее сопротивление преобразователя, которое включено последовательно с нагрузкой и влияет на ее параметры (например, для двигателя постоянного тока внутреннее сопротивление преобразователя увеличивает сопротивление якоря, уменьшая тем самым электромагнитную постоянную двигателя).

Регулировочная характеристика определяет коэффициент усиления преобразователя как динамического звена мехатронной системы.

Важным аспектом при исследовании устройств силовой электроники является спектральный анализ электромагнитных процессов. Это обусловлено тем, что всякое преобразование электрической энергии связано с искажением формы токов и напряжений. Основные свойства силового преобразователя существенно зависят от этих искажений. Количественно эти искажения можно оценить при разложении несинусоидальных токов и напряжений в ряд Фурье, т. е. при реализации спектрального анализа.

К квазиустановившимся следует отнести мгновенные электромагнитные процессы в нагрузке, в источнике питания и силовых полупроводниковых элементах в установившемся режиме работы полупроводникового преобразователя.

К динамическим характеристикам относятся:

- переходные электромагнитные процессы в нагрузке при скачкообразном изменении параметров источника питания;
- переходные электромагнитные процессы в источнике питания при скачкообразном изменении параметров нагрузки;
- переходные электромагнитные процессы в нагрузке и источнике питания при скачкообразном изменении величины входного сигнала;
- переходные электромагнитные процессы в полупроводниковых элементах преобразователя при их переключении.

Особую роль при исследовании динамических процессов занимают аварийные режимы в силовых преобразователях. Выход из строя одного элемента преобразовательной системы может стать причиной дальнейших более серьезных аварий. Поэтому своевременная диагностика и защита являются неотъемлемой частью сложных преобразовательных систем.

При исследовании силового полупроводникового преобразователя далеко не всегда требуется расчет всех перечисленных характеристик. Кроме того, исследователя могут интересовать свойства, отличные от перечисленных.

Все эти задачи решаются при наличии модели исследуемого устройства. Разработанная модель выполняет роль лабораторного стенда, на котором можно без боязни что либо испортить, задавать и исследовать любые режимы и характеристики.

## 5.4. Управляемые выпрямители [10, 19]

### 5.4.1. Вводные замечания

Выпрямители и управляемые выпрямители строятся с использованием диодов и тиристоров. Выпрямительные установки средней и большой мощности выполняют преимущественно по многофазным схемам. Применение многофазных схем снижает загрузку полупроводниковых приборов по току, уменьшает коэффициент пульсации и повышает частоту пульсации выпрямленного напряжения, что облегчает задачу его сглаживания. Вместе с тем существуют потребители постоянного тока, которые в силу тех или иных условий получают энергию от однофазных выпрямителей.

В мехатронных системах применяются реверсивные и неререверсивные управляемые выпрямители. Первые используются как силовые регуляторы для управления двигателем постоянного тока по цепи якоря. В этом случае в цепь нагрузки управляемых выпрямителей входят: активное сопротивление, индуктивность и встречная ЭДС. Неререверсивные схемы используются как вторичные источники питания с регулируемым напряжением, в этом случае в цепь нагрузки управляемых выпрямителей входят индуктивность и конденсатор выходного фильтра с параллельно включенной нагрузкой.

Далее реверсивные управляемые выпрямители рассматриваются на примере однофазных схем.

### 5.4.2. Однофазный управляемый выпрямитель

При применении выпрямителей приходится решать задачу управления средним значением выпрямленного напряжения на нагрузке  $U_H$ .

Однофазные управляемые выпрямители выполняются по схеме с нулевым выводом трансформатора (одноплечевые) и по мостовой схеме (двухплечевые). Принцип действия и характеристики однофазных управляемых выпрямителей рассмотрим на примере схемы с нулевым выводом трансформатора (рис. 5.4).

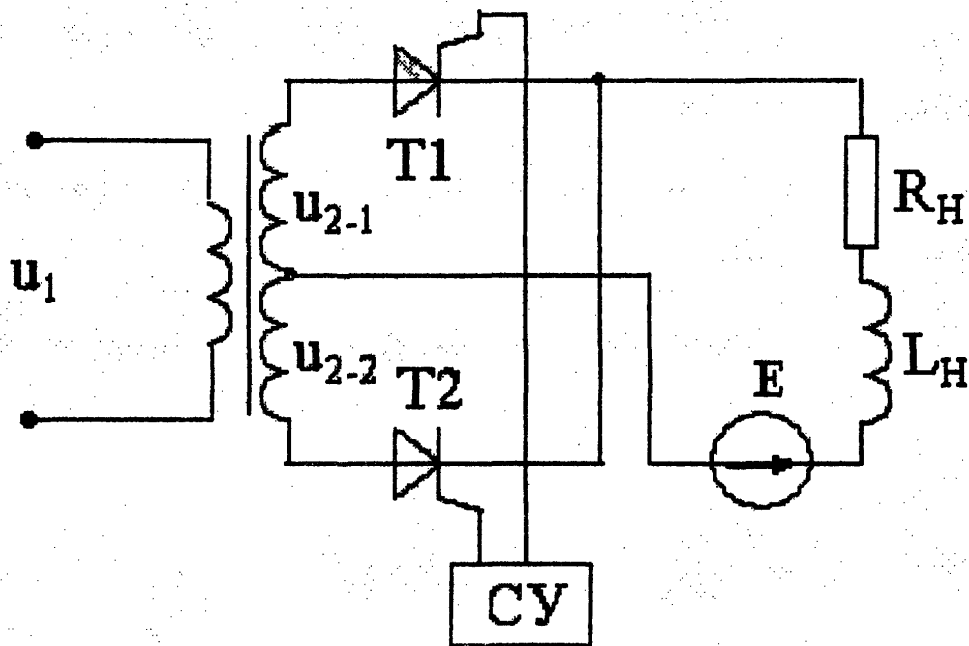


Рис. 5.4. Однофазный управляемый выпрямитель

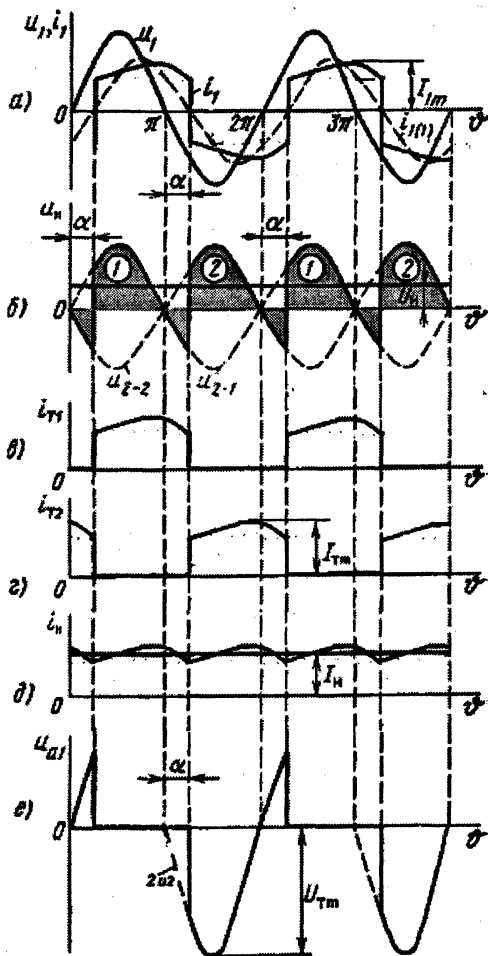


Рис. 5.5 а-е. Электромагнитные процессы в однофазном УВ

Рассмотрим работу управляемого выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку с противо ЭДС.

Временные диаграммы напряжений и токов, приведенные на рис. 5.5 а-е, поясняют работу схемы.

В момент времени  $\alpha$  от системы управления (СУ) выпрямителя поступает импульс на управляющий электрод тиристора Т1. В результате отпирания тиристор Т1 подключает нагрузку на напряжение вторичной обмотки трансформатора. На нагрузке на интервале  $\alpha - \pi$  формируется напряжение  $u_H$  (затемненная область на рис. 5.5 б), представляющее собой участок кривой напряжения  $u_{2-1}$ . Через нагрузку и тиристор Т1 протекает один и тот же ток. При переходе напряжения питания через нуль ( $\varphi = \pi$ ) ток тиристора Т1 продолжает протекать вследствие того, в нагрузке включена индуктивность. В кривой выходного напряжения  $u_H$  создаются отрицательные участки.

Очередной отпираний импульс подается на тиристор Т2. Отпирание этого тиристора приводит к запираанию Т1. При этом к нагрузке прикладывается положительное напряжения той же формы, что и на интервале проводимости тиристора Т1.

На интервале проводимости тиристора Т2, сумма напряжений вторичных обмоток трансформатора подключаются к тиристоры Т1, вследствие чего, с момента отпирания тиристора Т2, на тиристоре Т1 действует обратное напряжение (рис. 5.5 е). В последующем процессы в схеме следуют аналогично, рассмотренным выше. Токи тиристоров показаны на рис. 5.5 в, г, а ток нагрузки — на рис. 5.5 д.

Потребляемый из сети ток  $i_1$  показан на рис. 5.5 а. Первая гармоника потребляемого тока  $i_1(1)$  отстает от напряжения сети по фазе. Это приводит к потреблению выпрямителем из сети реактивной мощности, что неблагоприятно сказывается на энергетических характеристиках.

Рассмотренный фазовый метод управления может быть реализован с помощью фазосдвигающих способов, одним из которых является вертикальный способ управления, основанный на сравнении опорного напряжения (обычно пилообразной формы) и постоянного напряжения сигнала управления. Равенство мгновен

ных значений этих напряжений определяет фазу  $\alpha$ , при которой схема вырабатывает импульс, затем усиливаемый и подаваемый на управляющий электрод тиристора. Изменение фазы  $\alpha$  управляющего импульса достигается изменением уровня входного напряжения управления  $u_y$ . Функциональная схема такого управления приведена на рис. 5.6.

Опорное напряжение, вырабатываемое генератором пилообразного напряжения ГПН и синхронизированное с напряжением сети с помощью синхронизированного с сетью генератора импульсов (ГИ), подается на схему сравнения СС, на которую одновременно поступает и входное управляющее напряжение  $u_y$  (сигнал управления). Сигнал со схемы сравнения поступает на распределитель импульсов (РИ) и далее на оконечные усилители мощности (У), откуда в виде мощного, обладающего крутым фронтом и регулируемого по фазе импульса, подается на управляющий электрод тиристора.

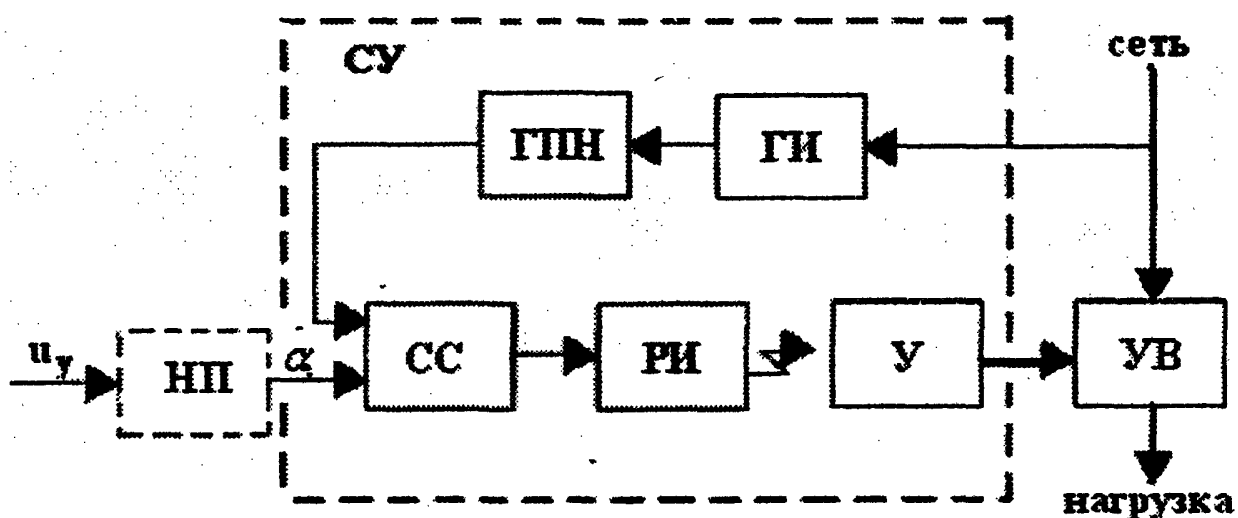


Рис.5.6. Функциональная схема управления УВ

Обычно между распределителем импульсов и оконечными усилителями используются схемы гальванической развязки, что на рис. 5.6 условно показано ломаной стрелкой.

Одной из важнейших особенностей управляемого выпрямителя является его способность регулировать среднее значение выпрямленного напряжения при изменении угла  $\alpha$ . Если индуктивность в цепи нагрузки достаточно велика\* для поддержания тока при отрицательном напряжении, то зависимость среднего выходного напряжения от угла управления находится из выражения:

$$U_H = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} U_{2m} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{2U_{2m}}{\pi} \cos \alpha \quad (5.1)$$

где  $U_{2m}$  – амплитуда напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Зависимость среднего выходного напряжения от угла управления показана на рисунке 5.7.

При  $\alpha = 0$  кривая выходного напряжения  $u_H$  соответствует случаю неуправляемого выпрямителя и среднее напряжение на нагрузке  $U_{H0} = \frac{2}{\pi} U_{2m}$  максимально.

При угле управления  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ,  $U_H = 0$ . Иными словами, управляемый выпрямитель при изменении угла  $\alpha$  от 0 до 90° осуществляет регулирование напряжения  $u_H$  в пределах от максимального значения, равного  $\frac{2}{\pi} U_{2m}$  до нуля. Зависимость среднего напряжения  $U_H$  от угла  $\alpha$  является нелинейной. Для линеаризации регулировочной характеристики УВ на его входе обычно включается нелинейный преобразователь (НП), реализующий функцию

$$\alpha = \arccos(u_y), \quad (5.2)$$

тогда

$$U_H = \frac{2U_{2m}}{\pi} \cos \alpha = \frac{2U_{2m}}{\pi} \cdot u_y \quad (5.3)$$

#### *Коммутация тока и внешние характеристики однофазных управляемых выпрямителей.*

В выпрямителях средней и большой мощности возрастает влияние ЭДС самоиндукции, создаваемых в первичной и вторичной обмотках трансформатора их магнитными потоками рассеяния. Наличие индуктивностей рассеяния сказывается на процессе перехода тока нагрузки с одного тиристора на другой (процесс коммутации). В маломощных выпрямителях, ввиду относительной малости ин-

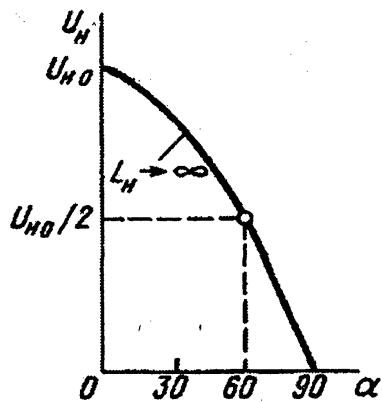


Рис. 5.7. Регулировочная характеристика УВ

дуктивностей рассеяния обмоток трансформатора, указанный переход тока протекает за короткий интервал времени и его можно не учитывать. Коммутацию тока в этих выпрямителях считают мгновенной. В выпрямителях же средней и большой мощности интервал коммутации, характеризуемый углом  $\gamma$ , может занимать довольно значительную часть длительности рабочих процессов. Коммутационные процессы здесь оказывают существенное влияние на работу, показатели и характеристики управляемого выпрямителя. Влияние индуктивностей

рассеяния обмоток трансформатора  $L_{s1}, L_{s2}$ , а при более точных расчетах и индуктивности питающей сети  $L_c$  учитывается суммарной индуктивностью

$$L_a = L_{s2} + (L_{s1} + L_c) \left( \frac{W_1}{W_2} \right)^2 \quad (\text{или суммарным индуктивным сопротивлением}),$$

приведенной к вторичной обмотке трансформатора (рис.5.8,а).

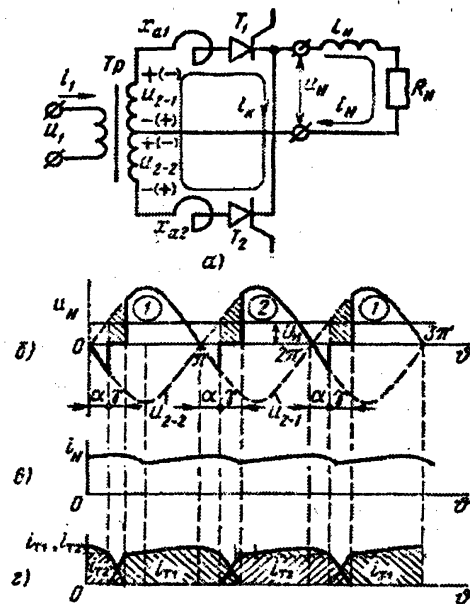


Рис. 5.8. Расчетная схема и электромагнитные процессы в однофазном УВ при коммутации

Временные диаграммы, поясняющие влияние коммутационных процессов в схеме выпрямителя, приведены на рис. 5.8 б-г.

Влияние индуктивности в цепи переменного тока проявляется в том, что при подаче отпирающего импульса на очередной тиристор индуктивные сопротивления затягивают процесс уменьшения до нуля тока проводящего тиристора и нарастания до значения  $I_H$  тока тиристора, вступающего в работу (рис. 5.8 г). В результате на интервале коммутации  $\gamma$  в проводящем состоянии одновременно находятся оба тиристора выпрямителя. Эти тиристоры создают короткозамкнутый контур для вторичной обмотки трансформатора. Напряжение на нагрузке  $U_H$  при учете угла коммутации определяется выражением:

$$U_H = \frac{2U_{2m}}{\pi} \cos \alpha - \frac{I_H x_a}{\pi} \quad (5.4)$$

Уравнение (5.4) описывает внешние характеристики управляемого выпрямителя. Для различных значений угла управления они представляются семейством параллельных прямых (рис. 5.9).

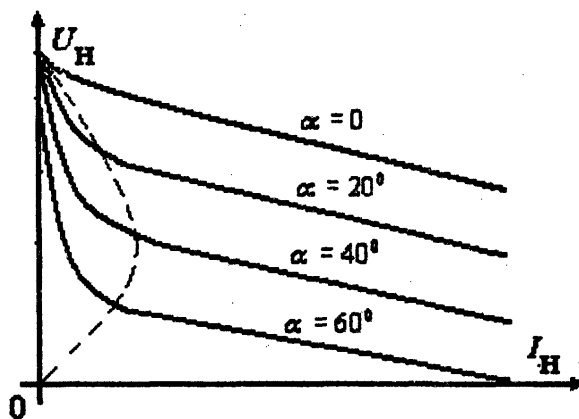


Рис. 5.9. Внешние характеристики управляемого выпрямителя

Наклон характеристик зависит от величины приведенного ко вторичной обмотке трансформатора суммарного реактивного сопротивления  $x_a$ . Коммутационные явления в схеме управляемого выпрямителя приводят к возрастанию фазового сдвига потребляемого тока относительно напряжения питания. Фазовый сдвиг первой гармоники потребляемого тока растет пропорционально углу ком-

мутации и составляет  $\varphi \approx \alpha + \frac{\gamma}{2}$ .

Электромагнитные процессы в однофазном мостовом управляемом выпрямителе (рис. 5.10) протекают аналогично рассмотренным выше для схемы с нулевой точкой.

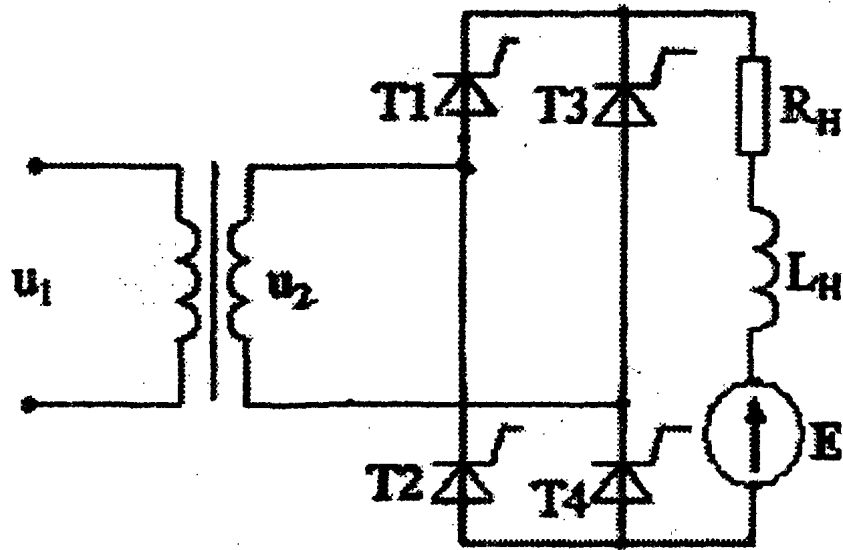


Рис. 5.10. Однофазный мостовой УВ

Первая гармоника потребляемого из сети тока  $i_1(1)$  в мостовой схеме также сдвинута в сторону отставания относительно напряжения питания на

$$\text{угол } \varphi \approx \alpha + \frac{\gamma}{2}.$$

Уравнение внешней характеристики для схемы (рис. 5.10) имеет вид:

$$U_H = \frac{2U_{2m}}{\pi} \cos \alpha - \frac{2I_H x_a}{\pi} \quad (5.5)$$

Сравнение уравнений (5.4) и (5.5) показывает, что в мостовой схеме следует ожидать больший наклон внешней характеристики. Однако в мостовой схеме примерно в два раза уменьшается индуктивность рассеяния трансформатора. Часто эти схемы используются вообще без трансформатора. Все это приводит к тому, что в результате при приблизительно одинаковых мощностях внешние характеристики обеих схем практически совпадают. Преимуществом мостовой схемы является то, что при одинаковых выходных напряжениях максимальное напряжение на тиристоре в них в два раза меньше.

*Прерывистые токи в управляемом выпрямителе.*

При значительной противо ЭДС - в нагрузке, когда ток нагрузки достаточно мал, в управляемом выпрямителе наступает режим прерывистых токов. В этом режиме очередной тиристор в схеме (рис. 5.4) (или очередная пара тиристор в мостовой схеме, рис. 5.10) вследствие спада тока до нуля закрывается раньше, чем открывается очередной тиристор. Электромагнитные процессы для такого режима работы показаны на рис. 5.11.

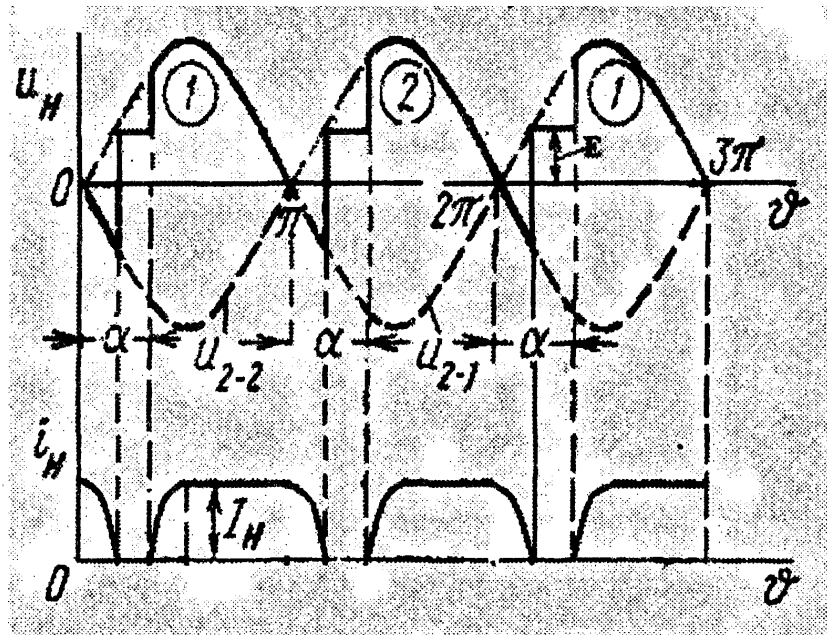


Рис. 5.11. Электромагнитные процесс УВ в режиме прерывистых токов

В паузе протекания тока через тиристоры напряжение на нагрузки определяется противо ЭДС. В режиме прерывистых токов отсутствуют явления коммутации, а выходное напряжение управляемого выпрямителя можно определить по приближенной формуле

$$U_H \cong E\alpha + \frac{U_{2m}}{\pi}(1 + \cos \alpha) \quad (5.6)$$

Внешние характеристики в режиме прерывистого тока являются нелинейными, они показаны на рис. 5.9 в области, ограниченной пунктирной линией. Следует подчеркнуть, что область прерывистых токов обычно очень узкая, что часто достигается включением дополнительной индуктивности на выходе управляемого выпрямителя. Поэтому наличие этой области и связанной с ней нелинейности не оказывает заметного влияния на свойства системы регулирования с управляемым выпрямителем.

#### 5.4.3. Управляемый выпрямитель в режиме инвертора, ведомого сетью

В инверторах происходит преобразование энергии постоянного тока в энергию переменного тока. В управляемом выпрямителе такое преобразование происходит в том случае, когда ЭДС в нагрузке имеет то же направление, что и ток (на рис.5.4 знак ЭДС противоположный). Такой режим работы характерен для реверсивных схем. Рассмотрим работу инвертора на примере одноплечевой схемы (рис. 5.4). При этом для упрощения не будем учитывать явление коммутации.

Электромагнитные процессы в режиме работы управляемого выпрямителя инвертором показаны на рис. 5.12. Здесь, в отличие от рис. 5.5, на интервале  $0 - \alpha$  открыт тиристор Т2. Его ток, равный току нагрузки, протекает под действием ЭДС  $E$  навстречу напряжению  $U_{2-2}$  на вторичной обмотке трансформатора.

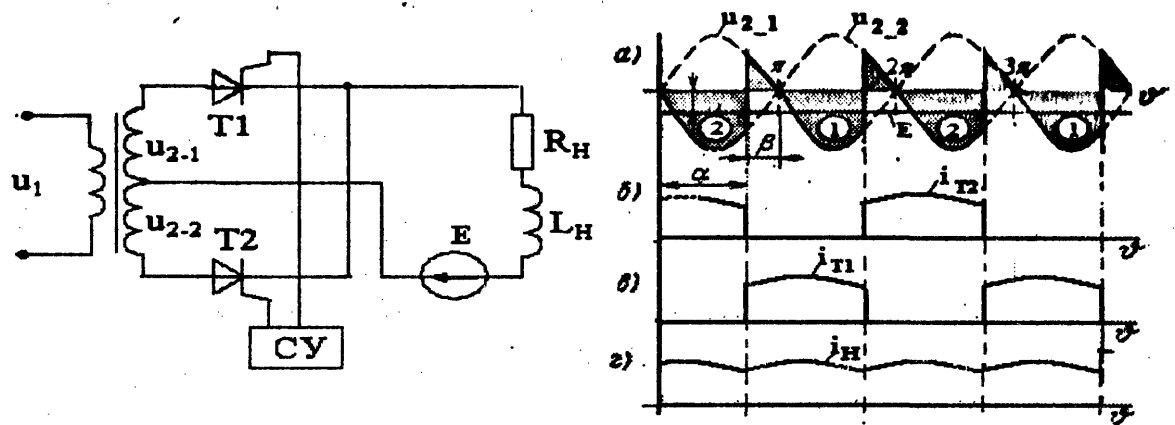


Рис. 5.12. Однофазной УВ в режиме инвертирования

По окончании интервала  $\alpha$ , т. е. с опережением на угол  $\beta$  относительно точки  $\pi$ , подачей управляющего импульса отпирается тиристор Т1. Ток нагрузки переходит на тиристор Т1, а Т2 запирается под действием отрицательного напряжения  $u_{2\_1} + u_{2\_2}$ . В течение угла  $\beta$  к тиристору Т2 прикладывается отрицательное напряжение, необходимое для восстановления его запирающих свойств. Поэтому обязательным условием нормальной работы инвертора является наличие угла опережения  $\beta$ . Этот угол не может быть меньше, чем  $\beta_{\min} = 2\pi f \tau_{\text{восст}}$ , где  $f$  — частота сети,  $\tau_{\text{восст}}$  — паспортное значение времени восстановления тиристора.

В последующем процессы, протекающие в схеме, повторяются.

На нагрузке формируется напряжение (затемненная область на рис. 5.12), модуль среднего значения которого определяется из уравнения

$$U_H = \frac{2U_{2m}}{\pi} \cos \beta. \quad (5.7)$$

Из выражения (5.7) следует, что с учетом замены угла  $\alpha$  на угол  $\beta$  среднее напряжение на нагрузке инвертора описывается тем же выражением, что и для выпрямителя (уравнение 5.1).

При учете коммутации модуль среднего напряжения на нагрузке для одноплечевой схемы определяется из уравнения (5.4), а для мостовой — из уравнения (5.5).

Инверторный режим работы используется в реверсивных схемах. Рассмотрим схему, представленную на рис. 5.13.

Такой силовой преобразователь, состоящий из двух параллельно и встречно включенных управляемых выпрямителей (1 и 2 группа, рис. 5.13), позволяет обеспечить все режимы работы исполнительного двигателя постоянного тока. Работа тиристорных мостов 1 и 2 характеризуется попеременным использованием в них режимов выпрямления и инвертирования. Различают два режима управления тиристорными мостами — совместное и раздельное.

При *совместном управлении* отпирающие импульсы подаются на тиристоры как одной, так и другой групп, задавая одной группе режим выпрямления, а другой — режим инвертирования. Если тиристорная группа 1 работает в режиме выпрямления, а группа 2 — в режиме инвертирования, то угол управления  $\alpha_1$  тиристорами группы 1 связан с углом опережения  $\beta_2$  тиристорами группы 2 условием равенства средних значений напряжения  $U_H$  выпрямителя и инвертора. Это условие записывается в виде

$$\alpha_1 = \beta_2. \quad (5.8)$$

Аналогично, если тиристорная группа 1 работает в режиме инвертирования а группа 2 — в режиме выпрямления, то угол управления  $\alpha_2$  тиристорами группы 2 связан с углом опережения  $\beta_1$  тиристорами группы 1 равенством  $\alpha_2 = \beta_1$ .

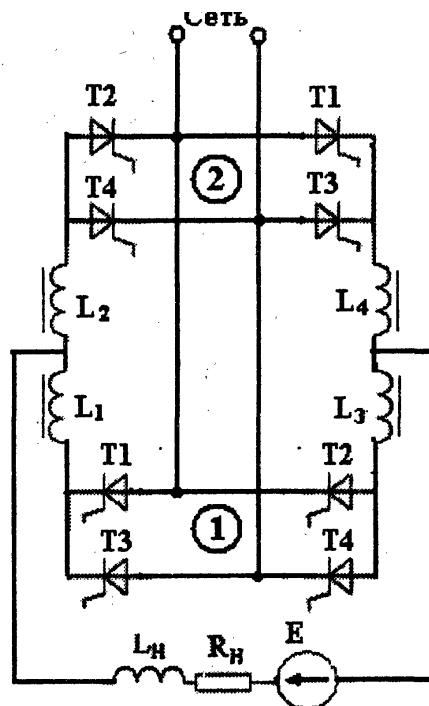


Рис.5.13. Однофазный реверсивный управляемый выпрямитель

Недостатком реверсивных управляемых выпрямителей с совместным управлением является необходимость принятия мер по уменьшению уравнивающих циркулирующих токов. Для этого в схему включают дополнительные индуктивности  $L_1, L_2, L_3, L_4$  (рис. 5.13).

Проблема уменьшения уравнивающих токов полностью исключается в случае раздельного управления тиристорными группами 1 и 2. При этом отпадает необходимость в дополнительных индуктивностях.

Принцип раздельного управления сводится к тому, что отпирающие импульсы подаются на тиристоры только той группы, которая в данный момент участвует в преобразовании энергии. В этом случае при переходе работы с одной группы тиристоров на другую необходима временная пауза, в течение которой ток нагрузки должен уменьшиться до нуля. Эта пауза приводит к ухудшению быстродействия системы. Ее всегда нужно учитывать при синтезе регуляторов для управления реверсивным управляемым выпрямителем.

#### 5.4.4. Трехфазные управляемые выпрямители

Трехфазные управляемые выпрямители строятся по схемам с однополупериодным выпрямлением и двухполупериодным выпрямлением (мостовые). Трехфазная мостовая схема получила преимущественное применение при построении управляемых выпрямителей трехфазного тока.

Нереверсивный трехфазный управляемый выпрямитель в системах мехатроники применяется в основном для питания инверторов, когда регулирование напряжения на выходе инвертора осуществляется за счет регулирования напряжения питания. В этом случае на выходе трехфазного управляемого выпрямителя применяется L, C фильтр с нагрузкой, подключенной параллельно конденсатору фильтра (рис. 5.14). При таком подключении мгновенное напряжение на выходе управляемого выпрямителя  $u_{yв}$  не совпадает с напряжением на нагрузке, последнее является практически постоянным и равным среднему значению напряжения на выходе выпрямителя.

Анализ схемы осуществим вначале при

Нереверсивный трехфазный управляемый выпрямитель в системах мехатроники применяется в основном для питания инверторов, когда регулирование напряжения на выходе инвертора осуществляется за счет регулирования напряжения питания. В этом случае на выходе трехфазного управляемого выпрямителя применяется L, C фильтр с нагрузкой, подключенной параллельно конденсатору фильтра (рис. 5.14). При таком подключении мгновенное напряжение на выходе управляемого выпрямителя  $u_{yв}$  не совпадает с напряжением на нагрузке, последнее является практически постоянным и равным среднему значению напряжения на выходе выпрямителя.

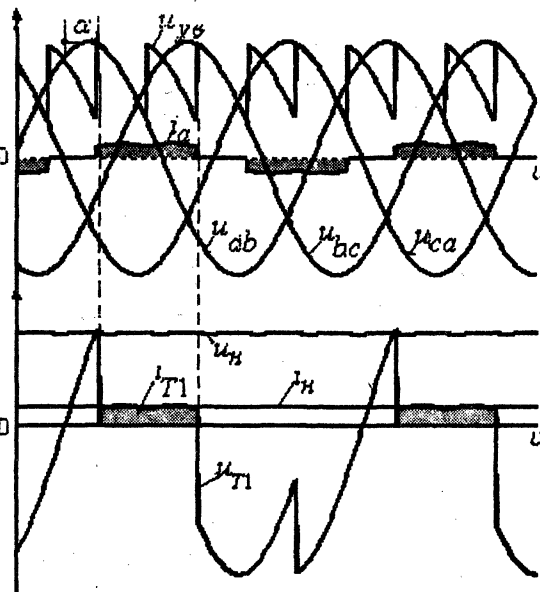
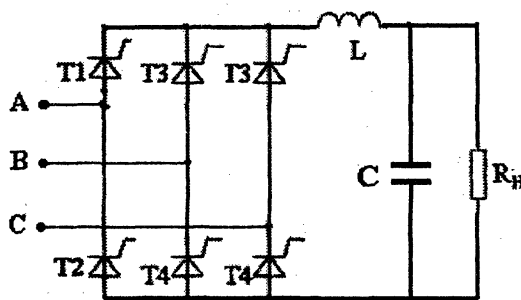


Рис. 5.14 Схема и электромагнитные процессы трехфазного мостового УВ

Анализ схемы осуществим вначале при  $x_{aa} = x_{ab} = x_{ac} = 0$ , а затем укажем их влияние. Электромагнитные процессы в схеме показаны на рис. 5.14.

Особенность работы управляемого выпрямителя заключается в задержке на угол  $\alpha$  момента отпирания очередных тиристоров относительно точек естественного отпирания.

Влияние изменения угла  $\alpha$  на кривую  $u_{yв}$  и среднее значение напряжения на нагрузке  $U_H$  показаны на (рис. 5.15 а, б). Поскольку в трехфазной мостовой схеме выпрямлению подвергается линейное напряжение, то напряжение  $u_{yв}$  на выходе состоит из участков линейных напряжений  $u_{ab}$ ,  $u_{bc}$ ,  $u_{ca}$ . При изменении угла  $\alpha$  в диапазоне от 0 до  $60^\circ$  (рис. 5.15 а) переход напряжения  $u_{yв}$  с одного линейного напряжения на другое осуществляется в пределах положительной полярности участков линейных напряжений.

При  $\alpha > 60^\circ$  (рис. 5.15 б) в кривой выходного напряжения появляются отрицательные участки. Среднему напряжению  $U_{yв} = 0$  будет отвечать значение угла  $\alpha = 90^\circ$ .

Зависимость среднего значения выпрямленного напряжения, а равно и напряжения на нагрузке, от угла  $\alpha$  определяется выражением:

$$U_{УВ} = U_H = \frac{3}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{6} + \alpha} \sqrt{3} U_m \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{3\sqrt{3} \cdot U_m}{\pi} \cos \alpha, \quad (5.9)$$

где  $U_m$  — амплитуда фазного напряжение питания. Сравнивая (5.1) и (5.9), видим, что регулировочные характеристики однофазного и трехфазного управляемых выпрямителей аналогичны.

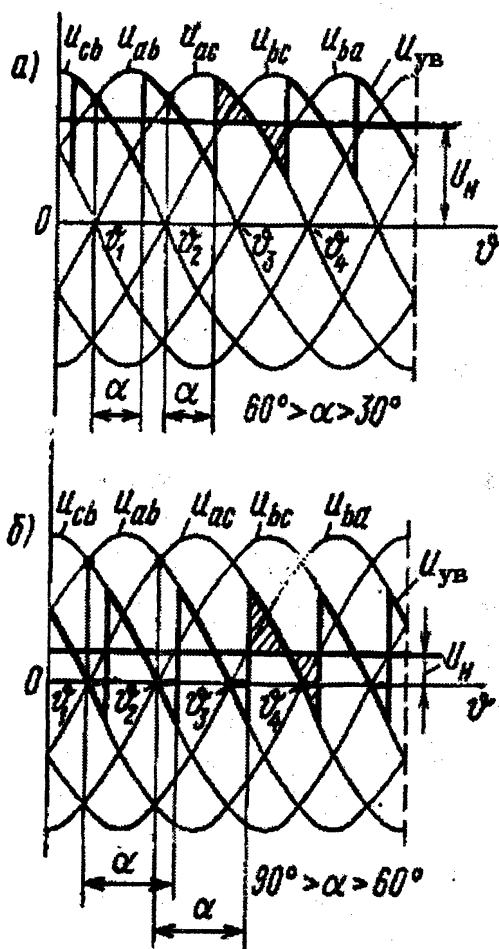


Рис. 5.15. Электромагнитные процессы в трехфазном УВ при различных углах управления

Кривые анодных токов тиристоров и тока потребления (рис.5.14), также как и в схеме однофазного управляемого выпрямителя, отличаются от синусоиды. Амплитуда обратного

напряжения на тиристоре равна  $1,045 \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi}$ .

Этой величиной определяется не только обратное напряжение, но и возможное значение амплитуды прямого напряжения на тиристоре при регулировании угла  $\alpha$ .

Коммутация токов, обусловленная наличием индуктивности в цепи питания, протекает так же, как и в схемах однофазных выпрямителей. Коммутационные падения напряжения сказываются на форме кривой напряжения на выходе управляемого выпрямителя и уменьшении его среднего значения  $U_H$  которое для трехфазной схемы определяется из уравнения

$$U_H = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi} - \frac{3I_H x_a}{\pi} \quad (5.10)$$

Соотношение (5.10) является уравнением внешних характеристик трехфазного управляемого выпрямителя.

Функциональная схема управления трехфазного управляемого выпрямителя ничем не отличается от схемы (рис. 5.6). Принципиальное отличие заключается в ином построении распределителя импульсов, поскольку здесь приходится управлять шестью тиристорами.

### 5.4.5. Высшие гармоники первичного тока управляемых выпрямителей

Кривые тока сети управляемых выпрямителей при больших индуктивностях в нагрузке значительно отличаются от синусоиды. Это свидетельствует о том, что рассматриваемые силовые преобразователи для сети переменного тока являются генераторами некоторого спектра высших гармоник, что отрицательно воздействует на сеть. Протекание высших гармоник по обмоткам генераторов, питающих сеть, вызывает в них дополнительные потери и нагрев. Дополнительные потери создаются в передающих линиях и промежуточных трансформаторах.

Падение напряжения от высших гармонических на внутренних импедансах питающей сети вызывает искажения формы питающего напряжения, что отрицательно сказывается на работе других потребителей. Искажение формы питающего напряжения особенно ощутимо, когда мощность сети соизмерима с мощностью силового преобразователя. На рис. 5.16 показаны формы токов в цепи питания управляемых выпрямителей

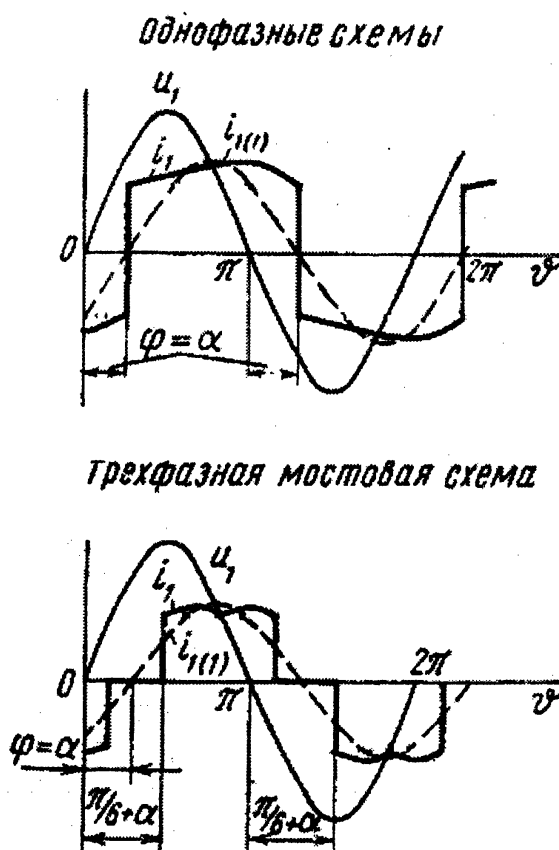


Рис. 5.16. Формы токов в цепи питания управляемых выпрямителей

#### 5.4.6. Энергетические и электромагнитные характеристики управляемых выпрямителей

Управляемый выпрямитель отрицательно влияет на питающую сеть переменного тока. Во-первых, он потребляет из сети несинусоидальный ток. Во-вторых, он сдвигает фазу потребляемого тока относительно питающего напряжения. Несинусоидальность тока может быть охарактеризована коэффициентом гармоник (THD – Total Harmonic Distorsion)

$$THD = \frac{\sqrt{I^2(2) + I^2(3) + \dots + I^2(n)}}{I_1(1)} = \frac{I_{\Sigma}}{I_1(1)}, \quad (5.11)$$

где  $I(1) \dots I(n)$  – эффективные значения тока первой и т. д. гармоник,  $I_{\Sigma}$  – эффективный ток всех высших гармоник.

Фазовый сдвиг зависит от угла управления управляемым выпрямителем. Поэтому коэффициент мощности УВ определяется следующим образом.

Первую гармонику тока можно разложить на активную  $I_{1a}(1)$  и реактивную  $I_{1p}(1)$  составляющие. Если принять, что напряжение сети синусоидально, тогда отдельные составляющие мощности для трехфазных схем определяются следующими выражениями:

- полная мощность, потребляемая из сети  $S_1 = 3U_1 I_1$  ;
- полная мощность по первой гармонике  $S_1(1) = 3U_1 I_1(1)$  ;
- активная мощность по первой гармонике  $P_1(1) = 3U_1 I_{1a}(1)$  ;
- реактивная мощность по первой гармонике  $Q_1(1) = 3U_1 I_{1p}(1)$  ;
- мощность искажений  $D = 3U_1 I_{\Sigma}$  .

Зависимости полной и активной мощности в источнике питания, а также мощности в нагрузке от среднего тока нагрузки ( $S_1(I_H), P_1(I_H), Q_1(I_H), P_H = f(I_H)$ ) называют *энергетическими характеристиками выпрямителя*.

Зависимости среднего и эффективного тока тиристора, а также тока в источнике от среднего тока нагрузки ( $I_{T,ср}, I_T, I_1 = f(I_H)$ ) называют *электромагнитными характеристиками выпрямителя*.

Все перечисленные характеристики являются функцией среднего тока нагрузки управляемого выпрямителя, который в общем случае определяется выражением

$$I_H = \frac{U_H - E}{R_H} \quad (5.12)$$

#### 5.4.7. Моделирование управляемого выпрямителя (УВ)

В данном разделе рассматривается модельное исследование нереверсивного трехфазного управляемого выпрямителя, выполняющего функцию регулируемого источника питания. Вопросы, связанные с проектированием реверсивного управляемого выпрямителя для систем постоянного тока, рассматриваются в гл. 7.

Модель виртуальной установки для исследования представлена на рис. 5.17 (*файл UWyp\_3f*).

Модель содержит трехфазный источник питания ( $V_a, V_b, V_c$ ), трехфазный УВ (Thyristor Converter), блок управления УВ (6-Pulse Generator), L, C фильтр и нагрузку, блоки задания угла управления УВ ( $\alpha$ ) и измерения линейных напряжений ( $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ ).

Блоки, предназначенные для измерений и представления результатов измерений и расчета, показаны темным фоном.

Измерение тока и напряжения в нагрузке УВ, тока в источнике питания и тока в тиристоре осуществляется блоком Multimeter.

В подсистему (Subsystem, рис. 5.18) «спрятаны» блоки:

- блок для измерения постоянной составляющей тока нагрузки (Fourier I0) и аналогичный блок для измерения постоянной составляющей напряжения на нагрузке (Fourier U0);

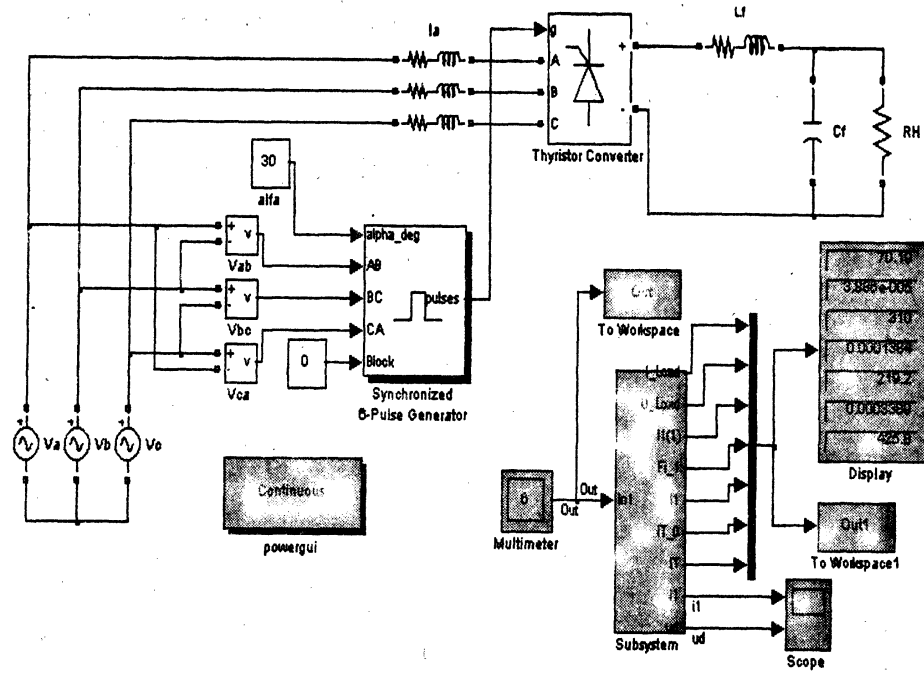


Рис 5.17 Модель трехфазного УВ для снятия нагрузочной характеристики УВ

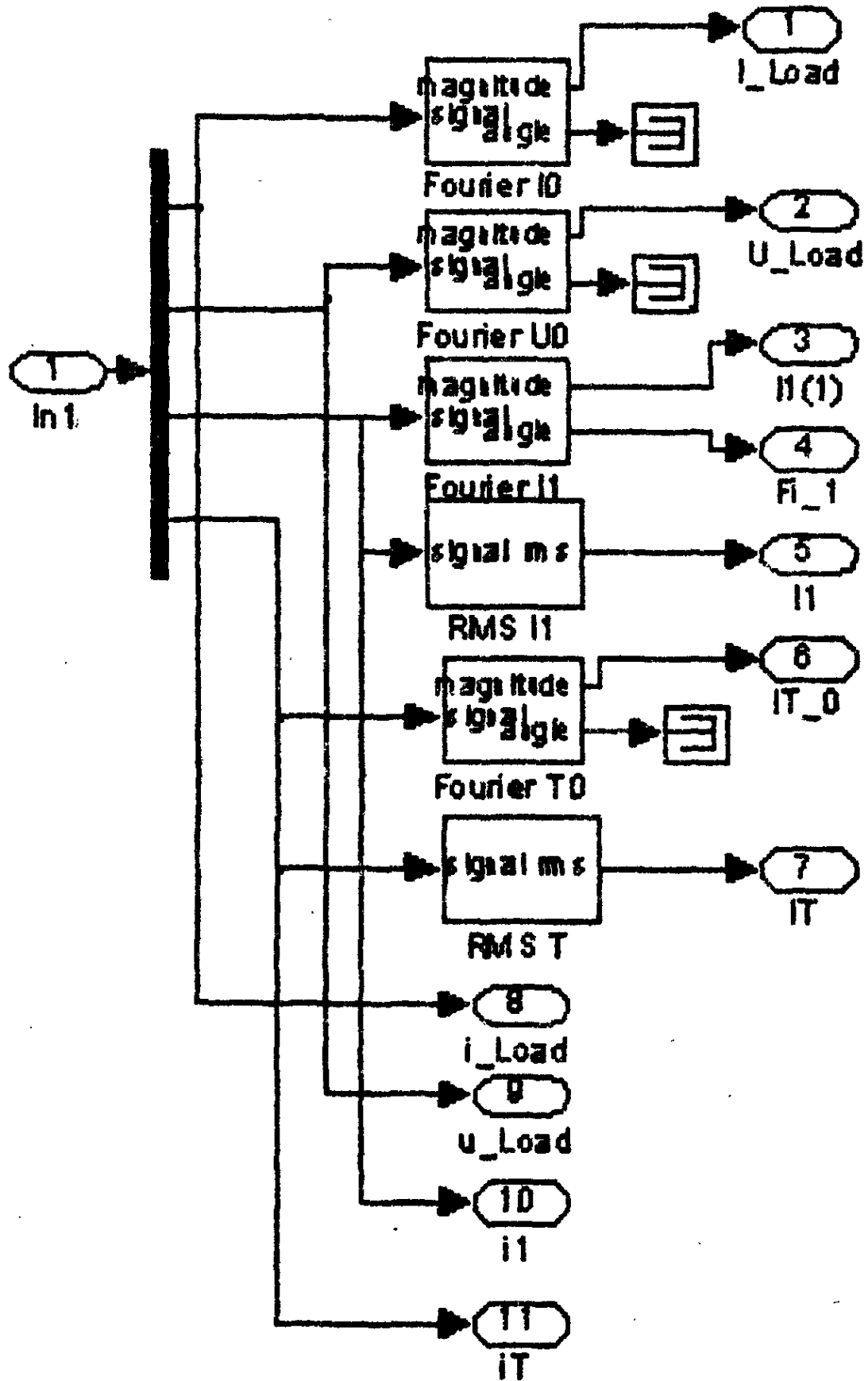


Рис. 5.18. Блок измерения

- блок для измерения амплитуды и фазы первой гармоники тока питания (Fourier I1);
- блок для измерения действующего значения тока питания (RMS I1);
- блоков для измерения действующего (RMS T) и среднего (Fourier T0) токов тиристора.

Окно настройки параметров трехфазного управляемого выпрямителя (Thyristor Converter) показано на рис. 5.19.

Для наблюдения (измерения) мгновенных значений токов и напряжения служит блок осциллографа (Scope).

Блок Powergui предназначен для спектрального анализа токов и напряжений в схеме.

Цифровой отсчет измеренных значения осуществляется дисплеем ( Display).

По результатам моделирования строятся основные характеристики УВ:

- внешняя (нагрузочная) характеристика управляемого выпрямителя  $U_H = f(I_H)$ , (рис. 5.20);
- электромагнитные характеристики управляемого выпрямителя  $I_1(1), I_{T0}$ ,  $I_T = f(I_H)$ , (рис. 5.21);
- энергетические характеристики управляемого выпрямителя  $S_1(1), P_1(1)$ ,  $P_T = f(I_H)$ , (рис. 5.22).

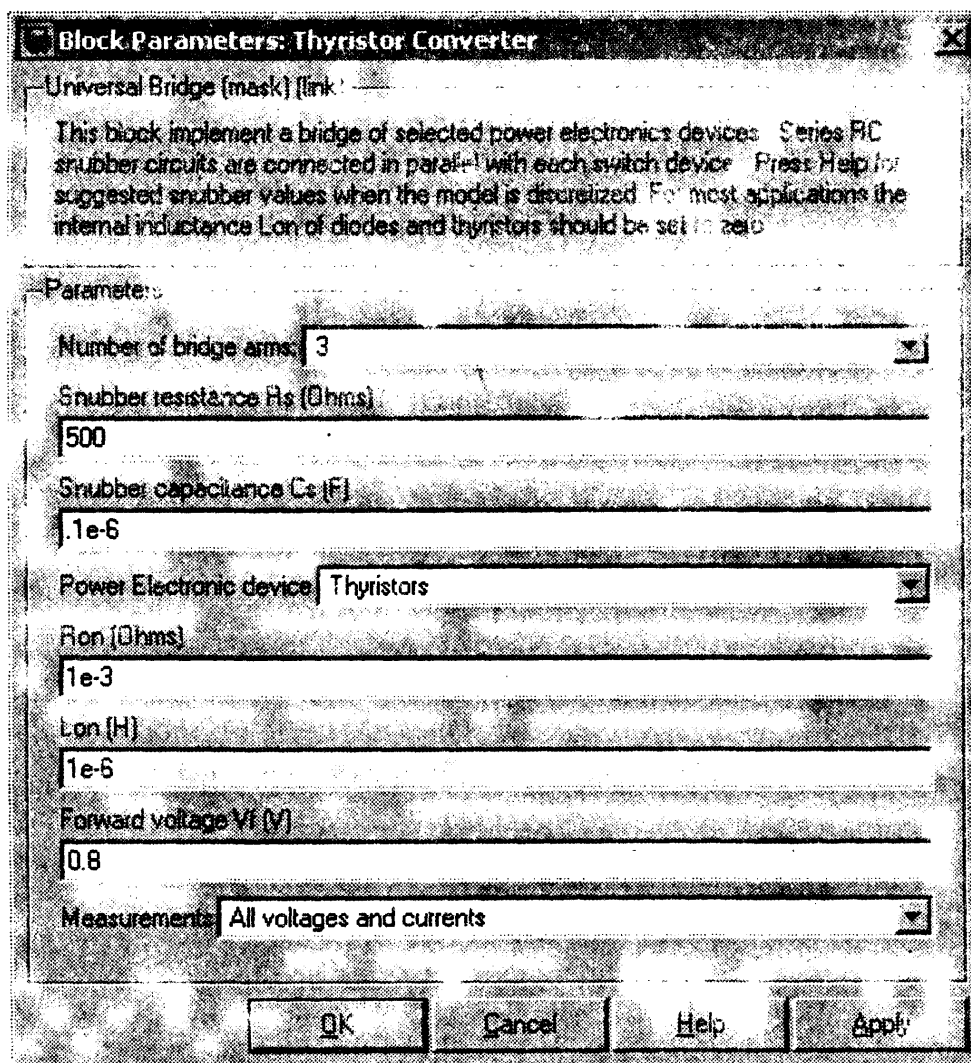


Рис. 5.19. Окно настройки параметров трехфазного управляемого выпрямителя

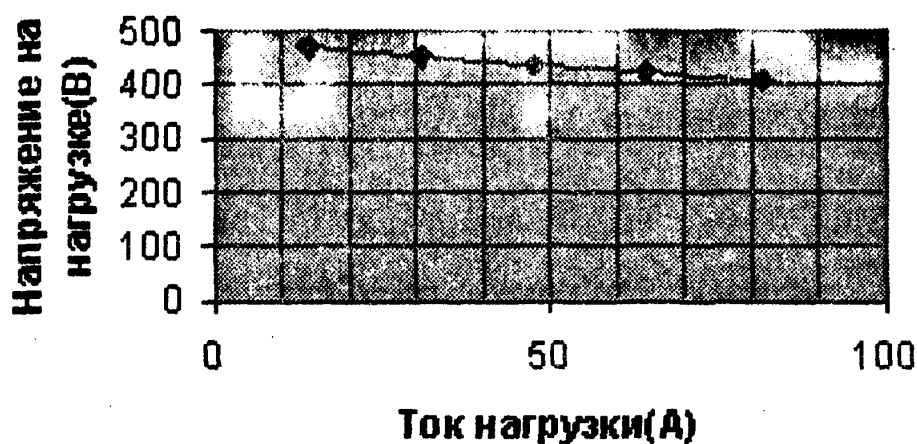


Рис. 5.20. Внешняя характеристика УВ

Важным аспектом при исследовании устройств силовой электроники является спектральный анализ электромагнитных процессов. Это обусловлено тем, что всякое преобразование электрической энергии связано с искажением формы токов и напряжений. Основные свойства силового преобразователя существенно зависят от этих искажений. Количественно эти искажения можно оценить при разложении несинусоидальных токов и напряжений в ряд Фурье, т. е. при реализации спектрального анализа. Для этого необходимо вывести в рабочую область MATLAB нужные сигналы с помощью блока Score или To Workspace и использовать блок Powergui.

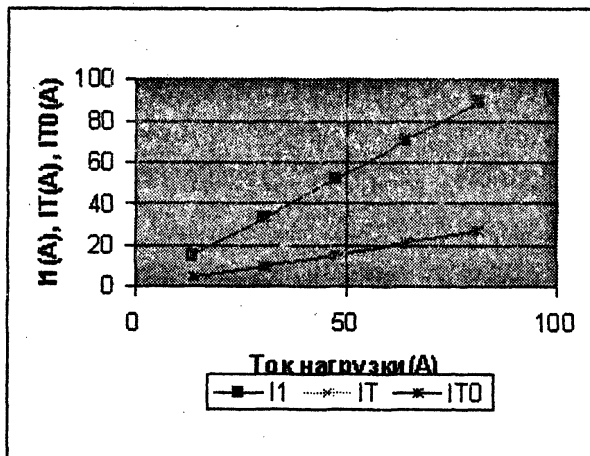


Рис. 5.21. Электромагнитные характеристики УВ

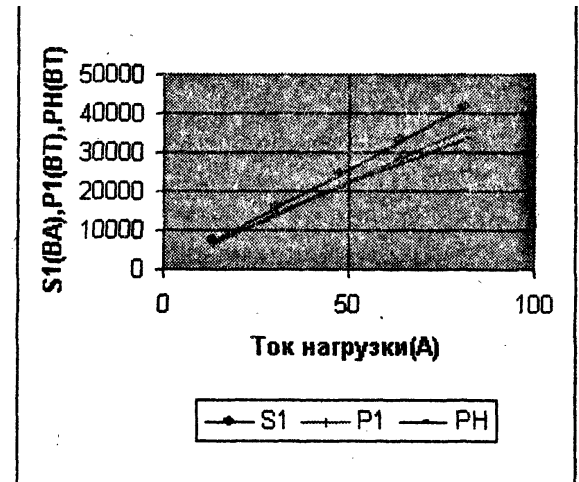


Рис. 5.22. Энергетические характеристики УВ

В модели на рис. 5.17 в рабочую область выводится ток питания с помощью блока Score.

Для проведения исследования спектрального состава тока питания необходимо на панели инструментов блока Score выбрать иконку Parameters (параметры) и в отрывшемся окне параметров (рис. 5.23) на вкладке Data history установить флажок в Save data to workspace, а в открывающемся списке Format — установить Structure with time. В окне Variable name ввести название переменной, под которой исследуемые процессы запишутся в рабочем пространстве.

Исследование спектрального состава реализуется с помощью блока Powergui. Окно блока показано на рис. 5.24.

При нажатии на вкладку FFT Analysis открывается окно для проведения спектрального анализа (рис. 5.25). В правой части окна находятся поля, с помощью которых можно просмотреть исследуемый сигнал и осуществить его спектральный анализ.

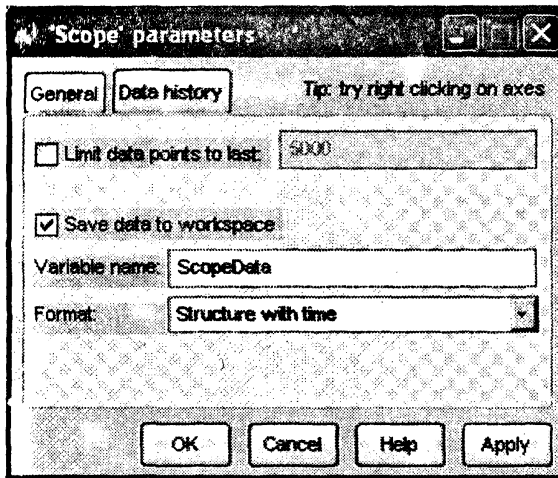


Рис. 5.23. Окно параметров блока Scope

В верхнем поле выбирается переменная, имя которой с помощью блока Scope занесено в рабочее пространство. В поле Input из открывающегося списка выбирается конкретный анализируемый сигнал (на рис. 5.25 — это ток в цепи питания выпрямителя). Следующие три поля позволяют задать участок анализированного сигнала, который должен соответствовать квази-установившемуся режиму работы схемы, и просмотреть этот участок в верхнем левом поле окна.

В поле Fundamental frequency (Hz) задается основная частота исследуемого сигнала. В данном случае она равна частоте источника питания.

В поле Max frequency (Hz) задается максимальная частота спектра. Выбор этой частоты определяется задачами анализа. Поле Frequency axis позволяет по оси абсцисс откладывать частоту или номер гармоники. В раскрывающемся списке поля Display style можно выбрать способ представления спектра в левом нижнем поле окна. Этот спектр может быть представлен графически или в табличном, цифровом виде.

В поле Base value задается масштаб по оси ординат. В верхней части поля со спектральным разложением высвечивается амплитуда основной гармоники и коэффициент гармоник (THD — Total Harmonic Distorsion) исследуемого сигнала.

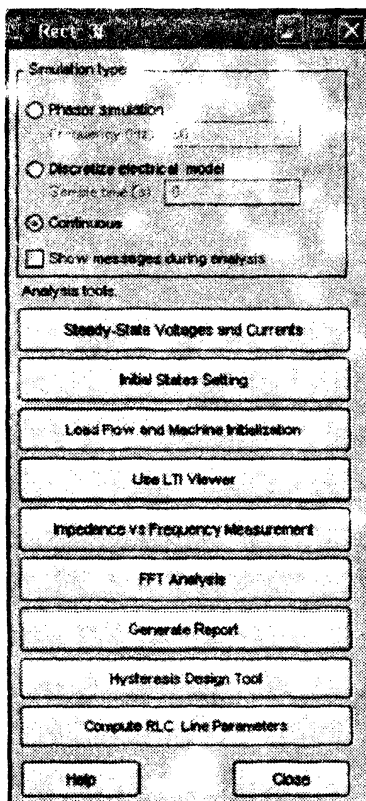


Рис. 5.24. Окно блока Powergui

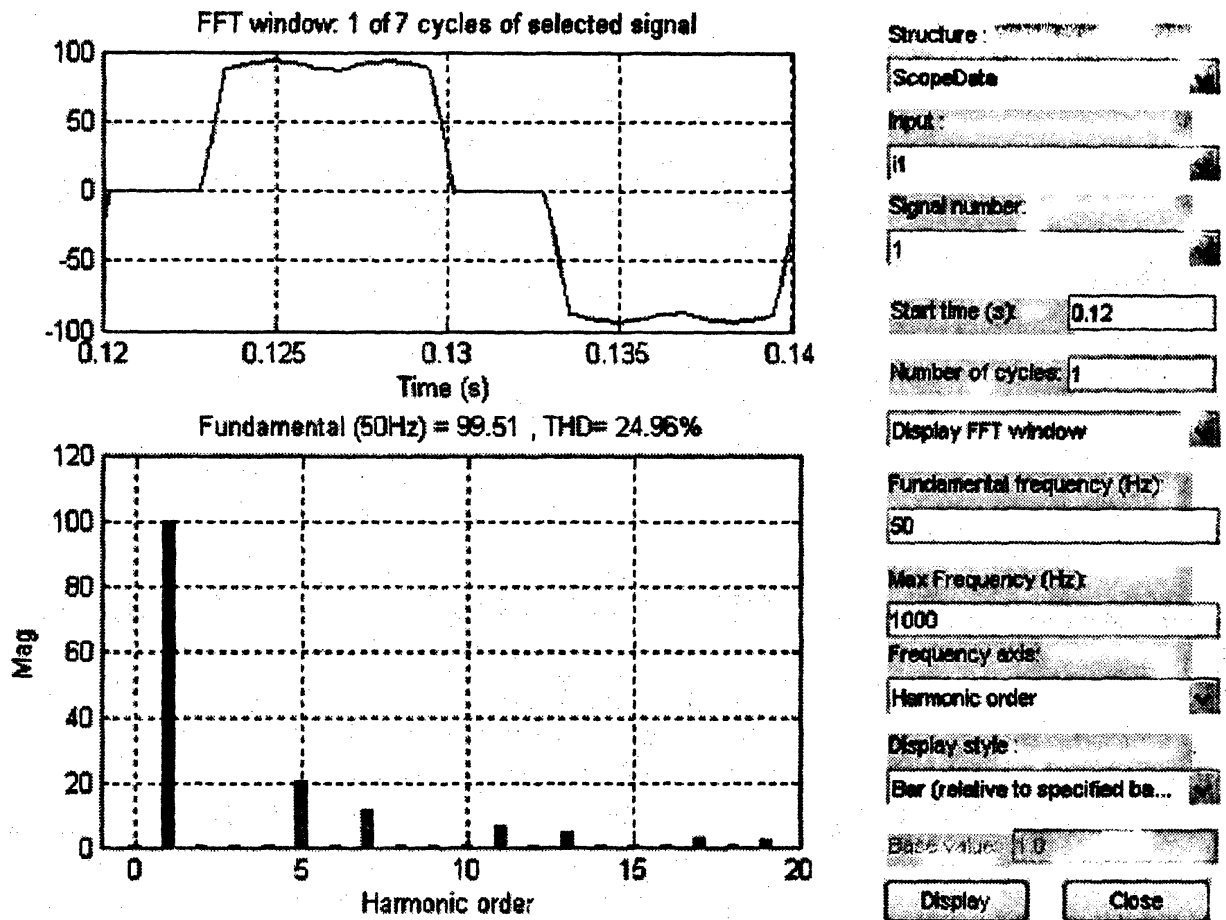


Рис. 5.25. Окно блока Powergui для проведения спектрального анализа УВ

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.2.6. МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ)

### ВОПРОСЫ

#### 1. Преобразователи постоянного напряжения:

- Одноплечевой ШИП с симметричным законом управления;
- Одноплечевой ШИП с релейным регулированием тока;
- Мостовой ШИП;

2. Аналитическое представление электромагнитных и энергетических характеристик ШИП.
3. Моделирование мостового ШИП с поочередным законом управления в установившихся режимах.
4. Динамические модели ШИП в системах мехатроники.

## ЛИТЕРАТУРА

3. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. Преобразователи постоянного напряжения

#### Одноплечевой ШИП с симметричным законом управления

К преобразователям постоянного напряжения относятся широтно-импульсные преобразователи и импульсные источники электропитания постоянного тока.

Широтно-импульсные преобразователи (ШИП) используются, как правило, в системах постоянного тока. По построению ШИП можно разделить на одноплечевые и мостовые (двухплечевые). Питание первых осуществляется от источника со средней точкой.

Для управления ШИП используются в основном три способа (алгоритма) переключения полупроводниковых ключей:

- симметричный,
- несимметричный,
- поочередной.

Два последних способа используются в мостовых ШИП.

*Во всех полупроводниковых преобразователях с источником питания постоянного тока (ШИП, АИН) транзисторы одного плеча моста обычно переключаются в противофазе. При этом всегда предусматривается задержка между выключением одного и включением другого. Эта задержка составляет несколько микросекунд и предусматривается для исключения сквозных токов через плечо моста. Влияние этой задержки на электромагнитные процессы в преобразователе пренебрежимо малы. Поэтому в дальнейшем изложении эта задержка не учитывается.*

\ Схема одноплечевого транзисторного ШИП представлена на рис. 5.26, а.

При симметричном способе управления транзисторы плеча переключаются в противофазе (рис. 5.26, г).

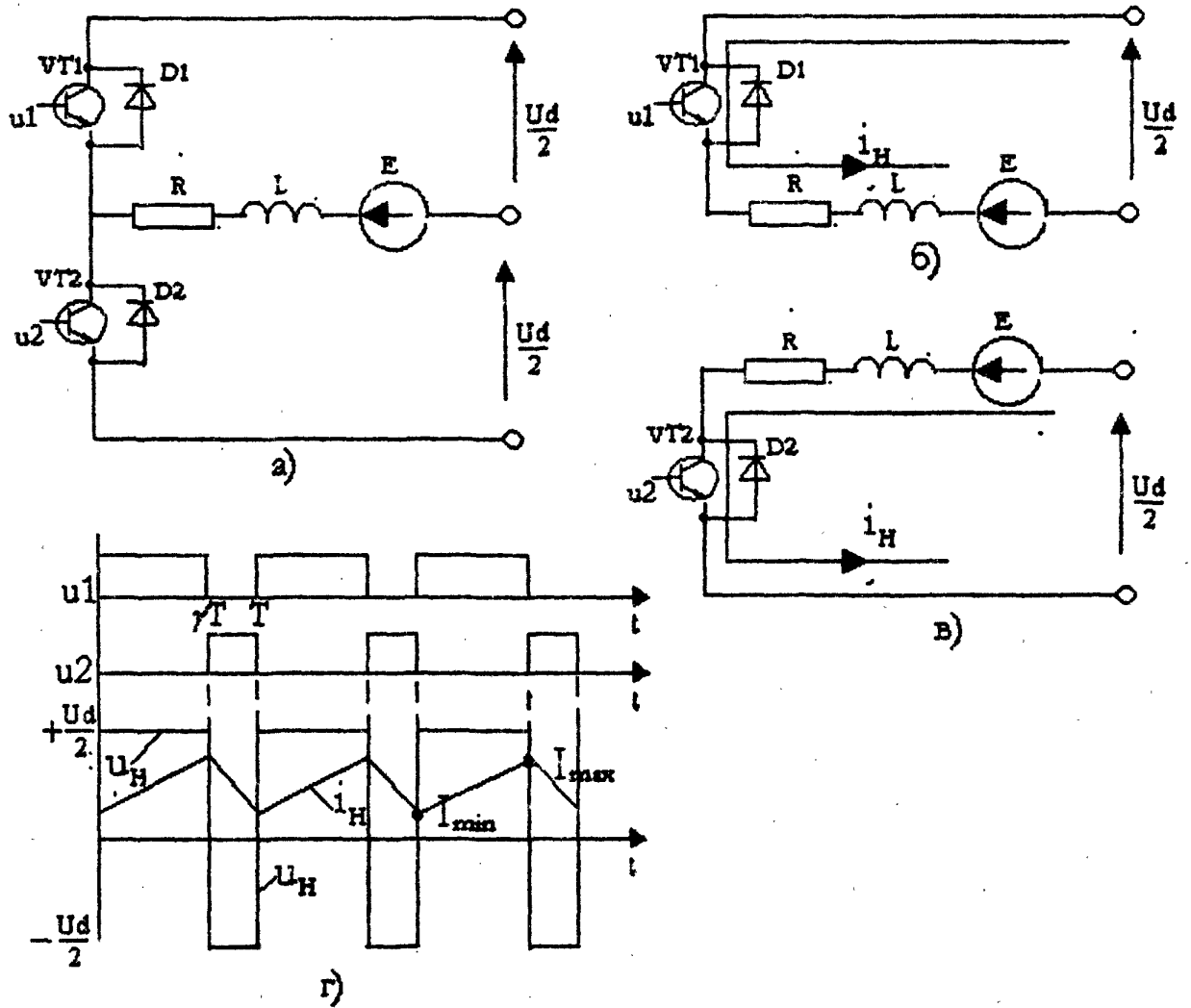


Рис. 5.26. Одноплечевой транзисторный ШИП

Рассмотрим последовательность образования коммутационных интервалов и электромагнитные процессы в ШИП при симметричном управлении для общего случая  $R, L$  нагрузки с противо ЭДС. При включении верхнего по схеме транзистора  $VT1$  и выключении нижнего  $VT2$  образуется цепь  $+U_n, VT1, R, L, E, -U_n$  (рис. 5.26 б) для протекания тока нагрузки. К нагрузке на этом интервале прикладывается на

пряжение питания  $\frac{U_d}{2}$ , а ток увеличивается от минимального  $I_{\min}$  значения до

максимального  $I_{\max}$  (рис. 5.26 г). Напряжения на транзисторе  $VT1$  на этом интервале равно нулю, а ток равен току нагрузки.

На транзисторе  $VT2$  напряжение равно  $U_d$ , это напряжение является отрицательным для диода  $D2$  и ток через него равен нулю. При включении нижнего по схеме транзистора  $VT2$  и выключении верхнего  $VT1$  ток, поддерживаемый индуктивностью нагрузки, продолжает протекать в том же направлении. При этом образуется цепь, показанная на (рис. 5.26 в), в которой ток нагрузки протекает навстречу ЭДС  $E$  и источнику питания. На этом интервале напряжение на нагрузке изменяет знак, а ток уменьшается (рис. 5.26 г).

К транзистору  $VT1$  прикладывается напряжение  $U_d$ ,  $D2$  открыт, напряжение на нем равно нулю, а ток равен току нагрузки (рис. 5.26, в).

Если к началу рассматриваемого интервала в индуктивности нагрузки накоплена достаточная энергия, то такое состояние цепи сохраняется до очередного переключения транзисторов плеча. Если эта энергия недостаточна, то ток может

упасть до нуля, а затем изменить направление под действием напряжения  $\frac{U_d}{2}$  и

эдс  $E$ . В этом случае он переходит с диода  $D2$  на транзистор  $VT2$ .

Поскольку диод и транзистор во включенном состоянии считаются идеально замкнутыми ключами, то на анализ электромагнитных процессов переход тока с диода на транзистор не сказывается. При этом реализуется два состояния силовой части ШИП: одно — когда  $VT1$  включен, а  $VT2$  выключен; второе — когда  $VT1$  выключен, а  $VT2$  включен. Длительности этих состояний соответственно равны  $\gamma T$  и  $(1-\gamma)T$ , где  $\gamma$  — относительная длительность первого состояния, изменяющаяся от 0 до 1 в зависимости от величины сигнала управления.

Поэтому можно считать, что в схеме на периоде образуются два коммутационных интервала, схемы замещения на которых показаны на (рис. 5.26, б, в). При симметричном законе формируется знакопеременное напряжение на нагрузке, а среднее значение этого напряжения определяется из выражения:

$$U_H = \frac{1}{T} \int_0^{\gamma T} \frac{U_d}{2} dt - \frac{1}{T} \int_{\gamma T}^T \frac{U_d}{2} dt = (2\gamma - 1) \frac{U_d}{2} \quad (5.13)$$

оно равно нулю при  $\gamma_0 = 0,5$ , при  $\gamma > 0,5$  среднее напряжение на нагрузке положительное, при  $\gamma < 0,5$  — отрицательное.

Функциональная схема управления (СУ), реализующая симметричное управление ШИП, показана на (рис. 5.27).

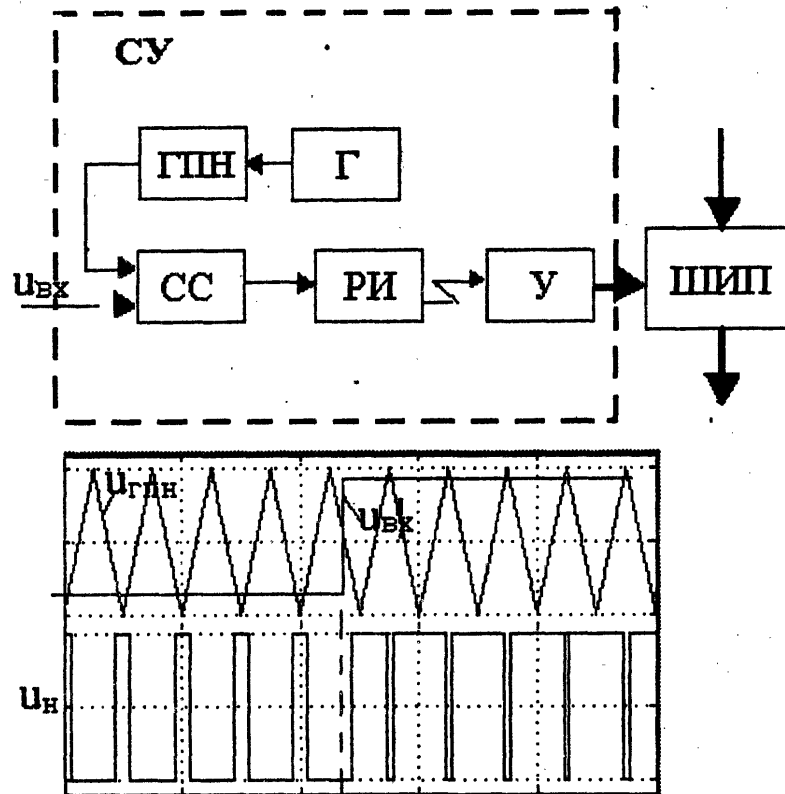


Рис. 5.27. Функциональная схема, реализующая симметричное управление ШИП

Генератор пилообразного напряжения (ГПН) вырабатывает (пилообразное напряжение) с периодом  $T$ . Схема сравнения (СС) представляет собой релейный элемент, который переключается с плюса на минус и обратно, в момент равенства напряжения с выхода ГПН и напряжения управления на входе (рис. 5.27). Для управления ШИП распределитель импульсов (РИ) имеет два выхода: один — прямой, второй — инверсный. Эти импульсы, усиленные усилителями, поступают на базы транзисторов  $VT_1$ ,  $VT_2$ , переключая их в противофазе.

### 5.5.2. Одноплечевой широтно-импульсный преобразователь с релейным регулированием тока

Схема одноплечевого ШИП с релейным регулированием тока показана на рис. 5.28. В ней использован релейный регулятор с гистерезисом, на вход которого подан сигнал управления (задание тока) и сигнал с датчика реального тока в нагрузке преобразователя. Ширина петли гистерезиса релейного регулятора определяет пульсацию тока нагрузки («токовый коридор»). Частота переключения в этой схеме определяется постоянной времени нагрузки и шириной петли гистерезиса релейного регулятора. Электромагнитные процессы в схеме показаны на рис. 5.28. Главная особенность этой схемы состоит в том, что ШИП здесь является источником тока. Кроме того, такая схема как динамическое звено является безынерционным.

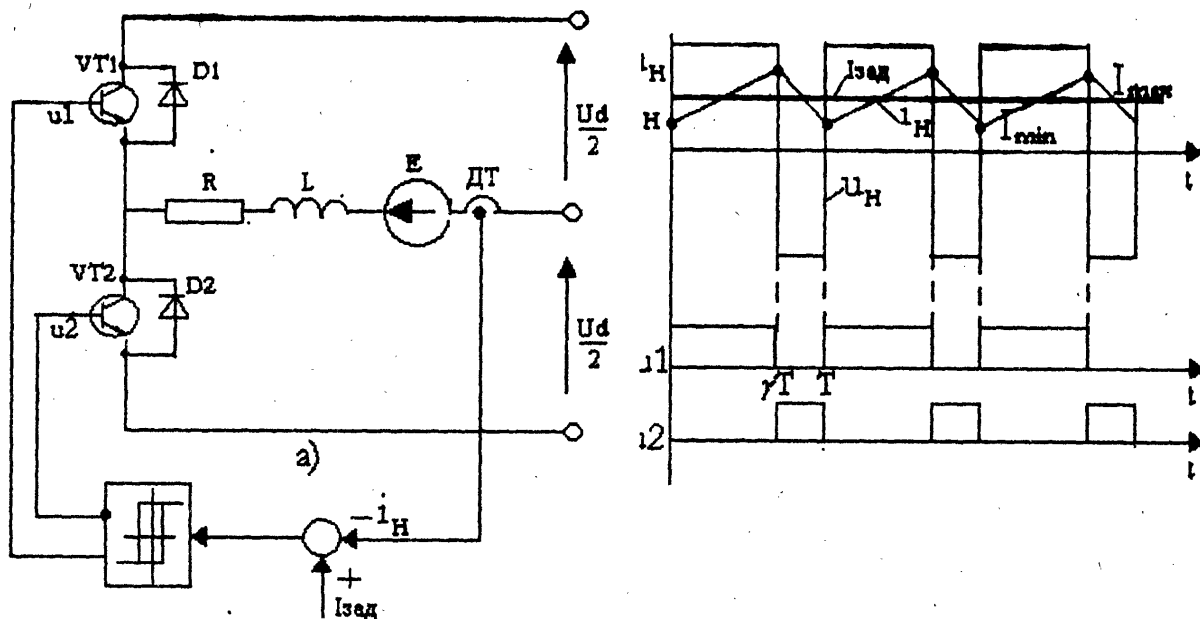


Рис. 5.28. Одноплечевой широтно-импульсный преобразователь с релейным регулированием тока

### 5.5.3. Мостовой широтно-импульсный преобразователь

Принципиальная схема мостового ШИП представлена на рис. 5.29, а. Она содержит четыре транзисторных ключа  $VT1 - VT4$  с обратными диодами  $D1 - D4$ . В диагональ моста, образованного транзисторными ключами, включена нагрузка.

Питание ШИП осуществляется от источника постоянного тока.

При симметричном способе управления в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа моста, а напряжение на выходе ШИП представляет собой знакопеременные импульсы, длительность которых регулируется входным сигналом.

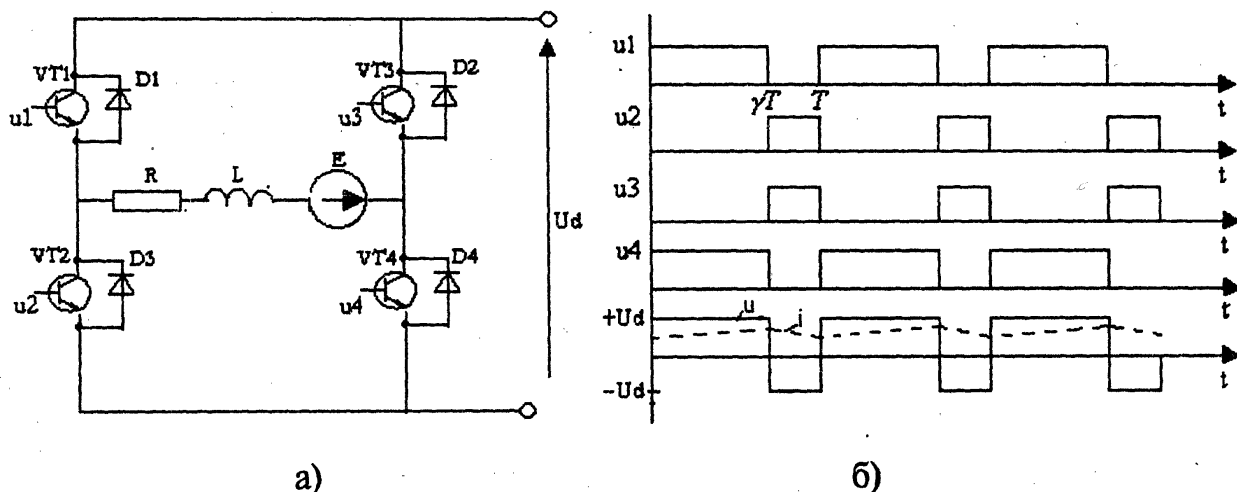


Рис. 5.29. Мостовой ШИП с симметричным управлением

Временные диаграммы ШИП при симметричном способе управления приведены на рис. 5.29, б. По сравнению с рассмотренной выше одноплечевой схемой здесь нет никаких особенностей. Единственное отличие состоит в том, что к закрытому силовому транзистору прикладывается напряжение питания. Поэтому эта схема в большинстве случаев является более предпочтительной.

Функциональная схема управления, реализующая симметричный способ управления мостовым ШИП, аналогична схеме (рис. 5.27) с той лишь разницей, что импульсы управления поступают не на один транзистор, а на пару диагонально расположенных транзисторов.

Симметричный способ управления обычно используется в маломощных приводах постоянного тока.

Его преимуществом является простота реализации и отсутствие зоны нечувствительности в регулировочной характеристике. Недостатком ШИП с симметричным управлением является двуполярное напряжение на нагрузке и в связи с этим повышенные пульсации тока в нагрузке.

Стремление исключить этот недостаток привело к разработке способов, обеспечивающих однополярное напряжение на выходе ШИП. Простейшим из них является несимметричный.

Электромагнитные процессы в ШИП при несимметричном управлении представлены на рис. 5.30, а. В этом случае переключаются транзисторные ключи фазной группы VT3 и VT4 (ключи VT1 и VT2 при противоположной полярности входного сигнала), транзисторный ключ VT1 постоянно открыт и насыщен, а ключ VT2 постоянно закрыт.

Транзисторные ключи VT3 и VT4 переключаются в противофазе.

При этом на выходе ШИП формируются однополярные импульсы и среднее напряжение на выходе равно нулю, когда относительная продолжительность включения одного из нижних по схеме транзисторов  $\gamma_0 = 0$ .

Недостатком рассмотренного способа управления является то, что верхние по схеме транзисторные ключи (VT1, VT3) по току загружены больше, чем нижние. Этот недостаток устранен при поочередном управлении, временные диаграммы которого изображены на рис. 5.30 б.

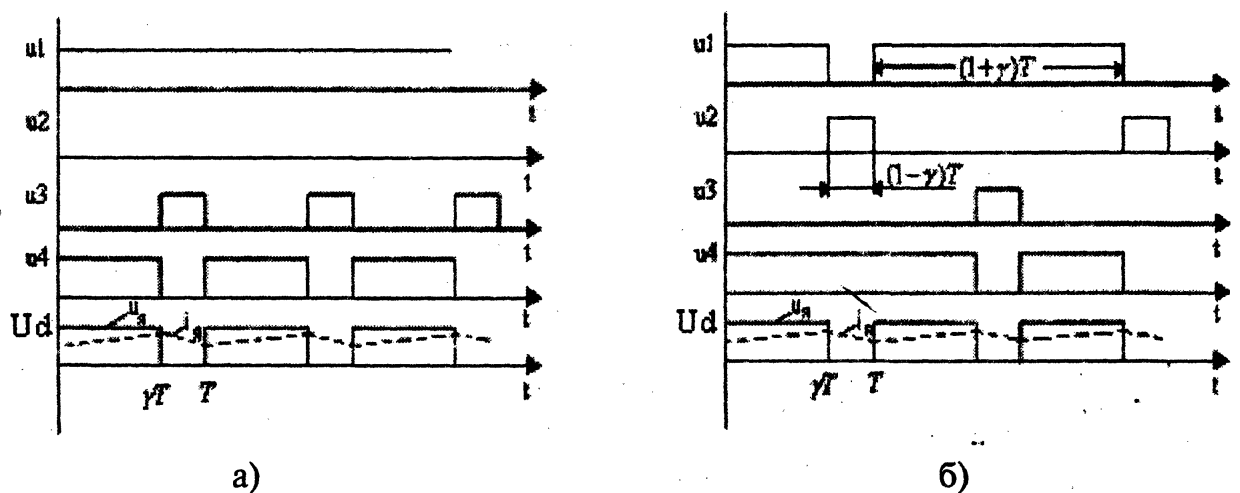


Рис. 5.30. Несимметричное а) и поочередное б) управление транзисторами мостового ШИП

Здесь при любом знаке входного сигнала в состоянии переключения находятся все четыре транзисторных ключа моста, при этом частота переключения каждого из них в два раза меньше частоты напряжения на выходе. Управляющие

напряжения транзисторных ключей одной фазы моста VT1, VT2 и VT3, VT4 постоянно находятся в противофазе; при этом ключи переключаются через период выходного напряжения T. Этим достигаются одинаковые условия работы полупроводниковых приборов в мостовой схеме.

При некотором знаке входного сигнала управляющие импульсы  $u1, u4$  длительностью  $t = (1 + \gamma)T$  подаются на диагонально расположенные транзисторные ключи (Рис. 5.30 б) со сдвигом на полпериода, а управляющие импульсы  $u2, u3$  длительностью  $t = (1 - \gamma)T$ , также со сдвигом на полпериода, подаются на транзисторы противоположной диагонали (VT2, VT3). В этом случае на интервале  $\gamma T$  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 несимметричном и поочередном управлении на нагрузке формируются однопольярные импульсы длительностью  $\gamma T$ , пропорциональной сигналу на входе, среднее значение напряжения на нагрузке определяется из выражения:

$$U_H = \frac{1}{T} \int_0^{\gamma T} U_a dt = \gamma U_a \quad (5.14)$$

Функциональная схема управления транзисторным ШИП при несимметричном управлении изображена на рис. 5.31, а. Она содержит задающий генератор импульсов (Г) генератор пилообразного напряжения (ГПН), два сумматора (СУМ1, СУМ2), две схемы сравнения (СС1, СС2), два распределителя импульсов (РИ1, РИ2) и усилители (У1, У2). Диаграммы на рис. 5.31 б поясняют принцип работы схемы управления ШИП.

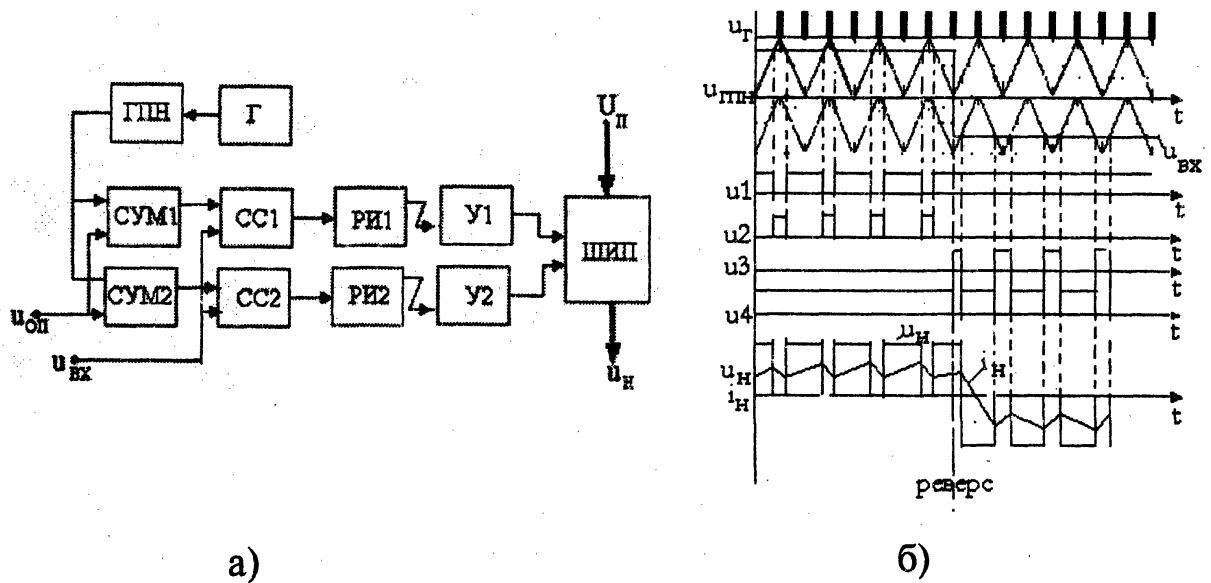


Рис. 5.31. Схема управления и электромагнитные процессы в транзисторном ШИП при несимметричном управлении

На входе сумматоров напряжение с выхода ГПН сравнивается с постоянным опорным напряжением  $U_{оп}$ , величина опорного напряжения задается равной максимальному значению напряжения с выхода ГПН. В результате с выходов сумматоров на входы схем сравнения поступают смещенные на  $U_{оп}$  пилообразные напряжения (рис. 5.31). Схема сравнения СС1 со своим распределителем импульсов (РИ1) и усилителями управляют переключением одного плеча моста (VT1, VT2 рис. 5.29), а схема сравнения СС2 с РИ2 и усилителями управляет переключением другого плеча моста (VT3, VT4 рис. 5.29). В результате при одной полярности входного сигнала переключаются транзисторы одного плеча, а в другом плече один транзистор все время открыт, а другой закрыт. При реверсе входного сигнала плечи «меняются» местами.

### 5.6. Аналитическое представление электромагнитных и энергетических характеристик широтно-импульсных преобразователей

Регулировочные характеристики ШИП были рассмотрены выше. Энергетические и электромагнитные характеристики ШИП рассчитываются на основании анализа электромагнитных процессов.

Для симметричного способа управления при обобщенной нагрузке на коммутационных интервалах имеем:

$$U_n = L_H \frac{di_H}{dt} + R_H i_H + E, \quad nT < t < (n+1)\gamma T \quad (5.15)$$

$$-U_n = L_H \frac{di_H}{dt} + R_H i_H + E, \quad \gamma(n+1)T < t < (n+1)T, \quad (5.16)$$

где  $U_{\Pi} = \frac{U_d}{2}$  для одноплечевых схем и  $U_{\Pi} = U_d$  для мостовых схем,  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  целые числа.

Разделим все слагаемые уравнений (5.15, 5.16) на  $U_n$  и обозначим  $I_k = \frac{U_n}{R_n}$ ,

тогда эти уравнения можно представить в относительных единицах:

$$1 = T_H \frac{d\bar{i}_H}{dt} + \bar{i}_H + \bar{E}, \quad nT < t < \gamma(n+1)T \quad (5.17)$$

$$-1 = T_H \frac{d\bar{i}_H}{dt} + \bar{i}_H + \bar{E}, \quad \gamma(n+1)T < t < (n+1)T \quad (5.18)$$

где  $\bar{i}_H = i_H / I_k$  — относительный ток нагрузки,  $\bar{E} = E / U_{\Pi}$  — относительная ЭДС

нагрузки,  $T_H = \frac{L_H}{R_H}$  — постоянная времени нагрузки.

Для несимметричного и поочередного способов управления уравнения (5.17, 5.18) запишутся в виде:

$$1 = T_H \frac{d\bar{i}_H}{dt} + \bar{i}_H + \bar{E}, \quad nT < t < \gamma(n+1)T \quad (5.19)$$

$$0 = T_H \frac{d\bar{i}_H}{dt} + \bar{i}_H + \bar{E}, \quad \gamma(n+1)T < t < (n+1)T \quad (5.20)$$

Среднее относительное напряжение на выходе ШИП определяется из уравнений:  $\bar{U}_H = 2\gamma - 1$  — при симметричном способе управления (двухполярном напряжении на нагрузке).

$\bar{U}_H = \gamma$  — при несимметричном управлении (однополярном напряжении на нагрузке), ток нагрузки содержит среднюю составляющую  $\bar{I}_H$  и пульсирующую составляющую  $\Delta \bar{I}_H$ . Средний ток обусловлен средним значением напряжения на нагрузке и величиной ЭДС:

$$\bar{I}_H = (2\gamma - 1) - \bar{E} \quad (5.21)$$

при двухполярном напряжении на выходе ШИП,

$$\bar{I}_H = \gamma - \bar{E} \quad (5.22)$$

при однополярном напряжении.

Величина пульсирующей составляющей находится из решения системы уравнений (5.17— 5.22), обобщенное выражение этой составляющей имеет вид:

$$\Delta \bar{I}_H = \frac{(1 - \bar{E} - \bar{I}_H) \gamma \frac{T}{T_H}}{2 - \gamma \frac{T}{T_H}} \quad (5.23)$$

Средние и эффективные токи в нагрузке, в силовых транзисторах, диодах и в источнике питания могут быть определены по упрощенным выражениям, если принять, что мгновенный ток нагрузки изменяется по закону:

$$\bar{i}_H = (\bar{I}_H - \Delta\bar{I}_H) + \frac{2\Delta I_H}{\gamma T} t \quad \text{при} \quad nT < t < (1+n)\gamma T, \quad (5.24)$$

$$\bar{i}_H = (\bar{I}_H + \Delta\bar{I}_H) - \frac{2\Delta I_H}{(1-\gamma)T} t \quad \text{при} \quad (1+n)\gamma T < t < (1+n)T. \quad (5.25)$$

В этом случае выражения для определения относительных токов во всех отмеченных ветвях представлены в таблице 5.1

$\bar{I}_H$	$\bar{I}_{T\text{cp}}$	$\bar{I}_T$	$\bar{I}_{D\text{cp}}$	$\bar{I}_D$	$\bar{I}_{cp}^*$	$\bar{I}^*$
Несимметричное управление (однополярное напряжение на нагрузке)						
$\gamma - \bar{E}$	$\gamma(\gamma - \bar{E})$	$\sqrt{\gamma}(\gamma - \bar{E})$	$(1-\gamma) \times$ $\times(\gamma - \bar{E})$	$\sqrt{1-\gamma} \times$ $\times(\gamma - \bar{E})$	$\gamma(\gamma - \bar{E})$	$\sqrt{\gamma}(\gamma - \bar{E})$
Симметричное управление (двухполярное напряжение на нагрузке)						
$2\gamma -$ $-1 - \bar{E}$	$\gamma(2\gamma -$ $1 - \bar{E})$	$\sqrt{\gamma}(2\gamma -$ $1 - \bar{E})$	$(1-\gamma) \times$ $\times(2\gamma -$ $-1 - \bar{E})$	$\sqrt{1-\gamma} \times$ $\times(2\gamma -$ $-1 - \bar{E})$	$(2\gamma - 1) \times$ $\times(2\gamma -$ $-1 - \bar{E})$	$\sqrt{2\gamma - 1} \times$ $\times(2\gamma -$ $-1 - \bar{E})$

При найденных токах (табл. 5.1) мощность в нагрузке, мощность, потребляемая из источника питания и потери в силовых полупроводниковых элементах ШИП находятся по уравнениям:

$$P_H = I_H U_H \qquad P_{II} = U_{II} I_{cp} \quad (5.26)$$

$$P_T = U_{T0} I_{T\text{cp}} + I_T^2 r_T \qquad P_D = U_{D0} I_{D\text{cp}} + I_D^2 r_D.$$

### 5.7. Моделирование мостового широтно-импульсного преобразователя с поочередным законом управления в установившихся режимах

Модель для исследования мостового широтно-импульсного преобразователя с поочередным законом управления показана на рис. 5.32 (файл. *Ship\_Virt*).

Она содержит:

- источник постоянного напряжения (U);
- активно-индуктивную нагрузку (R,L);
- управляемую противо ЭДС в цепи нагрузки (Controlled Voltage Source);
- блок Multimeter для измерения токов и напряжений в схеме;
- блок для измерения среднего значения тока питания (Fourier I1(0));
- блок для измерения среднего значения тока нагрузки (Fourier I(0));
- блок для измерения среднего значения напряжения на нагрузке (Fourier U(0));
- блок для измерения среднего значения тока силового полупроводникового модуля (FourierT(0));
- блок для измерения действующего значения тока силового полупроводникового модуля (RMS T);
- цифровой дисплей;
- блок (To Workspace) для записи и последующей обработки электромагнитных процессов;
- библиотечный блок управления ШИП (Control system), реализующий поочередное управление;
- блоки Mux и Demux для собирания и разделения сигналов.

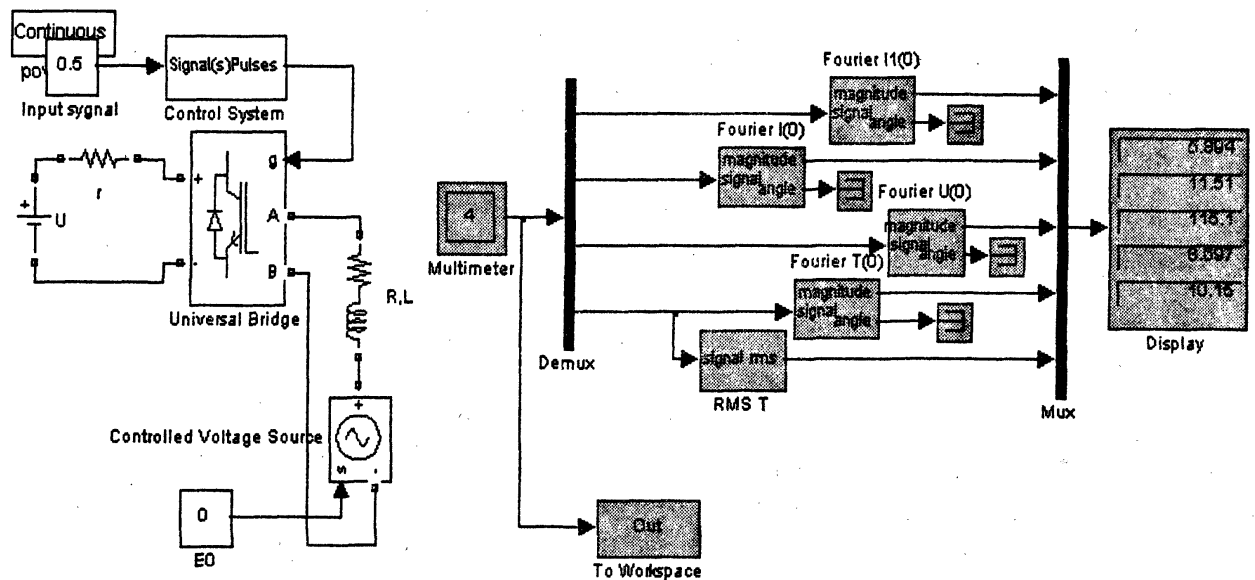


Рис. 5.32. Виртуальная модель мостового ШИП

Окно настройки параметров транзисторного ШИП показано на рис. 5.33.

В полях настройки заданы:

- количество ветвей моста (2) в поле Number of bridge arms;
- параметры демпфирующих цепей (Snubber resistance, Snubber capacitance);
- тип полупроводниковых приборов в универсальном мосте (Power Electronic device);
- динамическое сопротивление полупроводникового модуля в открытом состоянии в Омах (Ron Ohms );
- пороговое напряжение на транзисторе и диоде модуля в открытом состоянии в вольтах (Forward voltage V);
- время спада и время затягивания (хвоста) выключения (Tf, Tt) в секундах.

В поле Measurement выбраны величины, которые измеряются блоком Multimetr.

Библиотечный блок управления (Control system) показан на рис. 5.34.

В окнах настройки параметров блока задается число плеч моста (2) и частота ГПН ( $f_0=500$  Гц.).

В окнах настройки параметров блоков Fourier I1(0), Fourier I(0)0, Fourier U(0), Fourier T(0) устанавливается частота, равная частоте напряжения ГПН (500 Гц.) и номер нулевой гармоники. В поле окна блока для измерения действующего тока в полупроводниковом модуле (RMS T) вводится частота, на которой производится измерение (в данном случае — это частота ГПН).

При снятии регулировочной характеристики параметры нагрузки остаются без изменений, изменяется напряжение управления от 0В до 1В. При этом моделирование проводится для каждого значения напряжения управления. При снятии внешней энергетических и электромагнитных характеристик параметры нагрузки R,L остаются без изменений, изменяется противо ЭДС от 240В до 0В.

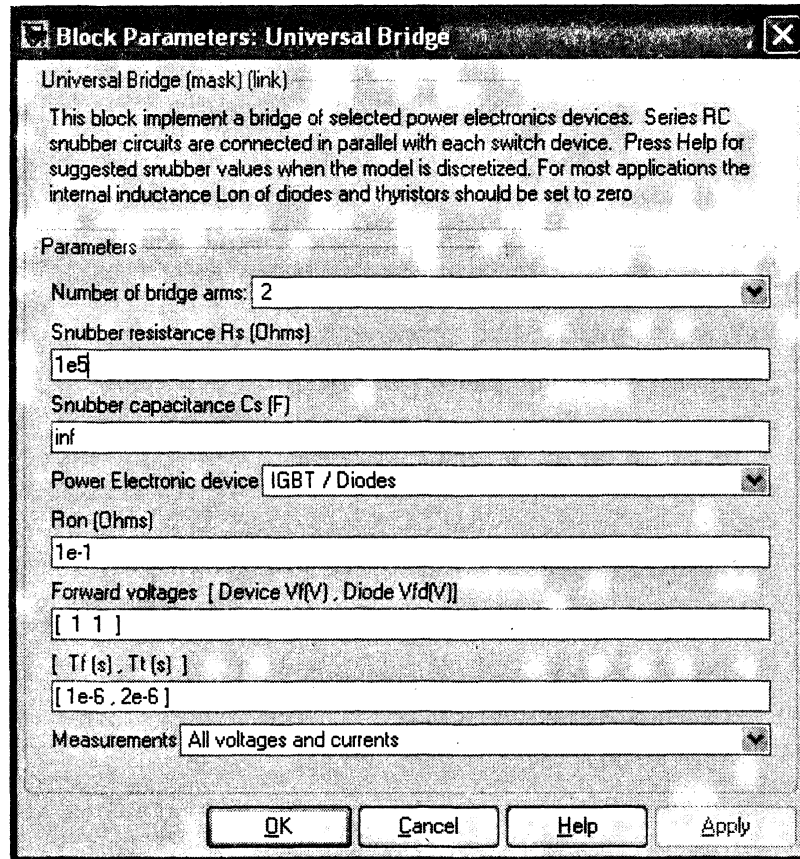


Рис. 5.33. Окно настройки параметров транзисторного ШИП

В блоке Display измеряемые величины представлены в следующей последовательности:

- Средний ток питания.
- Средний нагрузки.
- Среднее напряжение на нагрузке.
- Средний ток в силовом полупроводниковом модуле.
- Действующий ток в силовом полупроводниковом модуле.

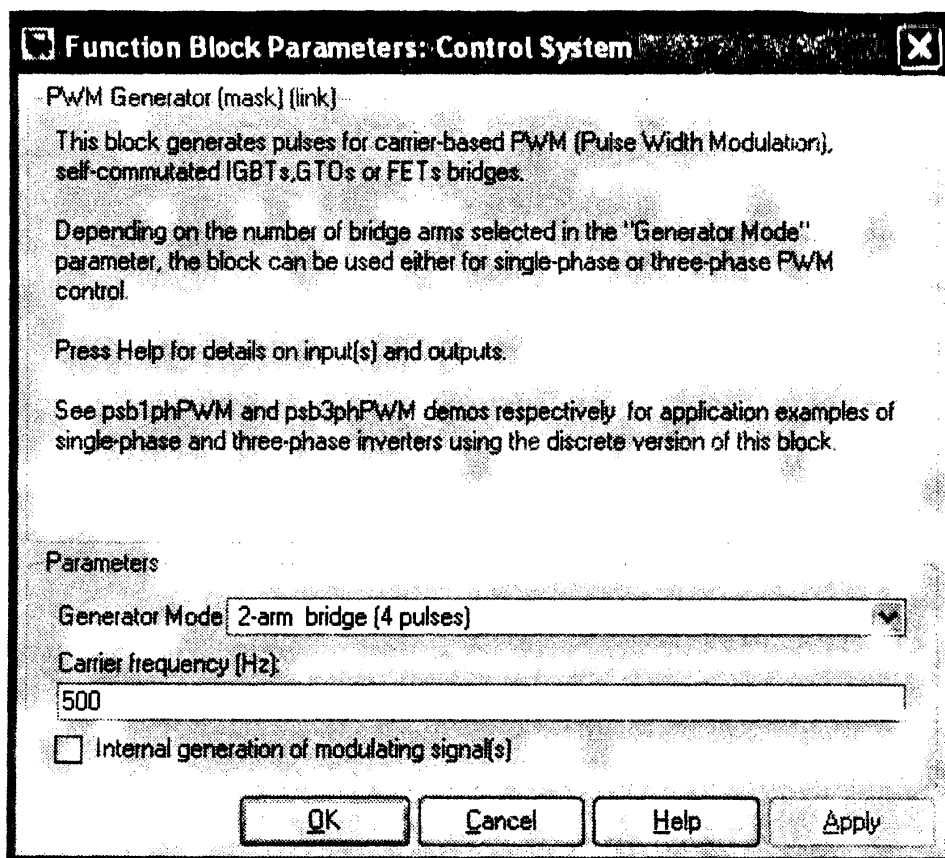


Рис. 5.34. Библиотечный блок управления (Control system) ШИП

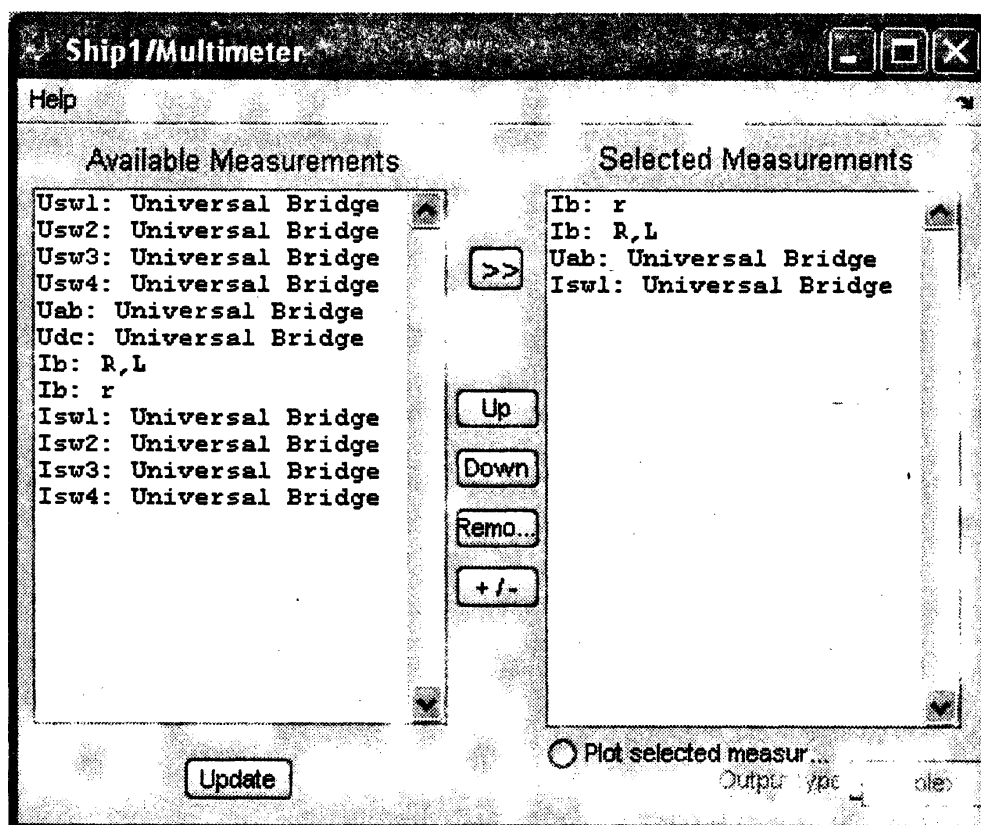


Рис. 5.35. Окно настройки параметров блока Multimeter. В блоке Display измеряемые величины представлены в следующей последовательности:

```

Листинг 5.1
I1=Out(:,1);
I0=Out(:,2);
U0=Out(:,3);
IT=Out(:,4);
t=0:1e-5:499e-5;
subplot(3,1,1);
plot(t,U0);
grid on;
title("Load voltage");
subplot(3,1,2);
plot(t,I1,t,I0);
text(0.3e-3,180,'Transistir current');
grid on;
title("Source current,Load current");
subplot(3,1,3);
plot(t,IT),grid on;
title("Transistir current")
xlabel("Time (s)");
    
```

Окно настройки параметров блока Multimeter показано на рис. 5.35. В правое поле помещены переменные, подлежащие измерению. При этом существенно последовательность, в которой эти переменные помещены в правом поле. В такой же последовательности они представлены на выходе блока Demux (рис. 5.32).

Мгновенные значения измеренных блоком переменных можно наблюдать в графическом окне MatLab (рис. 5.36) при выполнении программы (листинг 5.1).

По результатам моделирования рассчитываются и строятся основные характеристики ШИП:

- регулировочная характеристика ШИП  $U_H = f(u)$  (рис. 5.37);
- внешняя характеристика ШИП

$$U_H = f(I_H) \text{ (рис. 5.38);}$$

- энергетические характеристики ШИП  $P_1, P_H = f(I_H)$  (рис. 5.39);

- электромагнитные характеристики  $I_1, I_T(RMS), I_{T0} = f(I_H)$  (рис. 5.40).

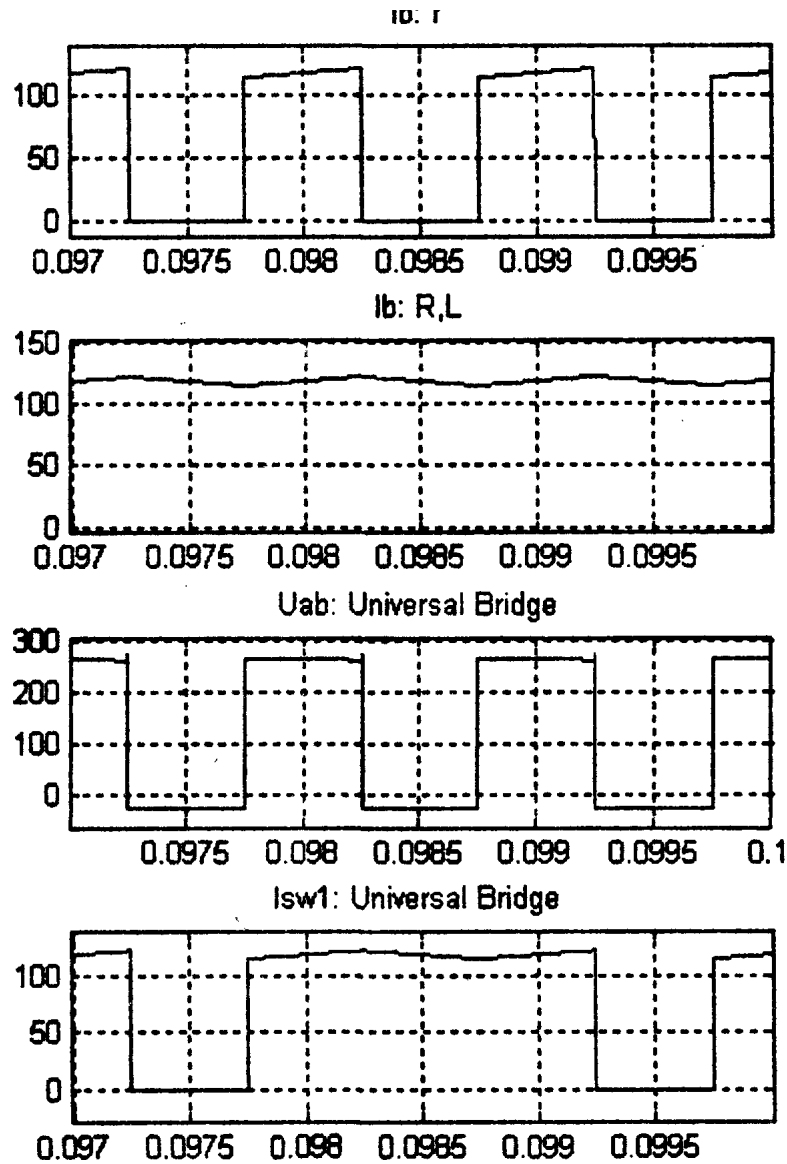


Рис. 5.36. Электромагнитные процессы в ШИП

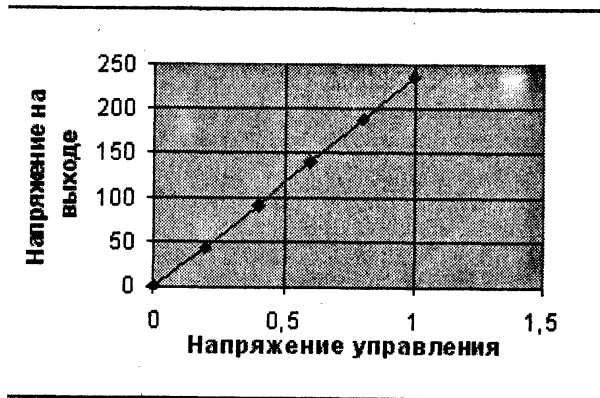


Рис. 5.37. Регулировочная характеристика ШИП

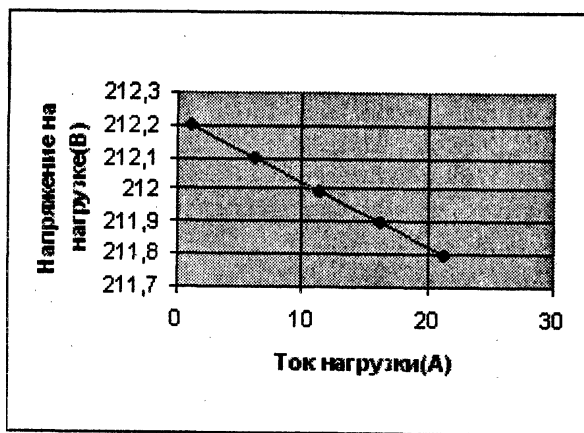


Рис. 5.38. Внешняя характеристика ШИП

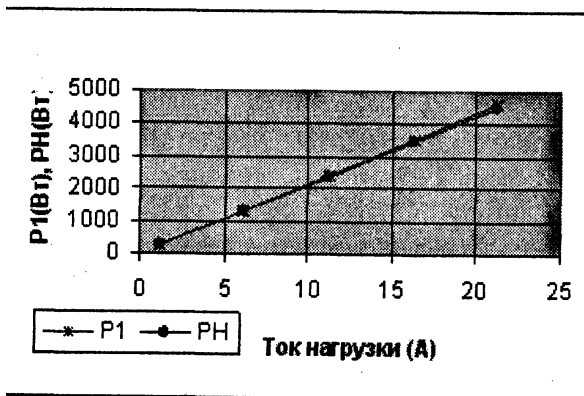


Рис. 5.39. Энергетические характеристики ШИП

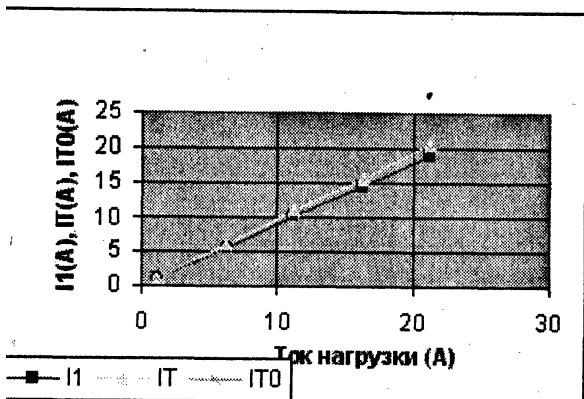


Рис. 5.40. Электромагнитные характеристики ШИП

### 5.8. Динамические модели ШИП в системах мехатроники

Как звено системы регулирования, ШИП обычно описывается аperiodическим звеном или звеном с запаздыванием.

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (5.27)$$

где  $T$  — период выходного напряжения,  $K = \frac{U_H}{U_y}$  — коэффициент передачи (усиления) ШИП.

Функциональная динамическая модель ШИП строится в соответствии с функциональной схемой на элементах главной библиотеки пакета Simulink.

На рис.5.41 представлена функциональная модель реверсивного ШИП с симметричным алгоритмом управления (*файл. Mod\_Ship\_Sym*).

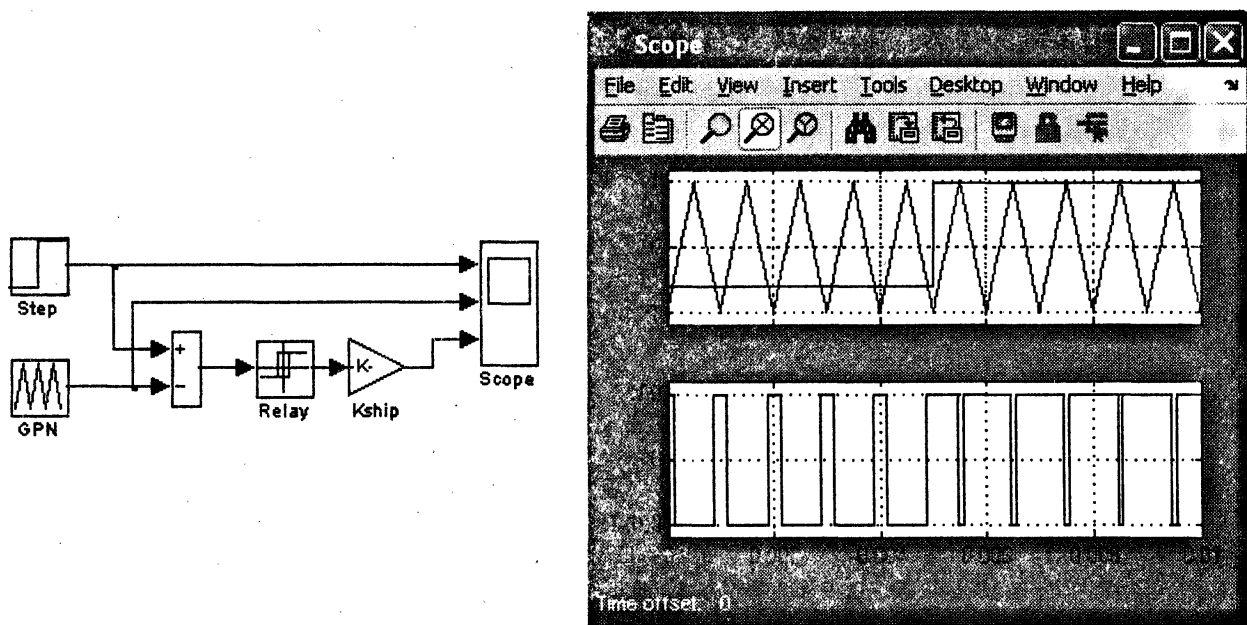


Рис. 5.41. Функциональная модель ШИП

Модель содержит:

- генератор пилообразного напряжения с амплитудой 1 В. и частотой 1000 Гц. (блок GPN);
- Блок Step, формирующий входной сигнал.
- Блок сравнения, реализованный на сумматоре.
- Формирователь импульсов (блок Relay).
- Усилитель (блок Kship), реализующий коэффициент усиления ШИП.

Электромагнитные процессы в схеме показаны на рис. 5.41. На верхней осциллограмме представлен входной сигнал и напряжение на выходе ГПН, на нижней осциллограмме представлено напряжение на выходе ШИП.

Функциональная модель реверсивного ШИП с несимметричным и поочеред-

ным алгоритмом управления (файл. *Mod\_Ship\_NSym*) и электромагнитные процессы в схеме показаны на рис. 5.42 и на рис. 5.43.

*Заметим, что для получения у несимметричного ШИП одинакового с симметричным ШИП коэффициента передачи нужно уменьшить амплитуду пилообразного напряжения в два раза. При этом уменьшается в два раза величина опорного напряжения.*

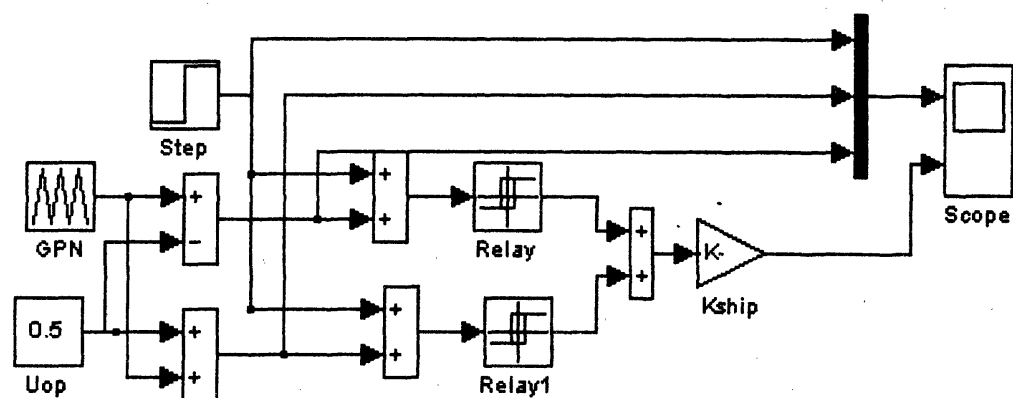
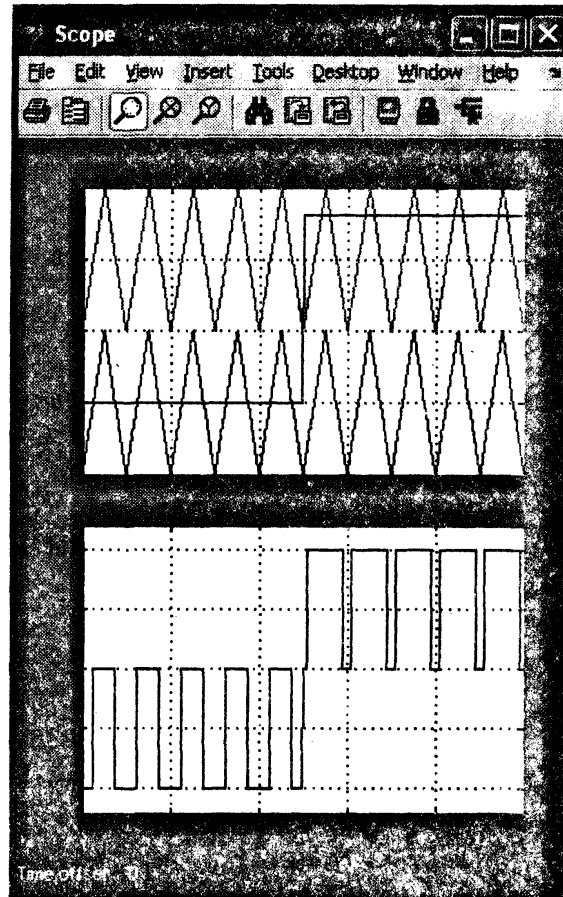


Рис. 5.42. Функциональная модель реверсивного ШИП с несимметричным и поочередным алгоритмом управления



з. 5.43. Электромагнитные процессы в ШИП с несимметричным и поочередным управлением

. Запаздывание, вносимое ШИП в реакцию на скачок входного воздействия, зависит от момента изменения входного сигнала.

При аналитическом представлении ШИП непрерывным звеном (уравнение 5. 27) это запаздывание принимается максимальным, равным периоду несущего пилообразного сигнала.

В случае построения высокоточной мехатронной системы аналитическое представление ШИП может оказаться недостаточным. В этом случае при моделировании следует использовать функциональные модели.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.2.7. МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ)

### ВОПРОСЫ

1. Автономные инверторы: Вводные замечания; Однофазные инверторы; Трехфазные автономные инверторы; Многоуровневые инверторы.
2. Основные характеристики инверторов.
3. Моделирование трехфазного инвертора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. Автономные инверторы

#### 5.9.1. Вводные замечания

Автономными инверторами называются устройства, которые преобразуют постоянный ток в переменный в общем случае с регулируемой частотой и напряжением. Основные области применения автономных инверторов следующие:

- питание потребителей переменным током в условиях, где единственным источником энергии является аккумуляторная батарея (например, бортовые источники питания), а также резервное электропитание ответственных потребителей при возможном отключении сети переменного тока (электросвязь, вычислительная техника);

- электропривод с асинхронными и синхронными двигателями, где инвертор служит источником переменного напряжения и частоты;

- электроэнергетика, где автономные инверторы выполняют функцию активных фильтров, регулируемых компенсаторов реактивной мощности и мощности искажений.

По построению АИН делятся на однофазные и многофазные (двухфазные, трехфазные и т. д.). Основой построения многофазных инверторов служат однофазные одноплечевые и двухплечевые (мостовые) схемы полностью повторяющие схемы ШИП (рис. 5.26).

#### 5.9.2. Однофазные инверторы

В инверторах в основном используется симметричный алгоритм управления, когда транзисторы одного плеча переключаются в противофазе.

Отличие от ШИП состоит лишь в том, что для регулирования выходного напряжения с пилообразным напряжением несущей частоты сравнивается не постоянное напряжение, пропорциональное входному сигналу, а переменное (прямоугольное, трапецеидальное, синусоидальное) напряжение, амплитуда и частота которого пропорциональны входному сигналу.

В автономных инверторах используются следующие способы широтно-импульсной модуляции:

- Широтно-импульсное регулирование на несущей частоте (ШИР на несущей частоте с прямоугольным модулирующим сигналом).

- Широтно-импульсная модуляция на несущей частоте (ШИМ на несущей частоте с трапецеидальным или синусоидальным модулирующим сигналом).

- Модуляция в замкнутой системе с релейным регулятором тока.
- Векторная модуляция.

Рассмотрение перечисленных видов модуляции ниже произведено на базе однофазного одноплечевого инвертора. Процессы в мостовых (двухплечевых) схемах при симметричном управлении протекают аналогично. Однако в мостовых однофазных инверторах можно использовать алгоритм поочередного управления аналогичный рассмотренному выше для ШИП. Такой инвертор исследуется ниже на модели.

Векторная модуляция используется в трехфазных схемах и будет рассмотрена при исследовании трехфазных инверторов.

При двух первых видах модуляции несущим сигналом является пилообразное напряжение.

Схема и электромагнитные процессы в однофазном одноплечевом инверторе при ШИП на несущей частоте показаны на рис. 5.44.

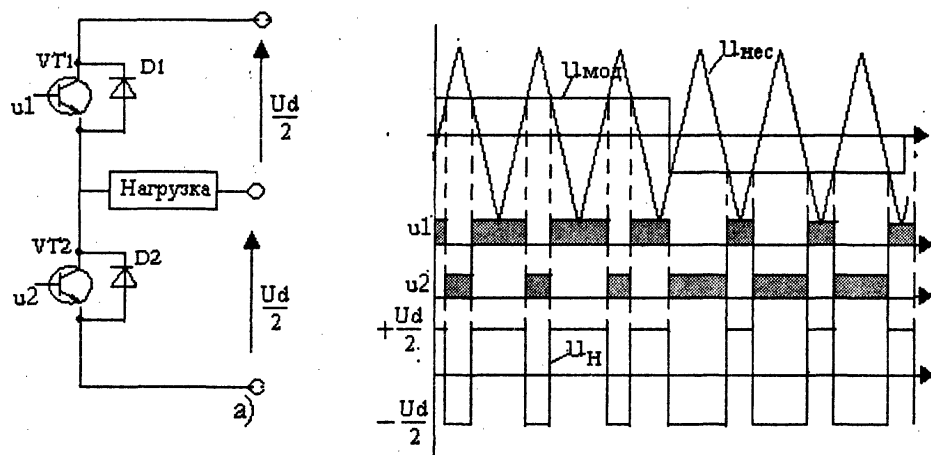


Рис. 5.44. Схема и электромагнитные процессы в однофазном одноплечевом инверторе при ШИП на несущей частоте

Амплитуда и частота модулирующего сигнала являются функциями сигнала на входе системы управления инвертором.

$$u_{\text{мод}} = U_m(u_c) \text{Sign}[\sin \omega(u_c)t]. \quad (5.28)$$

Коэффициентом модуляции называется отношение амплитуды пилообразного напряжения к амплитуде модулирующего напряжения.

$$m = \frac{U_{m\text{нес}}}{U_{m\text{мод}}}. \quad (5.29)$$

Спектральный состав напряжения на выходе определяется выражением

$$U_m(\nu) = \frac{2mU_d}{\pi} \sum_{k=1}^{2k-1} \frac{1}{k}, \quad \text{где } \nu \text{ — номер гармоники, } k=1,2,3,\dots \quad (5.30)$$

Спектр напряжения на выходе, показанный на рис. 5.45 содержит все нечетные гармоники.

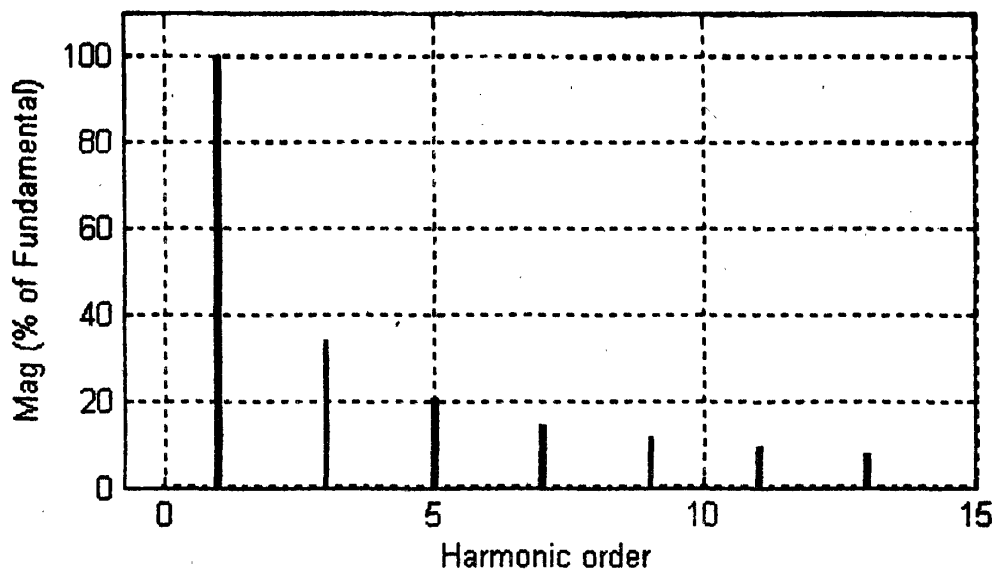


Рис. 5.45. Спектр напряжения на выходе инвертора

Улучшение гармонического состава выходного напряжения достигается применением *ШИМ на несущей частоте с синусоидальным модулирующим сигналом*.

В этом случае высшие гармоники в выходном напряжении смещаются в область высоких частот и располагаются в области частот, кратных несущей частоте. Для рис. 5.46 несущая частота в 50 раз больше частоты входного сигнала. Высшие гармоники в выходном напряжении имеют место на несущей частоте и на двух боковых частотах, отстоящих от несущей на частоту модуляции.

Подобная картина имеет место и в области гармоники с номером 100 и т. д. Следует заметить, что в системах мехатронники при исследовании динамических и статических характеристик обычно можно не учитывать высшие гармонические в выходном напряжении, считая инвертор с ШИМ источником синусоидального напряжения.

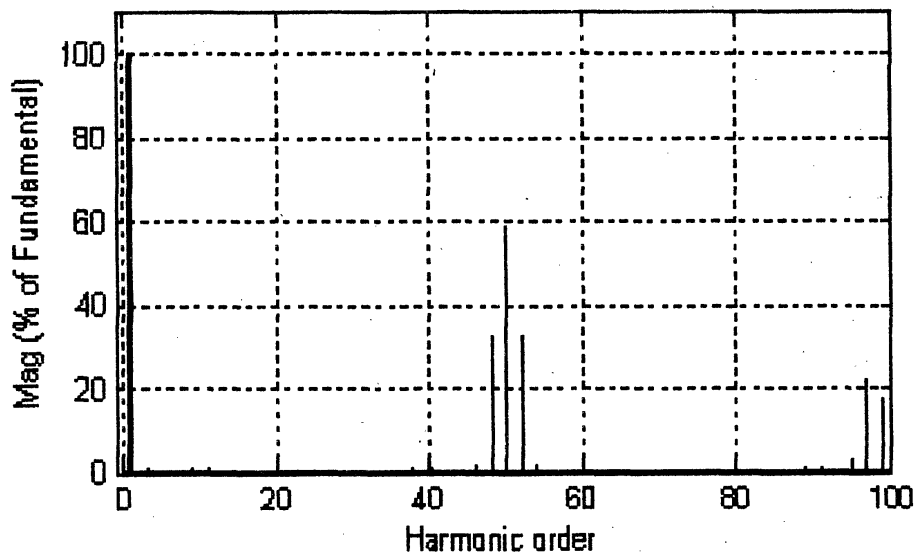


Рис. 5.46. Электромагнитные процессы и спектр инвертора с ШИМ на несущей частоте с синусоидальным модулирующим сигналом.

*Широтно-импульсную модуляцию в замкнутой системе с релейным регулятором иллюстрирует рис. 5.47*

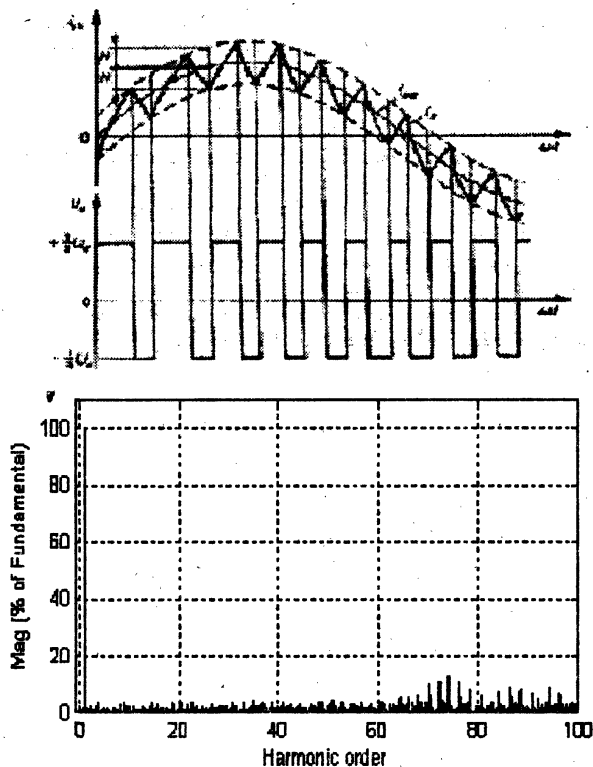


Рис. 5.47. Электромагнитные процессы и спектр инвертора с релейным регулятором тока

Схема построения инвертора в замкнутой системе с релейным регулятором тока аналогична схеме ШИП. Здесь за счет отрицательной обратной связи по току и релейного элемента ток в нагрузке пульсирует около заданного значения. Амплитуда и частота пульсаций определяется параметрами  $R$ ,  $L$  нагрузки и шириной петли гистерезиса релейного элемента. Часто такой способ ШИМ называют «токовым коридором».

Такой инвертор обладает свойствами источника тока, что широко используется при построении систем с исполнительными двигателями переменного тока.

Функциональные схемы управления однофазными одноплечевыми инверторами аналогичны рассмотренным выше схемам управления ШИП. Отличие состоит лишь в том, что на вход подается не постоянный, а переменный сигнал.

*Мостовой однофазный инвертор с поочередным законом управления.*

Электромагнитные процессы и спектральный состав мостового однофазного инвертора с поочередным законом управления исследованы с использованием модели (файл *A1N\_2pl*), показанной на рис. 5.48. Эта модель содержит мостовой однофазный инвертор (Universal bridge), схему управления инвертором, реализующую синусоидальную ШИМ с несущей частотой 500 Гц. (Control System), блок задания сигнала управления (модулирующего сигнала частоты 10 Гц (Signal Generator), источник питания инвертора ( $U=300\text{В.}$ ), активно-индуктивную нагрузку инвертора ( $R=5\text{ Ом}$ ,  $L=0,1\text{Г}$ ), блоки измерений и записи результатов измерений в рабочую область.

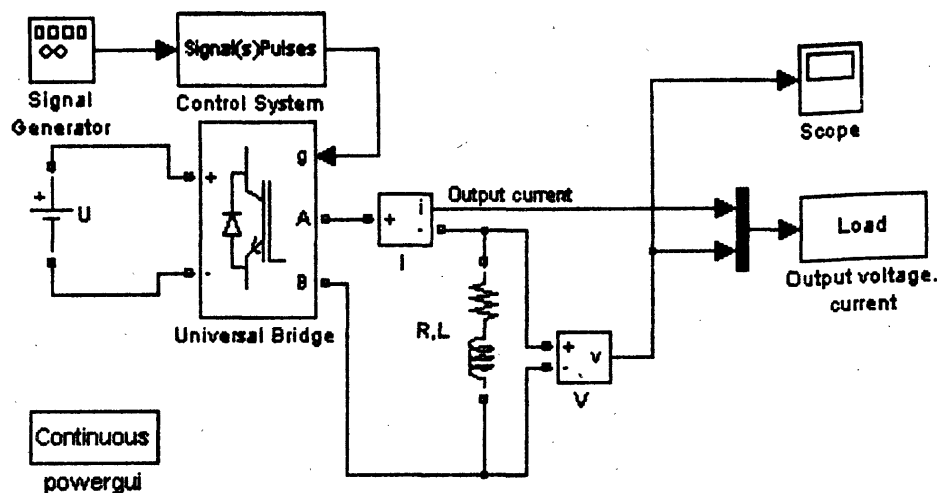


Рис. 5.48. Модель однофазного мостового инвертора

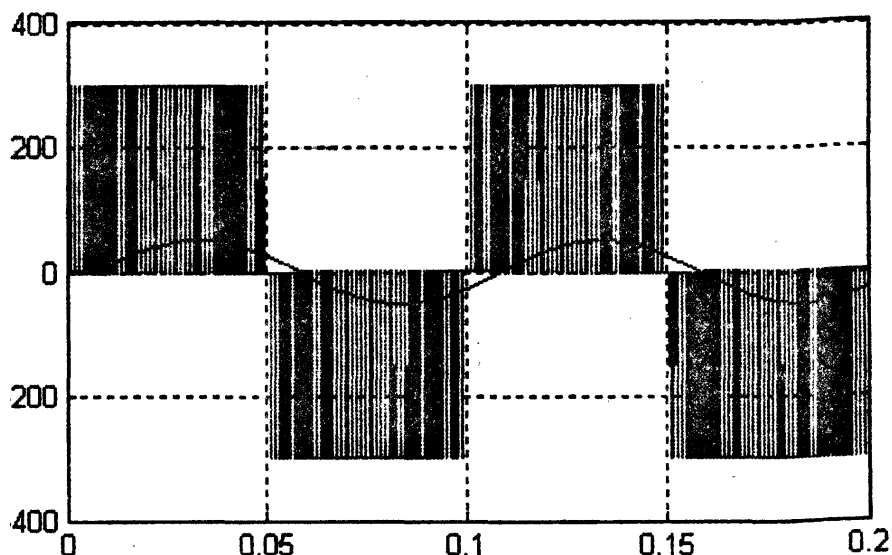


Рис. 5.49. Напряжение и ток нагрузки однофазного мостового инвертора

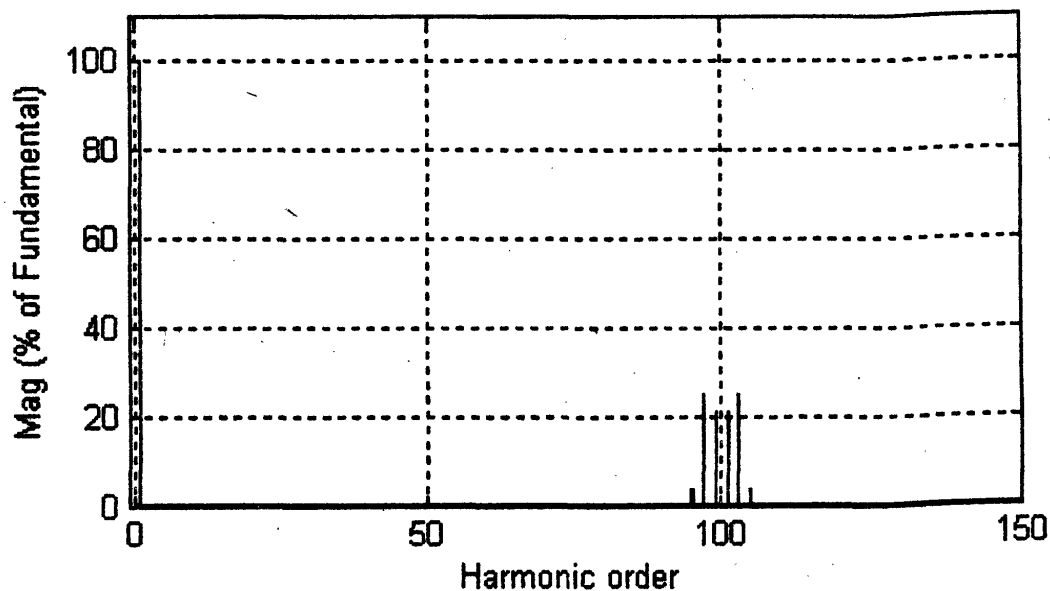


Рис. 5.50. Спектр напряжения нагрузки однофазного мостового инвертора

На рис. 5.49 показаны напряжение и ток в нагрузке. Спектральный состав напряжения на нагрузке показан на рис. 5.50. Здесь в отличие от схем с симметричным управлением высшие гармоники появляются только на частотах, близких к удвоенной несущей частоте.

Функциональные схемы управления всех перечисленных инверторов строятся аналогично схемам, рассмотренным выше для широтно-импульсных преобразователей.

### 5.9.3. Трехфазные автономные инверторы

*Автономный инвертор с алгоритмом управления  $\alpha = 180^\circ$ .*

Трехфазный автономный инвертор состоит из трех однофазных одноплечевых инверторов, присоединенных параллельно к одному источнику питания.

Нагрузка такого инвертора включается либо по схеме «звезда», либо по схеме «треугольник». Как в первом, так и во втором случае переключение транзисторных ключей любой фазы инвертора вызывает изменение напряжения на всех фазах.

Простейший способ управления транзисторными ключами VT1 — VT6 инвертора ( $\alpha = 180^\circ$ ) представлен на рис. 5.51.

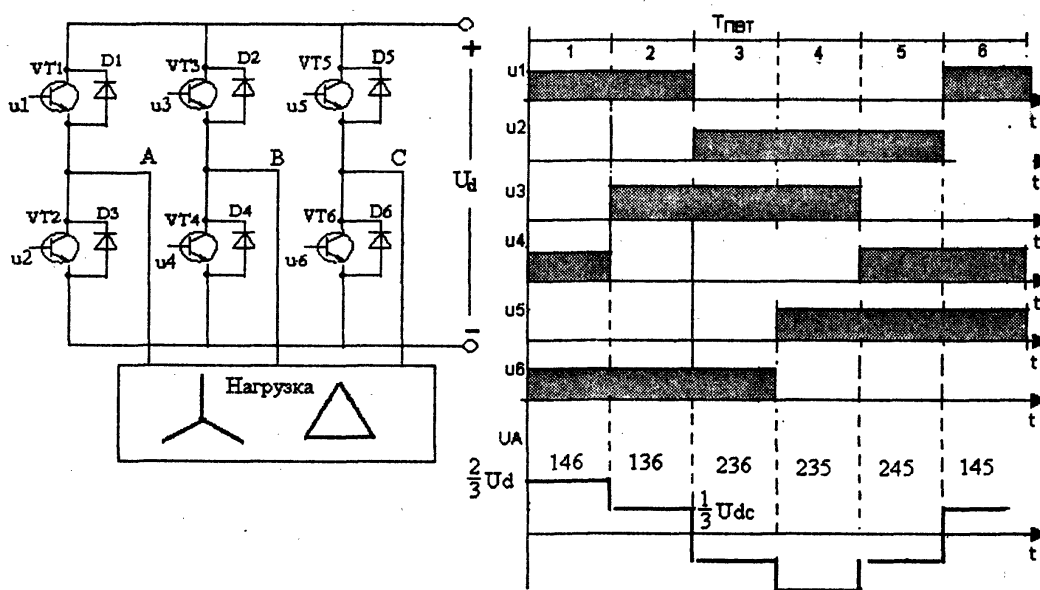


Рис. 5.51. Алгоритм управления АИН с  $\alpha = 180^\circ$

Здесь в течение  $1/6$  периода выходного напряжения (в течение периода повторяемости  $T_{ПВТ}$ ) включены три транзистора. Форма напряжения на фазе А нагрузки при ее включении «звездой» показана на нижней осциллограмме.

Электромагнитные характеристики систем при управлении инвертором с  $\alpha = 180^\circ$  достаточно подробно освещены в литературе. Главным недостатком этого способа является необходимость применения управляемого выпрямителя для изменения напряжения на выходе инвертора.

При управлении автономным инвертором по закону  $\alpha = 180^\circ$  амплитуды гармонических составляющих в фазном напряжении определяются из выражения:

$$U_{mv} = \frac{2}{v\pi} U_d, \quad (5.31)$$

где  $U_{mv}$  — амплитуда  $v$ -ой гармоники;  $v = 6n \pm 1; n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $U_d$  — напряжение питания.

Отношение амплитуд гармонических составляющих фазного напряжения к амплитуде первой гармоники имеет вид:

$$\frac{U_{mv}}{U_{m1}} = \frac{1}{v}. \quad (5.32)$$

Из уравнения (5.32) следует, что при простейшем алгоритме управления гармонический состав постоянен. В спектре выходного напряжения трехфазного инвертора отсутствуют все четные гармоники, а также гармоники, кратные трем. В выходном напряжении наиболее сильно выражены пятая и седьмая гармоники.

*Автономный инвертор с ШИР на частоте повторения.*

Для обеспечения регулирования выходного напряжения самим инвертором используются ШИР и ШИМ модуляции на несущей частоте. Рассмотрим наиболее простой способ управления при ШИР на несущей частоте, равной частоте повторения. Эпюры напряжений на входе транзисторов VT1—VT6 и напряжения на выходе автономного инвертора представлены на рис. 5.52.

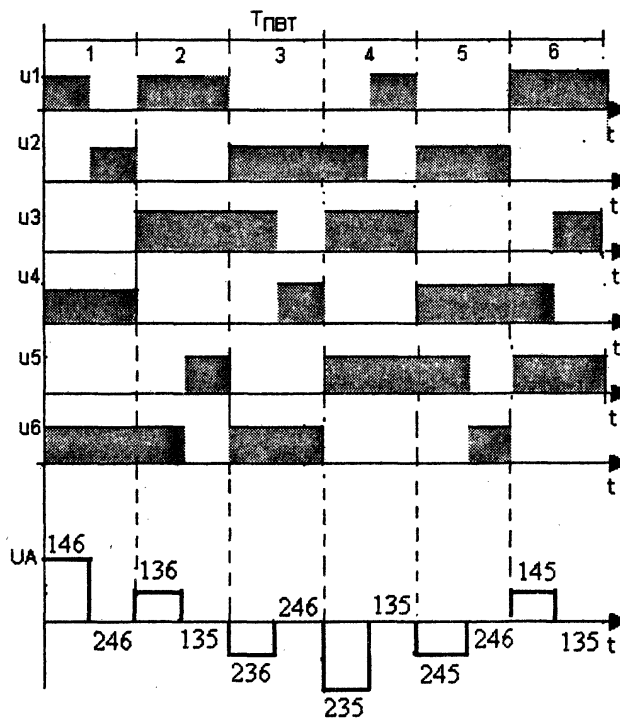


Рис. 5.52. Управление АИН при ШИР на основной частоте

В течение каждого периода повторения для подключения нагрузки к источнику питания отпираются три транзистора (например, VT1, VT4, VT6); для отключения

нагрузки от источника переключаются транзисторы одного плеча. Причем запирается тот транзистор, который позволяет отключить всю группу анодных или катодных силовых ключей. Так, для отключения нагрузки при включенных транзисторах VT1, VT4, VT6, выключается VT1 и включается VT2. При включенных транзисторах VT1, VT3, VT6 транзистор VT6 выключается, а транзистор VT5 включается и т. д. Такой способ управления называется алгоритмом одиночного переключения (АОП).

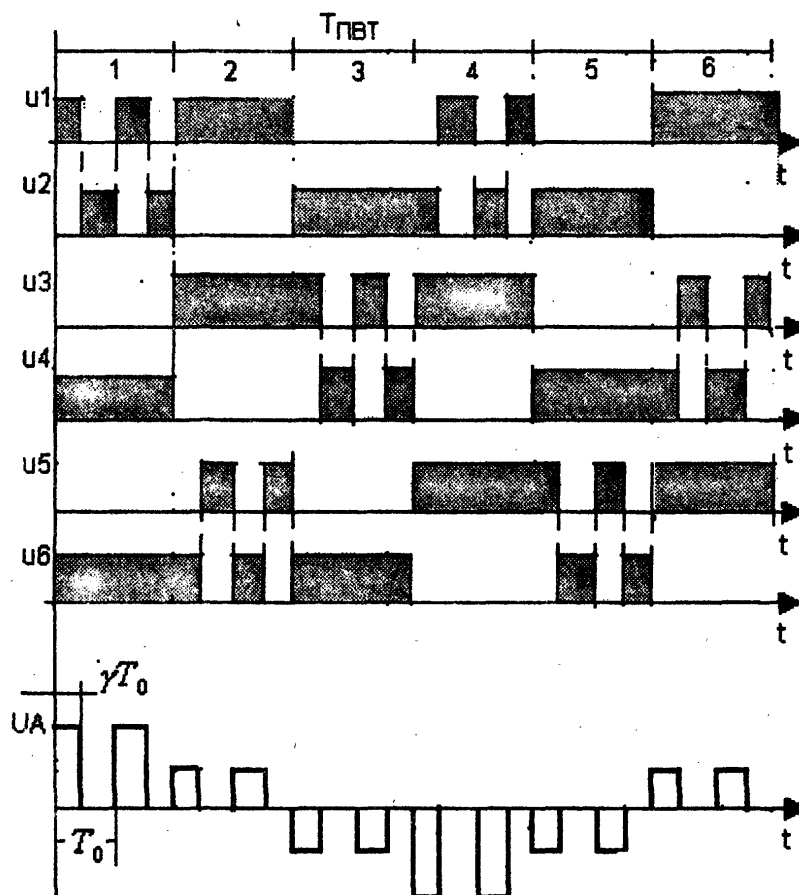
Широтно-импульсное регулирование напряжения на выходе инвертора на частоте повторения и АОП осуществляется изменением относительной продолжительности  $\gamma$  включения нагрузки в цепь источника питания. Имеется и другая возможность ШИР на основной частоте, когда в паузе между импульсами запираются два силовых транзистора одной группы (алгоритм группового переключения АГП). Здесь при открытых VT1, VT4, VT6 для создания паузы в напряжении на нагрузке запираются VT4 и VT6 и отпираются VT3, VT5.

При ШИР на частоте повторения гармонический состав выходного напряжения резко ухудшается в области малых напряжений и частот. Для исключения этого нежелательного явления, используется широтно-импульсное регулирование на несущей частоте.

*Автономный инвертор с ШИР на несущей частоте.*

В этом случае в течение периода повторения несколько раз с периодом

$T_0 = \frac{1}{f_{нес}}$  происходит переключение одного плеча трехфазного моста (рис. 5.53).



### Рис. 5.53. Управление АИН при ШИР на несущей частоте

При этом нагрузка оказывается подключенной к источнику питания на интервале  $\gamma T_0$ , а на интервале  $(1-\gamma)T_0$  фазы нагрузки закорочены. На рис. 5.53 представлен случай, когда  $T_{ПВТ} = 2T_0$ . Гармонический состав выходного напряжения при ШИР на несущей частоте улучшается с увеличением кратности

$$k = \frac{T_{ПВТ}}{T_0} = \frac{f_{нес}}{f_{ПВТ}} = \frac{6f_{нес}}{f_{мод}}$$

Спектральный состав выходного напряжения трехфазного инвертора зависит от коэффициента модуляции. При ШИР на частоте повторения (рис. 5.52) отношение амплитуд гармонических составляющих фазного напряжения к амплитуде первой гармоники имеет вид:

$$\frac{U_{mv}}{U_{m1}} = \frac{1 \sin(v\pi\gamma/6)}{v \sin(\pi\gamma/6)} \quad (5.33)$$

На рис. 5.54 а показаны зависимости относительных амплитуд гармоник от относительной длительности управления  $\gamma$ . Из рис. 5.54 видно, что в процессе регулирования при уменьшении выходного напряжения 5, 7 и 11 гармоники приближаются к основной, что искажает форму напряжения и тока нагрузки.

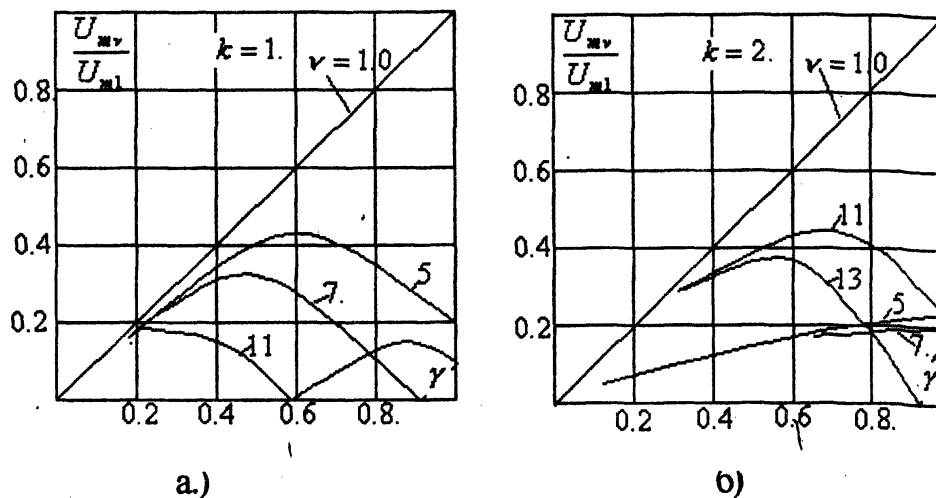


Рис. 5.54. Гармонический состав выходного напряжения АИН с ШИР

Некоторое улучшение гармонического состава достигается за счет ШИР на несущей частоте.

В этом случае отношение амплитуд гармонических фазного напряжения к амплитуде первой гармоники имеет вид:

$$\frac{U_{mv}}{U_{m1}} = \frac{1 \sin(v\pi\gamma/6k)}{v \sin(\pi\gamma/6k)} \quad (5.34)$$

где  $k$  определено выражением

$$k = \frac{T_{ПВТ}}{T_{нес}} = \frac{f_{нес}}{f_{ПВТ}} = \frac{6f_{нес}}{f_{мод}}$$

Из последнего выражения следует, что для монотонного уменьшения  $\nu$ -гармоники необходимо соблюдение условия  $\frac{\nu}{k} < 3$ . При  $k=1$  ни для одной из высших

гармоник это условие не выполняется. При  $k=2$  оно выполняется только для пятой гармоники. При  $k=3$ -для пятой и седьмой гармоник и т. д.

На рис. 5.54 б показаны зависимости относительных амплитуд гармоник от относительной длительности управления  $\gamma$  для  $k=2$ .

Качественное улучшение гармонического состава выходного напряжения инвертора достигается при широтно-импульсной модуляции на несущей частоте, когда модулирующим сигналом является синусоидальное или трапецеидальное напряжение. На рис. 5.55 приведен пример трехфазного инвертора с синусоидальной ШИМ на несущей частоте. Моделирующие напряжения управления транзисторами каждого плеча инвертора сдвинуты на  $120^\circ$ . Эти сигналы сравниваются с пилообразным несущим сигналом и формируют сигналы управления каждым плечом (на рис. 5.55 показаны сигналы управления плечом фазы А). В соответствии с сигналами управления транзисторами формируется напряжение на каждой фазе нагрузки.

В случае широтно-импульсной модуляции расчет спектра выходного напряжения инвертора представляет собой достаточно сложную задачу. На гармонический состав выходного напряжения здесь влияют отношение несущей частоты к частоте модуляции, закон изменения модулирующего напряжения и коэффициент модуляции.

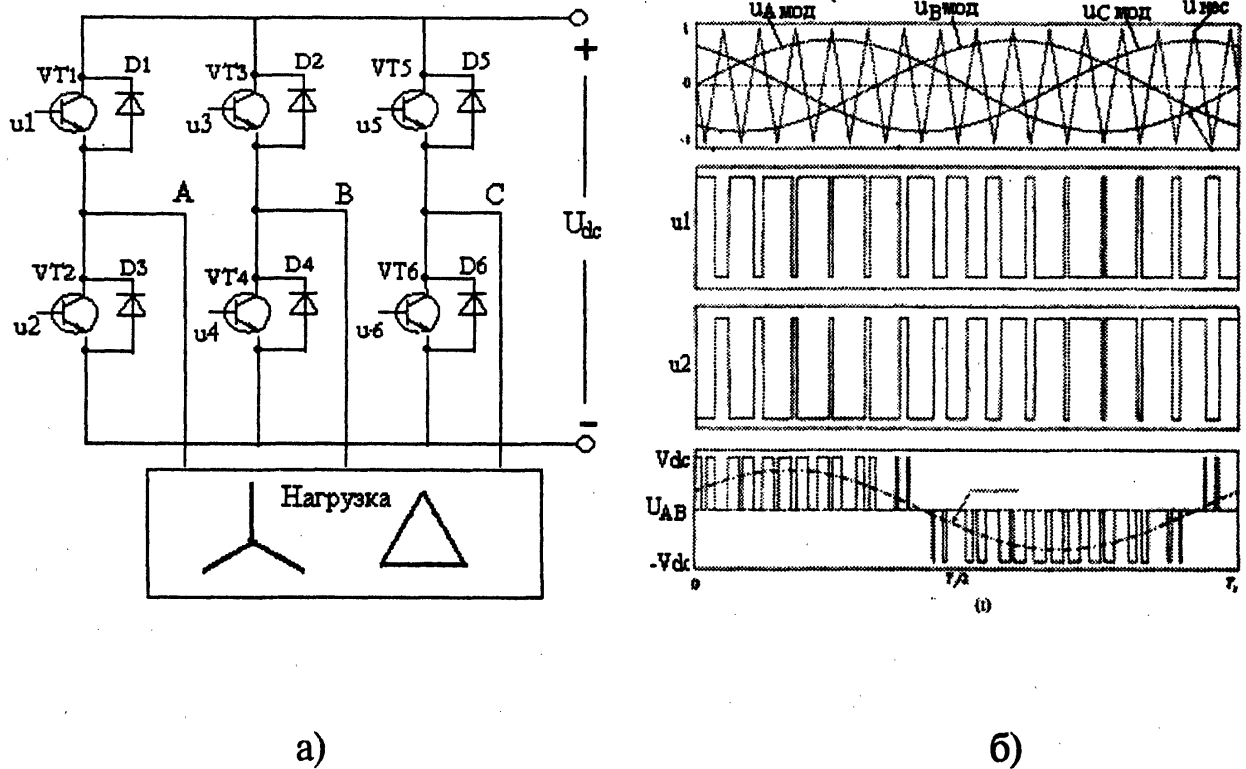


Рис. 5.55. Трехфазный инвертор с синусоидальной ШИМ на несущей частоте

На рис. 5.56 в качестве примера представлен спектр линейного напряжения на выходе инвертора при синусоидальной форме модулирующего напряжения и  $m=0,8$ ,  $f_{нес}=500$  Гц,  $f_{мод}=25$  Гц.

При широтно-импульсной модуляции имеет место избыточно частое переключение транзисторов в трехфазном инверторе. Исследования показали, что достаточно переключать транзисторы только одного плеча в течение периода повторяемости ( $1/6$  периода частоты модуляции). Такие способы модуляции получили название векторных.

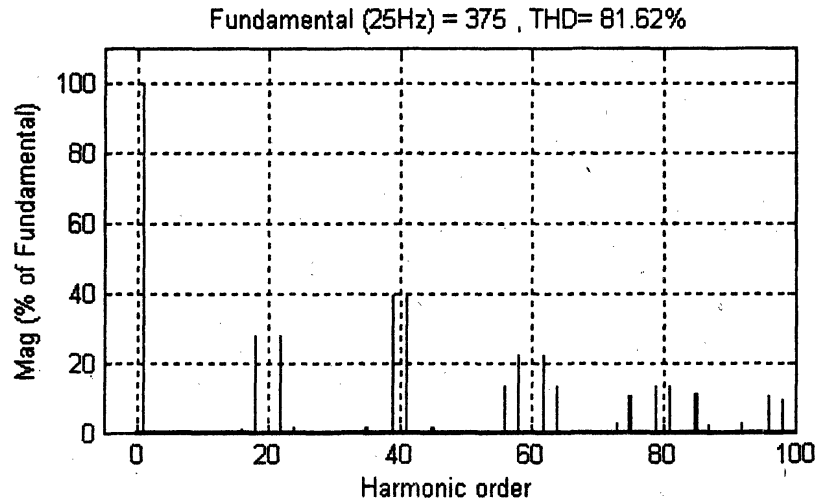


Рис. 5.56. Спектр выходного напряжения трехфазного инвертора с синусоидальной ШИМ на несущей частоте

Прежде чем перейти к описанию векторного способа модуляции, рассмотрим вопрос векторного представления величин в симметричных электрических системах.

*Векторное представление величин в симметричных электрических системах.*

Большинство автономных инверторов в мехатронных системах представляют собой двухфазные и трехфазные симметричные источники энергии. Это позволяет представить такие источники **резльтирующим (обобщенным) пространственным вектором**.

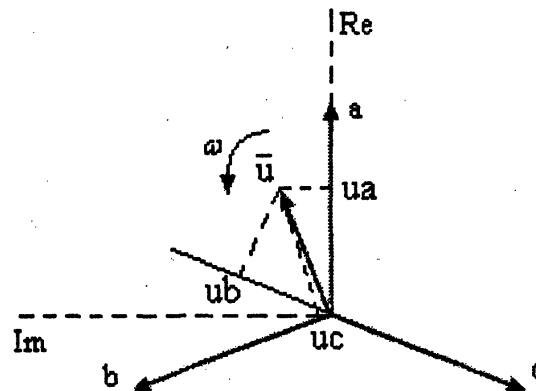


Рис. 5.57. Результирующий вектор трехфазной симметричной системы напряжений

Суть метода результирующего пространственного вектора состоит в том, что мгновенные значения симметричных переменных можно математически преобразовать так, чтобы они были представлены одним пространственным вектором. Рассмотрим этот вопрос для трехфазной симметричной системы синусоидальных напряжений. Можно считать, что такие напряжения имеют место на выходе трехфазного инвертора с синусоидальной ШИМ на несущей частоте.

В системе координат  $a, b, c$  (рис. 5.57) симметричная система фазных напряжений  $u_a, u_b, u_c$  представляет собой проекции вращающегося вектора на оси  $a, b, c$ . Если к системе координат добавить комплексную плоскость с таким расчетом, чтобы ее вещественная ось совпала с осью  $a$ , то результирующий вектор  $\bar{u}$  запишется в виде:

$$\bar{u} = \frac{2}{3}(u_A + \bar{a}u_B + \bar{a}^2u_C), \quad (5.35)$$

где  $\bar{a} = \exp\left(\frac{2\pi}{3}\right)$ ,  $\bar{a}^2 = \exp\left(-\frac{2\pi}{3}\right)$  – векторы, учитывающие пространственное смещение осей  $a, b, c$  координат. При прямом чередовании фаз фазные напряжения выражаются уравнениями

$$u_A = U_m \cos \omega t, u_B = U_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), u_C = U_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

– трехфазная симметричная система напряжений. Подставив в уравнение (5.35) значение мгновенных напряжений, найдем математическое описание результирующего пространственного вектора:

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{2}{3}U_m \left( \cos \omega t + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + e^{-j\frac{2\pi}{3}} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \right) = \\ &= U_m \exp(j\omega t) \end{aligned} \quad (5.36)$$

Из уравнения (5.36) следует, что результирующий пространственный вектор трехфазной симметричной системы синусоидальных напряжений представляет собой вектор амплитуды  $U_m$ , вращающийся в неподвижной комплексной плоскости с угловой скоростью  $\omega$ .

*Векторное представление величин на выходе АИН с алгоритмом управления  $\alpha = 180^\circ$ .*

Напряжение на фазе А для рассматриваемого алгоритма управления при включении нагрузки звездой показано на рис. 5.51. Напряжения на фазах В и С аналогичны, сдвинуты соответственно на  $120^\circ$  и  $240^\circ$ . Приняв за начало отсчета первый интервал и подставив значения напряжений на каждом интервале повторяемости в уравнение (5.35), найдем выражение для результирующего пространственного вектора

$$\bar{u} = \frac{2}{3}U_d \exp\left(j\frac{\pi}{3}(l-1)\right), \quad (5.37)$$

где  $l$  — порядковый номер интервала повторяемости (целые числа 1, 2, 3.....).

Из выражения (5.37) видно, что в данном случае результирующий вектор постоянен на интервале повторяемости и скачкообразно изменяет фазу на  $60^\circ$  при переключении с интервала на интервал. Таким образом, при управлении инвертором с алгоритмом на периоде выходного напряжения укладывается шесть периодов повторяемости, каждому из которых соответствует определенное сочетание включенных транзисторов и положение результирующего вектора (рис. 5.58).

**Векторная модуляция в трехфазном инверторе.**

Сущность векторной модуляции состоит в многократном переключении результирующего вектора между соседними состояниями. Для чего, как это видно из рис. 5.58, необходимо переключать лишь пару транзисторов одного плеча. Транзисторы двух оставшихся плеч на этом интервале не переключаются, что существенно сокращает количество переключений каждого транзистора.

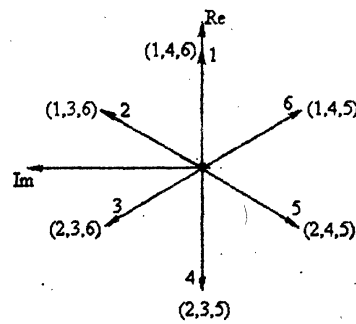


Рис. 5.58 Результирующий вектор напряжения на выходе АИН с алгоритмом управления

$$\alpha = 180^\circ$$

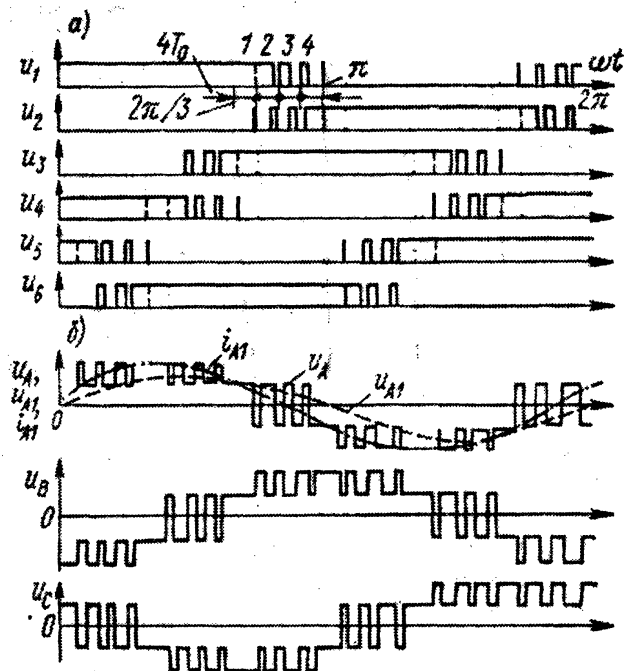


Рис. 5.59. Алгоритмы переключения транзисторов трехфазного инвертора при векторной модуляции

На рис. 5.59 показаны алгоритмы переключения транзисторов трехфазного инвертора при векторной модуляции и фазные напряжения на нагрузке. Для фазы А показаны также первая гармоника напряжения и тока при активно-индуктивной нагрузке.

Из рис. 5.59 видно, что на интервале от 0 до  $2\pi/3$  на базу транзистора VT1 подается постоянный отпирающий сигнал, а на интервале от  $2\pi/3$  до  $\pi$  широтно-импульсный сигнал — 4 импульса, длительность которых линейно убывает. В противофазе транзистору VT1 переключается VT2.

Аналогичные сигналы, но с соответствующими фазовыми сдвигами подаются на управления двумя другими плечами моста. Регулирование напряжения при векторной модуляции может осуществляться при помощи ШИР на несущей частоте. Спектр линейного напряжения на выходе инвертора при рассмотренной выше векторной модуляции показан на рис. 5.60.

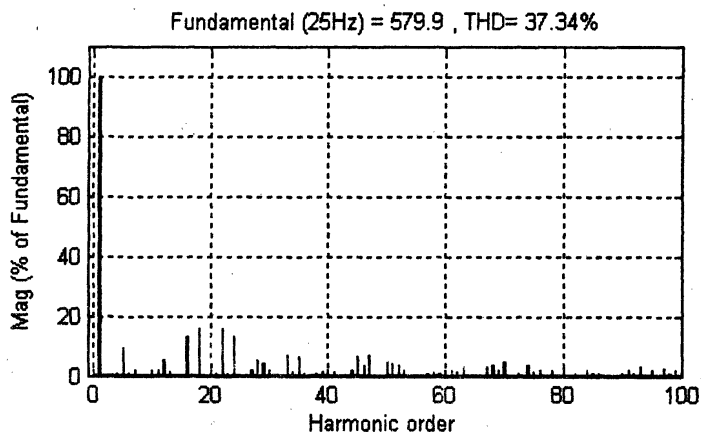


Рис. 5.60. Спектр линейного напряжения на выходе инвертора при векторной модуляции

По сравнению синусоидальной ШИМ (рис. 5.56) в данном случае спектр выходного напряжения несколько более «зашумленный», что практически не сказывается на свойствах инвертора и системы, в которой используется этот инвертор.

#### 5.9.4. Многоуровневые инверторы

В последние годы разработано значительное количество схем, позволяющих решить две основные задачи преобразовательной техники:

- улучшить гармонический состав выходного напряжения;
- увеличить максимальное выходное напряжение.

К наиболее интересным схемотехническим решениям можно отнести многоуровневые автономные инверторы.

Идею построения и управления многоуровневым инвертором рассмотрим на примере одного плеча трехфазного инвертора, изображенного на рис. 5.61.

Такой инвертор запитывается от источника со средней точкой. Роль делителя

напряжения обычно выполняют электролитические конденсаторы. Одно плечо инвертора содержит четыре последовательно включенных транзистора с обратными диодами. Схема дополняется двумя фиксирующими диодами (Clamped diode CD1, CD2). Способ управления транзисторами инвертора поясняет рис. 5.61.

Схема управления строится аналогично рассмотренной ранее схеме управления мостовым ШИП с поочередным алгоритмом управления.

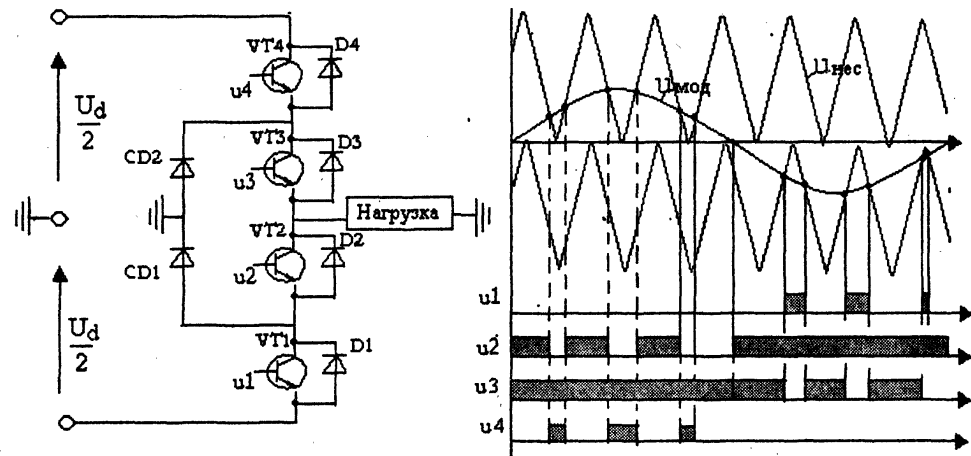


Рис. 5.61. Выходное напряжение трехуровневого инвертора

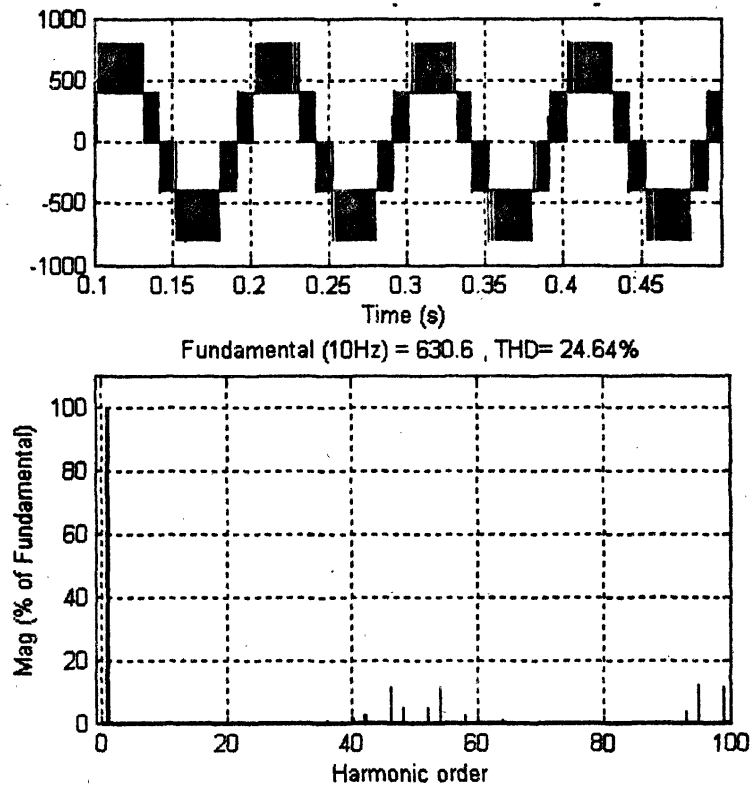


Рис.5.62. Одноплечевой трехуровневый инвертор

При положительной полуволне модулирующего напряжения транзистор VT3 включен, транзистор VT1 выключен, а транзисторы VT2, VT4 переключаются в моменты равенства модулирующего (синусоидального) и пилообразного напряжения несущей частоты. При отрицательной полуволне модулирующего напряжения переключаются транзисторы VT1, VT3, транзистор VT2 включен, а транзистор VT4 выключен. Аналогично, но со сдвигом модулирующего напряжения на  $120^\circ$ , управляются два других плеча трехфазного инвертора. Линейное выходное напряжение трехфазного инвертора и его спектр при  $f_{нес} 500 Гц.$ ,  $f_{мод} = 10 Гц.$ ,  $m = 0,9$  показаны на рис. 5.62. Такой инвертор называется трехуровневым.

Модель трехфазного трехуровневого инвертора находится в файле *A1N\_3f\_3Level*.

### 5.10. Основные характеристики инверторов

К основным характеристикам инвертора относятся:

1. Регулировочная характеристика, представляющая собой зависимость выходного напряжения инвертора от напряжения управления (коэффициента модуляции).
2. Внешняя (нагрузочная) характеристика инвертора, представляющая собой зависимость напряжения на нагрузке от тока нагрузки.
3. Спектральные характеристики напряжения и тока в цепи переменного тока.
4. Энергетические характеристики, представляющие собой зависимости мощности на входе и выходе от тока нагрузки,
5. Электромагнитные характеристики-зависимости токов в цепи питания и токов в полупроводниковых элементах от тока нагрузки.

Исходными параметрами при анализе и расчете являются амплитуда первой гармоники выходного напряжения  $U_m(1)$ , частота этой гармоники и параметры нагрузки  $R_H$ ,  $L_H$ .

Параметры нагрузки обычно задаются безразмерными величинами:  
 - коэффициентом мощности

$$\cos \varphi_H = \frac{R_H}{\sqrt{R_H^2 + (\omega_1 L_H)^2}} \quad (5.38)$$

- либо относительной постоянной времени

$$\tau_H = \frac{\omega_1 L_H}{R_H}. \quad (5.39)$$

При введенных параметрах амплитуда первой гармоники тока в нагрузке инвертора определяется из уравнения

$$I_m(1) = \frac{U_m(1)}{\sqrt{R_H^2 + (\omega_1 L_H)^2}} = \frac{U_m(1)}{R_H} \cos \varphi_H. \quad (5.40)$$

Относительные средние и действующие токи в полупроводниковых элементах инвертора, а также относительный средний ток в источнике постоянного тока определяются по выражениям, представленным в таблице 5.2.

$\bar{I}_{T.cp} = \frac{I_{T.cp}}{I_m(1)}$	$\bar{I}_T = \frac{I_T}{I_m(1)}$	$\bar{I}_{D.cp} = \frac{I_{D.cp}}{I_m(1)}$	$\bar{I}_D = \frac{I_D}{I_m(1)}$	$\bar{I}_{cp} = \frac{I_{cp}}{I_m(1)}$
$\frac{1 + \cos \varphi_H}{2\pi}$	$\sqrt{\frac{\pi - \varphi_H + 0.5 \sin \varphi_H}{2\pi}}$	$\frac{1 - \cos \varphi_H}{2\pi}$	$\sqrt{\frac{\varphi_H + 0.5 \sin \varphi_H}{2\pi}}$	$\frac{\cos \varphi_H}{\pi}$

Таблица 5.2

### Динамические характеристики АИ.

Как звено системы регулирования, автономный инвертор, аналогично ШИП, описывается апериодическим звеном

$$W(s) = \frac{K}{T_0 s + 1}, \quad (5.41)$$

где  $T_0$  — период несущего сигнала (частота ГПН),  $K$  — коэффициент передачи, определяемый по регулировочной характеристике. Функциональная модель инвертора строится аналогично функциональной модели ШИП с той лишь разницей, что на вход подается переменный модулирующий сигнал.

### 5.11. Моделирование трехфазного инвертора

Модель трехфазного инвертора с синусоидальной ШИМ показана на рис. 5.63 (файл *A1N\_3f*).

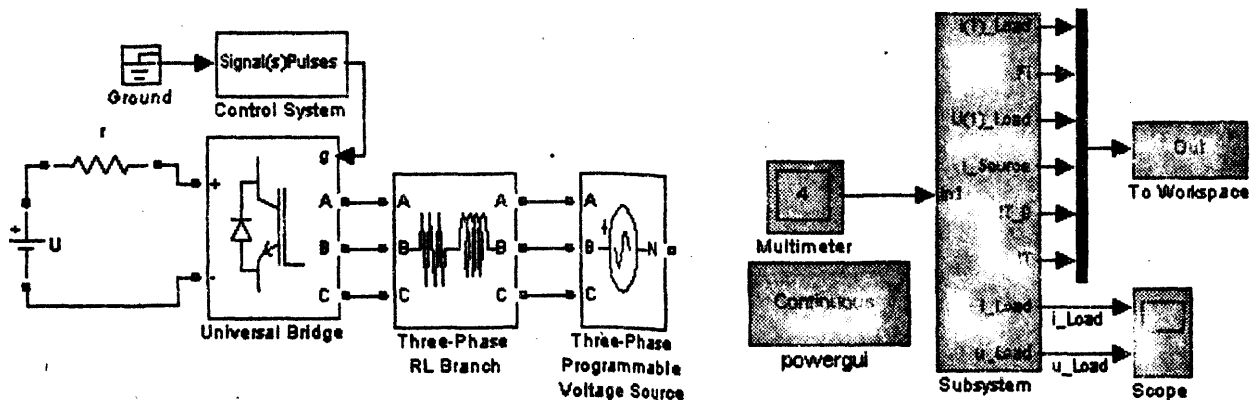


Рис. 5.63. Модель трехфазного инвертора с синусоидальной ШИМ

Параметры модели:

Напряжение питания  $U=540$  В, инвертор (Universal Bridge) — трехфазный мост на IGBT транзисторах, частота модулирующего напряжения — 25 Гц, коэффициент модуляции  $m=0,9$ , параметры нагрузки —  $L=0,1$  Гн,  $R=10$  Ом, время моделирования — 0,5 с, шаг моделирования — 0,1 мс.

Программируемый источник, окно настройки которого показано на рис. 5.64, предназначен для изменения нагрузки инвертора в течение моделирования.

Измерительная часть модели содержит 5 блоков. Блоком Multimeter измеряются мгновенные значения тока нагрузки, напряжения нагрузки, тока в цепи питания и тока в полупроводниковом ключе инвертора. Блок Powergui служит

для спектрального анализа мгновенного тока и напряжения нагрузки, зафиксированных блоком Scope. Блок To Workspace служит для записи в рабочее пространство Matlab величин, измеренных блоком Subsystem. Содержание блока Subsystem представлено на рис. 5.65.

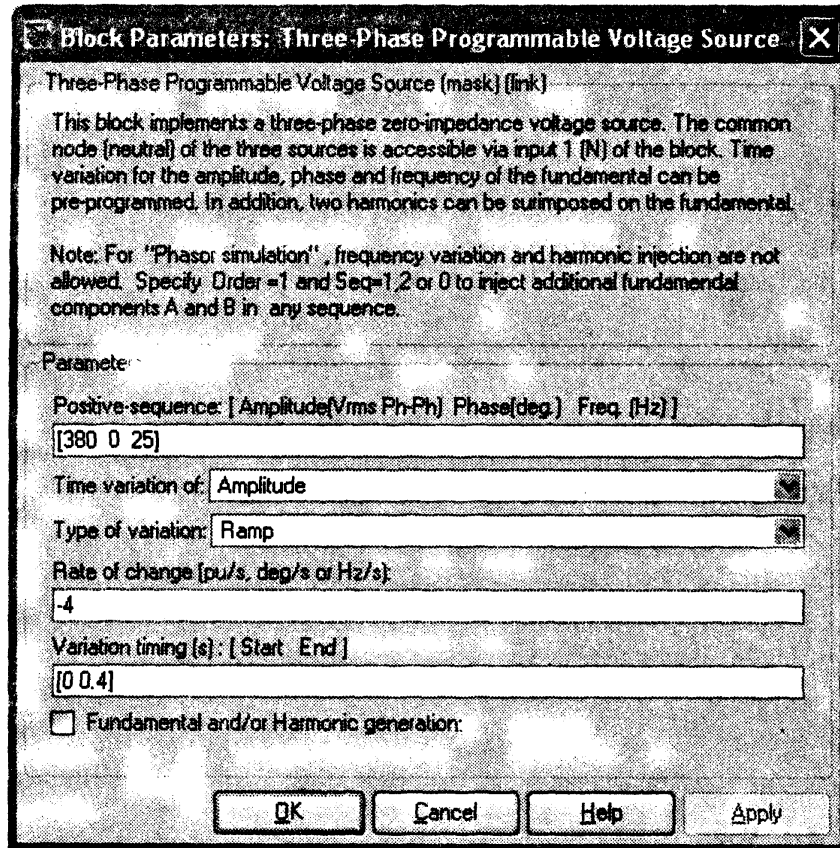


Рис. 5.64. Программируемый источник в нагрузке АИН

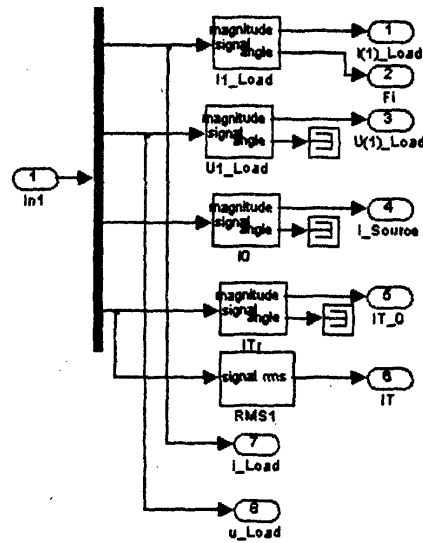


Рис. 5.65. Измерительная часть модели

**Листинг 5.2.**

```

I1Load=Out(:,1);
Fi=Out(:,2);
U1Load=Out(:,3);
ISource=Out(:,4);
IT0=Out(:,5);
IT=Out(:,6);
S11=(1.73*U1Load.*I1Load)/2;
P11=S11.*cos(Fi*pi/180);
Q11=S11.*sin(-Fi*pi/180);
subplot(3,1,1);
plot(I1Load,U1Load);
grid on;
ylabel("U Load (V)");
subplot(3,1,2);
plot(I1Load,ISource,I1Load,
IT0,I1Load,IT);
grid on;
ylabel("I Source,IT0,IT (A)");
subplot(3,1,3);
plot(I1Load,S11,I1Load,P11);
grid on;
xlabel("Load current (A)");
ylabel("S1 (VA), P1 (Wt)");
    
```

В этом блоке последовательно измеряются:

- амплитуда первой гармоники тока нагрузки;
- фаза первой гармоники тока нагрузки;
- амплитуда первой гармоники напряжения нагрузки;

- средний ток питания инвертора;
- средний и эффективный токи в полупроводниковом ключе инвертора;

- мгновенные ток и напряжение нагрузки.

Для построения основных характеристик служит программа, представленная в листинге 5.2. Эти характеристики показаны на рис. 5.66.

Линейное напряжение на выходе инвертора и его спектр представлены на рис. 5.67. Ток на выходе инвертора и его спектр видны из рис. 5.68.

В настоящее время автономные инверторы все чаще используются в системах электропитания в качестве активных выпрямителей, активных фильтров, компенсаторов реактивной мощности и т. д. Во всех этих устройствах инвертор с одной стороны присоединен к источнику переменного напряжения, а с другой — к источнику постоянного напряжения.

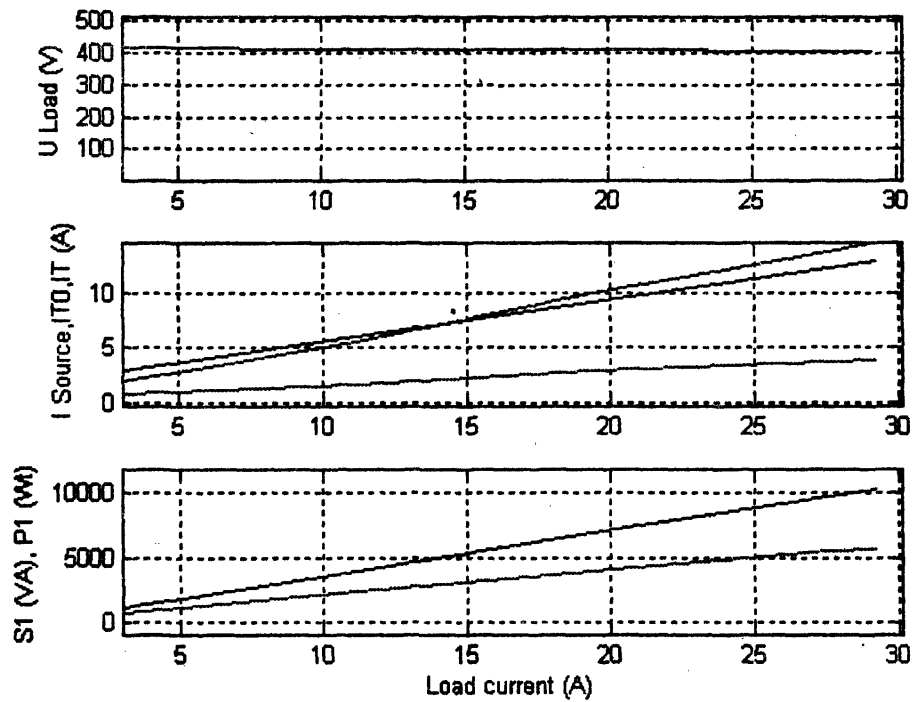


Рис. 5.66. Основные характеристики инвертора

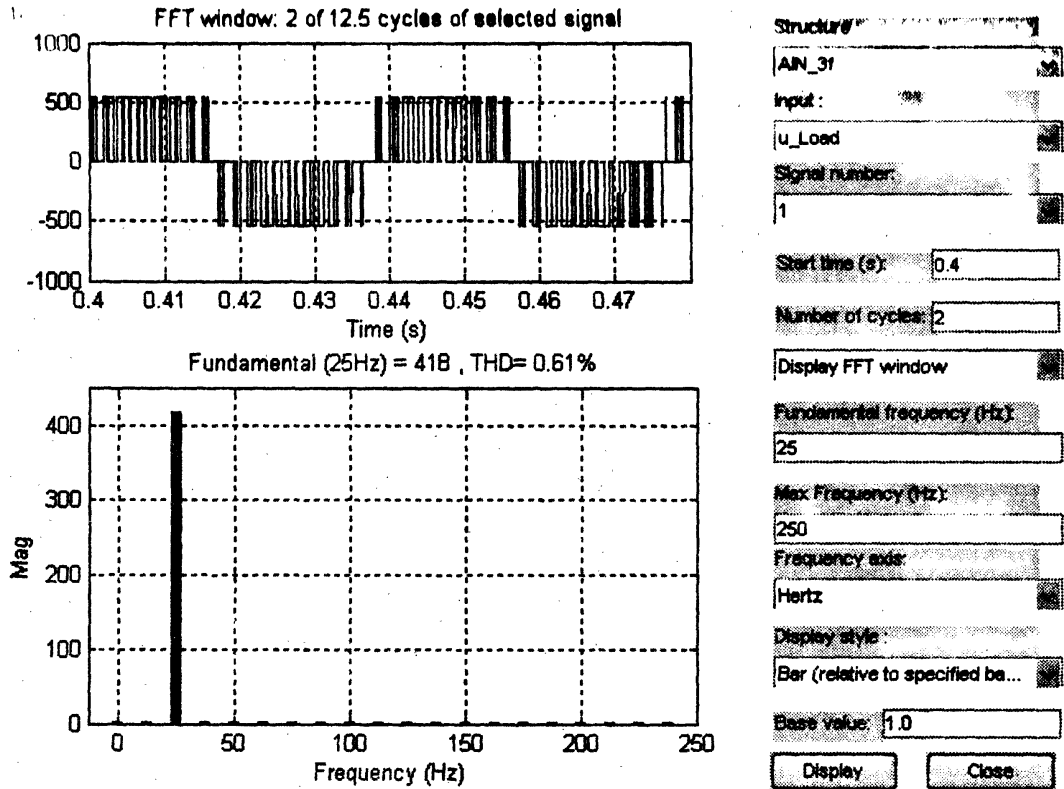


Рис. 5.67. Спектр выходного напряжения инвертора

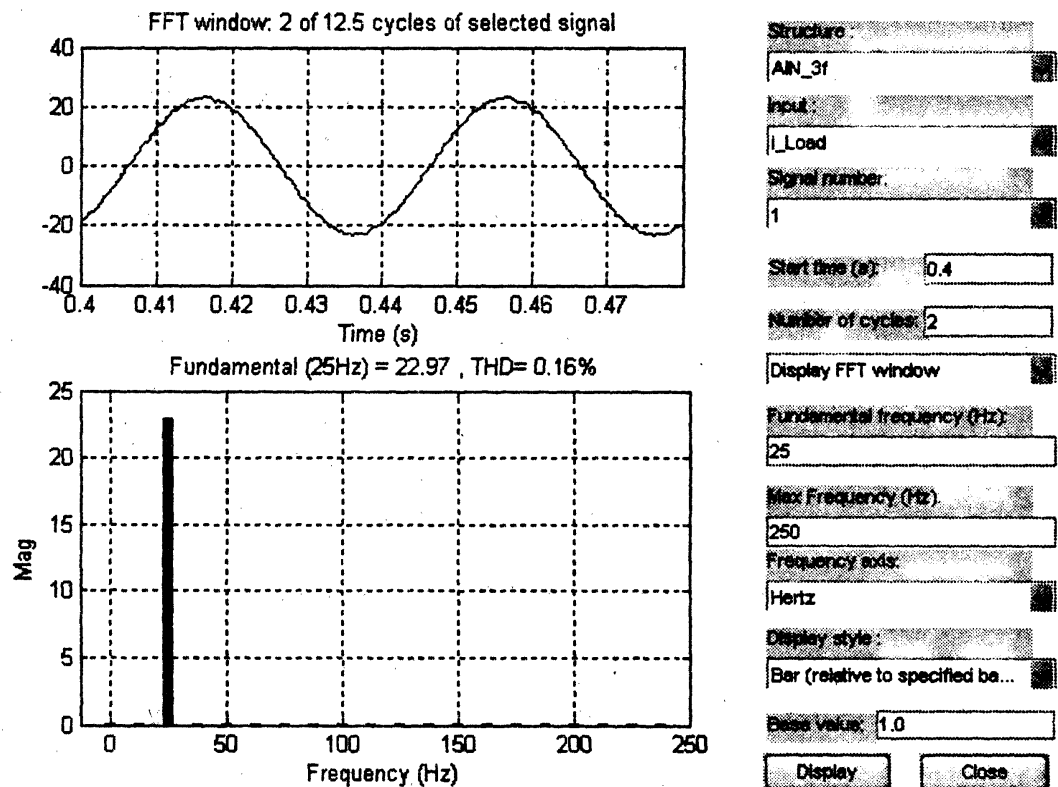


Рис. 5.68. Спектр тока на выходе инвертора

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.2.8. МОДЕЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВТОРИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ДЛЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

### **ВОПРОСЫ**

1. Расчетная схема мехатронной подсистемы "сеть-вторичный источник питания-силовой полупроводниковый преобразователь-электрическая машина".
2. Выпрямитель с фильтром в качестве ВИП.
3. Выпрямитель с целью сброса энергии в качестве ВИП.
4. Выпрямитель в широтно-импульсным стабилизатором в качестве ВИП.
5. Сетевой трехфазный инвертор (активный выпрямитель) с синусоидальной ШИМ в качестве ВИП.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### **1. Расчетная схема мехатронной подсистемы "сеть-вторичный источник питания-силовой полупроводниковый преобразователь-электрическая машина"**

В значительном количестве применений первичным источником питания мехатронных систем является сеть переменного тока. В этом случае широтно-импульсные преобразователи и автономные инверторы запитываются от вторичных источников питания (ВИП). К этим ВИП, кроме обычных требований, предъявляются специфические требования, которые обусловлены необходимостью управлять запасенной (иногда генерируемой) механической системой кинетической или потенциальной энергией.

Описанные в данной главе реверсивные управляемые выпрямители обеспечивают обмен энергией между исполнительной машиной постоянного тока и сетью переменного тока, эти преобразователи не требуют дополнительных вторичных источников питания.

Полупроводниковые преобразователи со звеном постоянного тока (ШИП, АИ) с рассмотренными алгоритмами управления обладают способностью передавать энергию как от источника постоянного тока к исполнительной машине, так и от машины к источнику, т. е. такие преобразователи обладают двухсторонней управляемой энергетической связью. Таким свойством без специально принятых мер не обладает вторичный источник питания.

Поэтому необходимо оценить количество энергии, которое будет генерироваться мехатронной системой в установившихся и переходных режимах работы и на этой базе осуществить проектирование ВИП.

С этой целью рассмотрим различные варианты ВИП и оценим их свойства рассеивать или рекуперировать энергию, накопленную во вращающихся или перемещающихся механических частях.

Вторичный источник питания, как правило, включен между сетью переменного тока и СПП. В системах постоянного тока роль СПП обычно выполняет широтно-импульсный преобразователь (ШИП), в системах переменного тока – автономный инвертор (АИ). Как в первом, так и во втором случае ВИП выполняет функцию выпрямителя, к которому, кроме обычных требований, предъявляются специфические требования, обусловленные необходимостью управлять запасенной (иногда генерируемой) механической системой кинетической или потенциальной энергией.

Расчетная схема подсистемы, включающая вторичный источник питания и силовой преобразователь с электрической машиной, представлена на рис.5.69. В этой схеме силовой преобразователь вместе с машиной заменен пассивной  $R$ ,  $L$  нагрузкой и управляемым источником эдс  $E$ .

Такая замена справедлива и для систем постоянного тока с ШИП, и для систем переменного тока с АИ. На выходе ВИП всегда включается конденсатор фильтра.

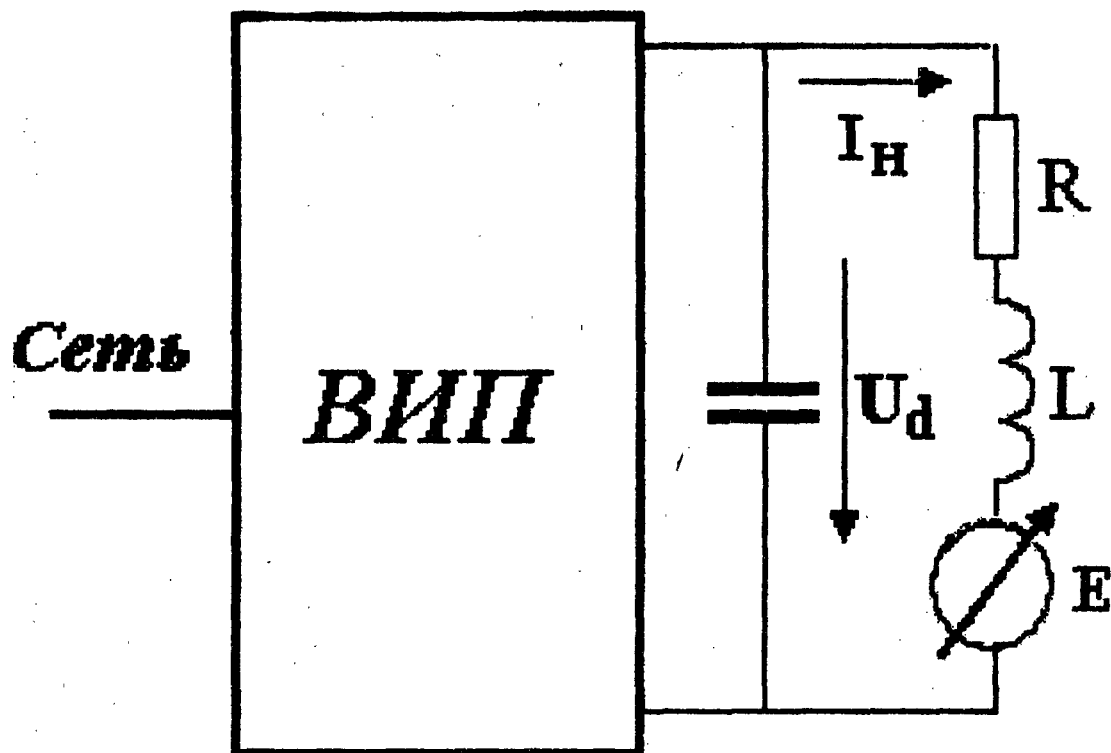


Рис. 5.69. Расчетная схема для ВВП

Дальнейший анализ осуществляется при условии, что переходные электромагнитные процессы в эквивалентной  $R, L$  нагрузке протекают значительно быстрее, чем переходные механические процессы в электроприводе. В этом случае при анализе ток нагрузки можно принять равным:

$$I_H = \frac{U_d - E(t)}{R},$$

где  $E(t)$  – противоэдс исполнительная машина, приведенная к цепи питания преобразователя.

Если электрическая машина, включенная на выходе преобразователя, работает в двигательном режиме, то напряжение  $U_d$  на конденсаторе фильтра превышает противоэдс  $E$  и ток в нагрузке положительный, а энергия направлена от сети к машине. Если электрическая машина, включенная на выходе преобразователя, работает в генераторном режиме, то противоэдс  $E$  превышает напряжение  $U_d$  на конденсаторе фильтра, ток в нагрузке отрицательный, а энергия направлена от машины. В этом случае ВИП должен создавать пути для протекания отрицательного тока нагрузки во избежание нарастания напряжения на конденсаторе выше допустимого.

Ниже рассмотрены различные варианты ВИП с оценкой их свойств рассеивать или рекуперировать энергию, накопленную во вращающихся или перемещающихся механических частях мехатронной системы. При этом исследуются характеристики ВИП, позволяющие оценить эти свойства. К таким характеристикам отнесены:

- Нагрузочная (внешняя) характеристика ВИП, показывающая влияние тока в нагрузке на выходное напряжение ВИП.
- Энергетические характеристики, позволяющие оценить мощность на входе и выходе ВИП от тока нагрузки.
- Электромагнитные характеристики, представляющие зависимости тока на входе и в полупроводниковых элементах ВИП от тока нагрузки.

### 5.12.2. Выпрямитель с фильтром в качестве ВИП.

Выпрямитель не создает пути протекания отрицательного тока и потому обладает только односторонней энергетической связью. Отрицательный ток в нагрузке заряжает конденсатор фильтра до напряжения, превышающее амплитудное напряжение питания. Потому установившийся генераторный режим электрической машины такой ВИП не обеспечивает. В переходных режимах превышение напряжения на конденсаторе фильтра над амплитудой питания можно оценить по приближенной формуле

$$\Delta U_d = \sqrt{\frac{J \Delta \omega^2}{C_\phi}}, \quad (5.43)$$

где  $J$  ( $\text{Кгм}_2$ ) – момент инерции машины и приведенной нагрузки,  $\Delta \omega$  ( $1/\text{с}$ ) – разница начальной и конечной скорости при торможении.

*Модельное исследование выпрямителя с фильтром в качестве ВИП.*

Модель выпрямителя с фильтром, предназначенная для снятия характеристик ВИП, представлена на рис.5.70 (файл *Wyp\_3f*).

Модель содержит трехфазный источник питания (Three-Phase Source), трехфазный выпрямитель (Universal Bridge), емкостной фильтр (Cf), нагрузку (L,R,E0) блок задания противо эдс в нагрузке (Repeating Sequence), блоки измерения напряжений и токов на входе и выходе ВИП (V1, I1,V2, I2). Для наблюдения мгновенных токов на входе и выходе, а также напряжения на выходе схемы, служит блок Scope. Для записи значений измеренных величин в рабочее пространство служит блк To Workspace. Измерение тока в диоде выпрямителя осуществляется блоком Multimeter. Блоки Goto и From предназначены для передачи соответствующих сигналов в пределах модели.

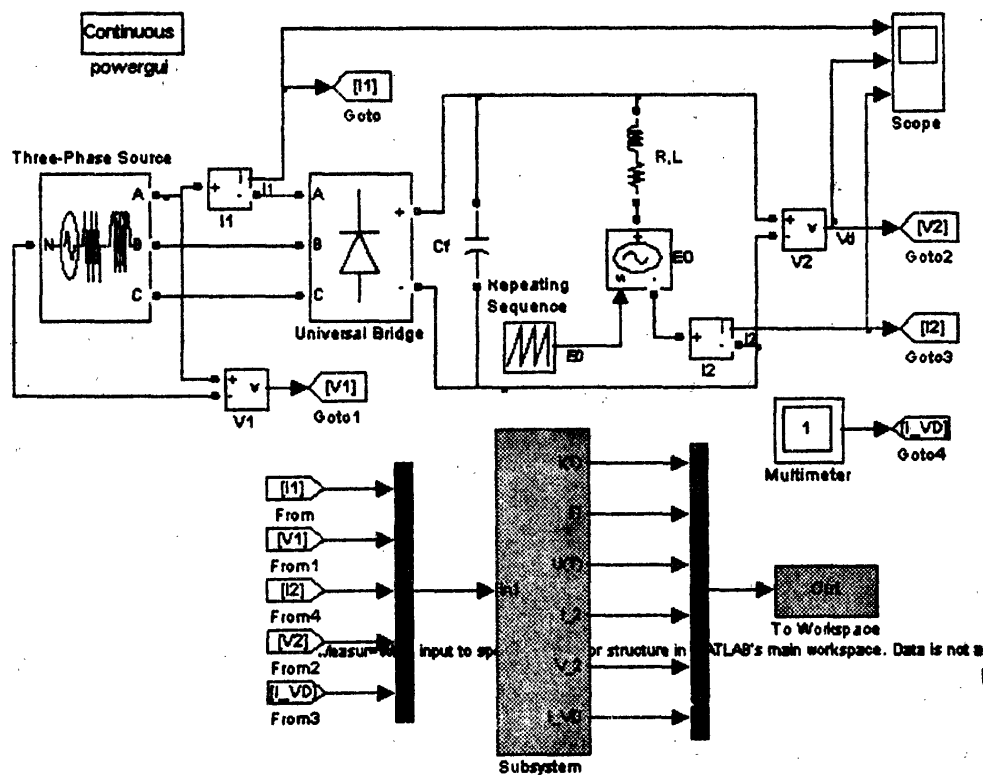


Рис. 5.70. Модель для исследования ВИП на выпрямителе

Реализация управляемой противо эдс в нагрузке осуществляется двумя блока-ми. Источником управляемого напряжения (Control Voltage Source), обозначен-ного в модели через E0 и настраиваемым генератором Repeating Sequence, окна настройки которых показаны на рис.5.71.

В полях окна блока Control Voltage Source задаются: Initialize[Инициализация]. При установке флажка выполняется инициализация источника с заданными на-чальными параметрами.

Source type – тип источника указывается, если требуется инициализация ис-точника. Если инициализация источника не задана, то параметр недоступен. Значение параметра выбирается из списка:

- AC – источник переменного напряжения,
- DC – источник постоянного напряжения .

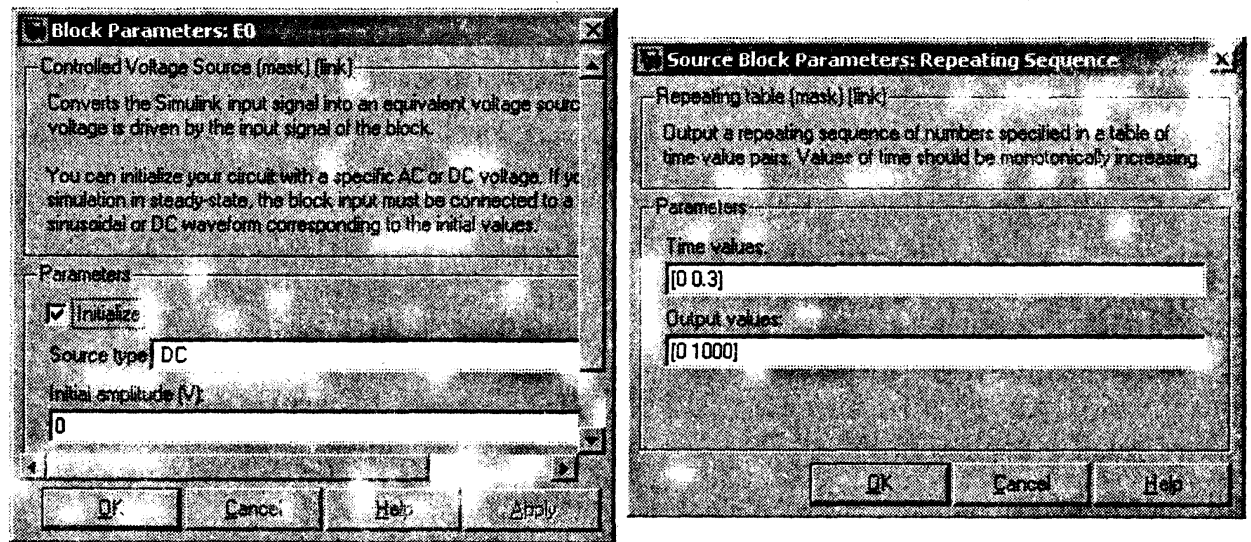


Рис. 5.71. Окна настройки параметров управляемых источников

• Initial amplitude – начальное значение выходного напряжения источника. Measurements – измеряемые переменные. Параметр позволяет выбрать, переда-ваемые в блок Multimeter, переменные.

В полях окна параметров генератора Repeating Sequence задаются:

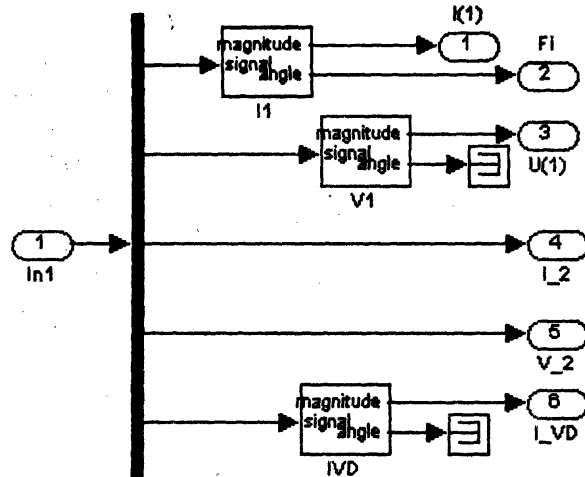
- Time values – начальное и конечное время изменения сигнала;
- Output values – начальное и конечное значение сигнала.

Конечное время изменения сигнала задается равным времени симуляции. Скорость изменения сигнала выбирается такой, при которой электромагнитные процессы в нагрузке можно не учитывать.

Модель (рис.5.72) измерительной части (Subsystem) содержит:

- блок для измерения амплитуды и фазы первой гармоники тока питания ( I1);
- блок для измерения амплитуды первой гармоники напряжения питания (V1);
- блок для измерения постоянной составляющей тока диода выпрямителя (IVD).

Все перечисленные блоки осуществляют Фурье разложение входного сигнала. В полях окна параметров блоков задаются частота и номер измеряемой гармоники.



Внешняя, энергетические и электромагнитные характеристики рассмотренного ВИП рассчитываются MATLAB – программой, представленной в листинге 5.3. Эти характеристики показаны на рис.5.73. Из этих характеристик следует, что до тока в нагрузке -2 А энергия, поступающая из нагрузки, рассеивается на элементах ВИП и в нагрузке. При токе в нагрузке <-2 А энергия, поступающая из нагрузки, частично накапливается в конденсаторе фильтра ВИП. Напряжение на конденсаторе возрастает до бесконечности уже при токе нагрузки

Рис. 5.71. Измерительная часть модели ВИП <-3.5 А. на выпрямителе

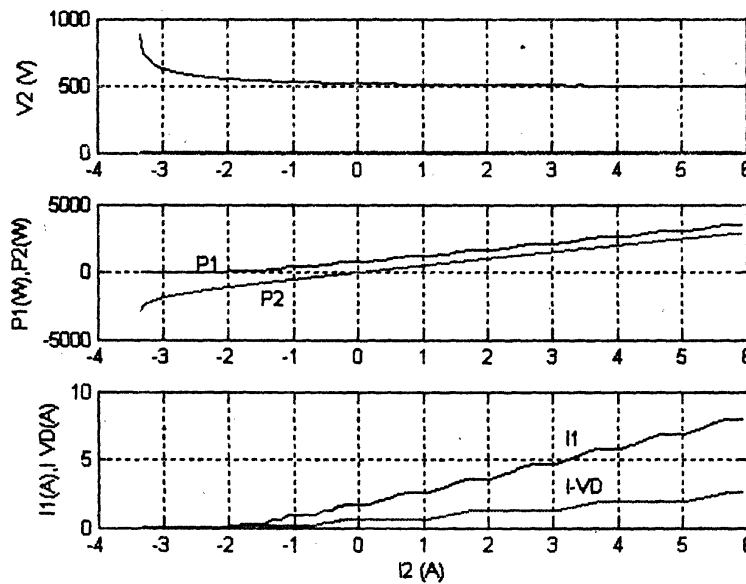


Рис. 5.73. Характеристика ВИП на выпрямителе

```

Листинг 5.3
I1=Out(:,1);
Fi=Out(:,2);
V1=Out(:,3);
I2=Out(:,4);
V2=Out(:,5);
I_VD=Out(:,6);
S11=(1.5*V1.*I1);
P11=S11.*cos(Fi*pi/180);
P2=V2.*I2;
subplot(3,1,1);
plot(I2,V2,I2,0);grid on;
ylabel("V2 (V)");
subplot(3,1,2);
plot(I2,P11,I2,P2);grid on;
ylabel("P1(W),P2(W)");
text(-2.5,500,'P1');
text(-1.5,-2000,'P2');
subplot(3,1,3);
plot(I2,I1,I2,I_VD);grid on;
xlabel("I2 (A)");
ylabel("I1(A),I_VD(A)");
text(3.2,3,'I-VD');
text(3.2,6.5,'I1');
    
```

### 5.12.3. Выпрямитель с цепью сброса энергии в качестве ВИП

Схема ВИП с выпрямителем и цепью сброса энергии показана на рис.5.74

В этой схеме транзисторный ключ  $VT_0$  совместно с сопротивлением  $R_0$  образуют цепь сброса энергии, накопленной во вращающейся части системы. Транзистор включен в замкнутую систему регулирования, на вход которой подается напряжение задания ( $U_0^*$ ) и напряжение обратной связи ( $U_0$ ) с конденсатора фильтра. При этом напряжение задания равно амплитуде линейного напряжения сети. Цепь сброса энергии включается в работу, когда напряжение на конденсаторе достигнет значения амплитуды линейного напряжения сети.

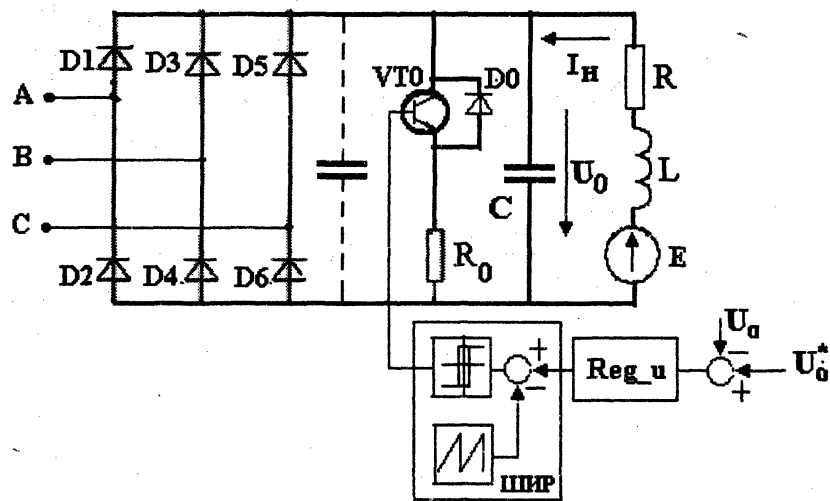


Рис. 5.74. Схема ВИП с выпрямителем и цепью сброса энергии

В схеме на периоде коммутации генератора пилообразного напряжения ( $T_0$ ) образуются два коммутационных интервала, схемы замещения на которых представлены на рис.5.75.

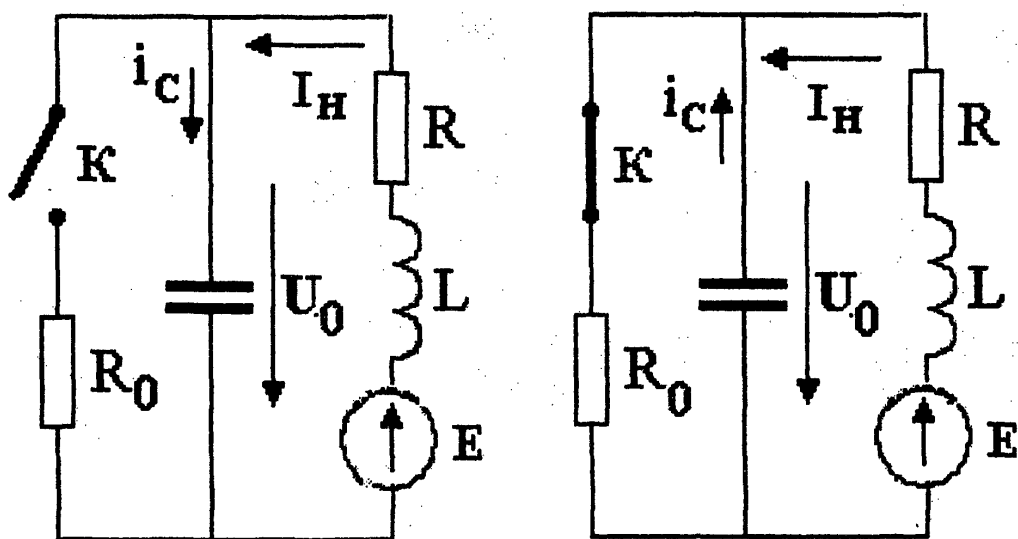


Рис. 5.75. Расчетные схемы замещения ВИП с цепью сброса энергии

Анализ схемы осуществляется при следующих допущениях:

- Ток нагрузки на периоде коммутации постоянен и определяется из уравнения (5.42);
- Напряжение на конденсаторе на периоде коммутации постоянно;
- Средний ток в конденсаторе на периоде коммутации равен нулю.

Обозначив длительность первого интервала как  $\gamma$ , с учетом отмеченных допущений, получим:

$$\begin{aligned}
 i_c &= \gamma I_H, \quad \text{при} \quad (n-1)T_0 < t < n\gamma T_0, \\
 i_c &= (1-\gamma) \left( \frac{U_0}{R_0} - I_H \right), \quad \text{при} \quad n\gamma T_0 < t < nT_0,
 \end{aligned} \quad (5.44)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $\gamma T_0$  - период коммутации генератора пилообразного напряжения,  $0 < \gamma < 1$  - относительная длительность первого интервала.

Откуда можно найти значение напряжения на конденсаторе

$$U_0 = \frac{R_0 I_H}{1-\gamma} \quad (5.45)$$

и требуемую регулировочную характеристику схемы

$$\gamma = 1 - \frac{R_0 I_H}{U_d} \quad (5.46)$$

где  $U_d = \sqrt{3}U_m$ ,  $U_m$  - амплитуда фазного напряжения питающей сети.

Из последнего выражения следует, что цепь сброса обеспечивает ограничение

напряжения до тех пор, пока  $I_H \leq \frac{U_d}{R_0}$ , откуда при известном токе можно определить величину гасящего сопротивления.

Стабилизацию напряжения можно обеспечить применением релейного регулятора в схеме управления. В этом случае отпадает надобность в генераторе пилообразного напряжения и регуляторе Reg<sub>u</sub> (рис.5.74).

*Модельное исследование выпрямителя с цепью сброса энергии качестве ВИП.*

Модель ВИП с релейным регулятором в цепи сброса энергии показана на рис.5.76 (файл *VIP\_1.mdl*).

```

Листинг 5.4
I1=Out1(:,1);
Fi=Out1(:,2);
V1=Out1(:,3);
I2=Out1(:,4);
V2=Out1(:,5);
I_VT0=Out1(:,6);
I_VD0=Out1(:,7);
S11=(1.5*V1.*I1);
P11=S11.*cos(Fi*pi/180);
P2=V2.*I2;
subplot(3,1,1);
plot(I2,V2,I2,0);grid on;
ylabel("V2 (V)");
subplot(3,1,2);
plot(I2,P11,I2,P2);grid on;
ylabel("P1(W),P2(W)");
text(-12,1000,'P1');
text(-7,-2000,'P2');
subplot(3,1,3);
plot(I2,I1,I2,I_VT0,I2,I_VD0);
grid on;
xlabel("I2 (A)");
ylabel("I1(A),I_VT0(A),I_VD0");
text(-12,12,'I-VT0');
text(6,12,'I1');
text(6,5,'I-VD0');
    
```

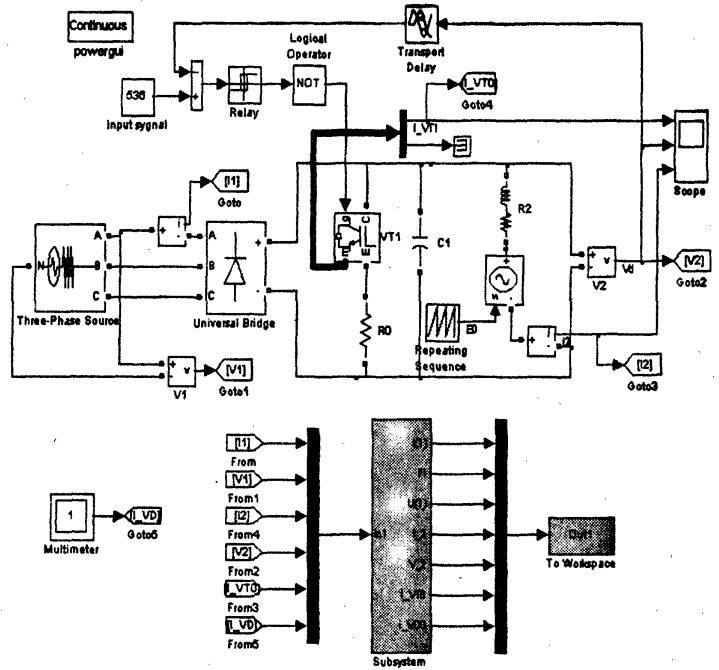


Рис. 5.76. Модель ВИП с цепью сброса энергии

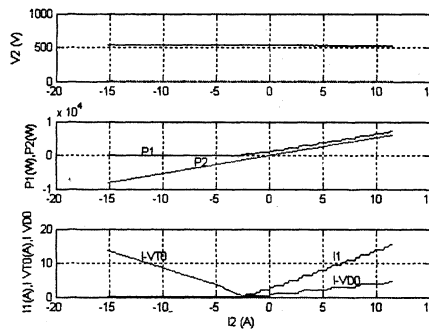


Рис. 5.77. Характеристики ВИП с цепью сброса

По сравнению с предыдущей моделью (рис.5.70) здесь добавлен транзистор сброса энергии (VT1), который управляется от релейного регулятора. На вход последнего подается базовый сигнал, равный амплитудному значению напряжения сети, и сигнал обратной связи с конденсатора фильтра. В блоке Subsystem включен дополнительный блок Фурье разложения для определения среднего тока в транзисторе (I-VT0).

Внешняя, энергетические и электромагнитные характеристики рассмотренного ВИП рассчитываются MALAB – программой, представленной в листинге 5.4. Эти характеристики показаны на рис. 5.77. Из этих характеристик следует, что напряжение на конденсаторе фильтра остается неизменным при отрицательных токах.

При токе в нагрузке  $< -2$  А энергия, поступающая из нагрузки, рассеивается в сопротивлении  $R_0$ , при этом токе из сети энергия перестает поступать.

#### 5.12.4. Выпрямитель с широтно-импульсным стабилизатором в качестве ВИП.

Схема ВИП с широтно-импульсным стабилизатором показана на рис.5.78.

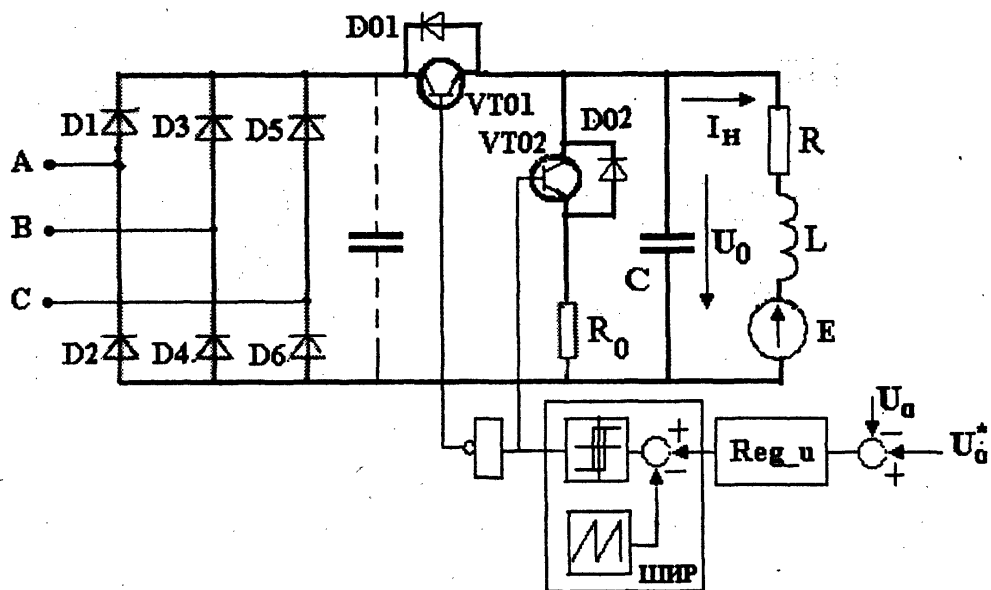


Рис. 5.78. ВИП с широтно-импульсным стабилизатором

В этой схеме транзисторные ключи VT01 и VT02 включаются в противофазе. Транзисторный ключ VT01 обеспечивает подзаряд конденсатора от выпрямителя. Транзисторный ключ VT02 совместно с сопротивлением  $R_0$  образуют цепь сброса энергии, накопленной во вращающейся части системы. Стабилизатор включен в замкнутую систему регулирования, на вход которой подается напряжение задания ( $U_0^*$ ) и напряжение обратной связи ( $U_0$ ) с конденсатора фильтра. В этой схеме напряжение  $U_0^*$  может быть задано меньше линейного амплитудного напряжения сети.

В этой схеме, также как и в предыдущей, на периоде выходной частоты генератора пилообразного напряжения образуется два коммутационных интервала. Расчетные схемы на этих интервалах показаны на рис.5.79.

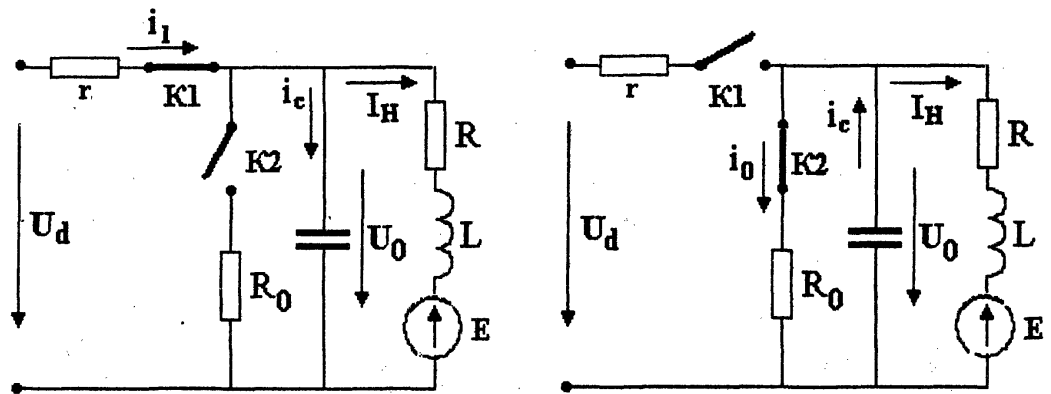


Рис. 5.79. Расчетные схемы замещения ВИП с широтно-импульсным стабилизатором

При учете выше принятых допущений напряжение на выходе стабилизатора находится из уравнения

$$\frac{U_0}{U_d} = \frac{\gamma \mp \frac{r I_H}{U_d}}{\gamma + \frac{r}{R_0} (1 - \gamma)} \quad (5.47)$$

В уравнении (5.47) знак минус соответствует двигательному режиму работы исполнительных машин, когда энергия передается от сети к машине, знак плюс соответствует генераторному режиму работы исполнительных машин, когда энергия рассеивается в сопротивлениях  $R_0$  и  $R$ .

Для управления стабилизатором может быть использован линейный и релейный (с гистерезисом) регулятор напряжения.

*Модельное исследование выпрямителя с ВИП с широтно-импульсным стабилизатором.*

Модель ВИП с широтно-импульсным стабилизатором и релейным регулятором напряжения представлена на рис.5.80 (файл *VIP\_2.mdl*).

Содержание блока Subsystem показано на рис.5.81.

В этом блоке последовательно измеряются:

- амплитуда первой гармоники тока сети  $I(1)$ ;
- фаза первой гармоники тока сети  $\varphi_i$ ;
- амплитуда первой гармоники напряжения фазы сети  $U_1$ ;
- средний ток в нагрузке  $I_{2}$ ;
- среднее напряжение на нагрузке  $V_{2}$ ;
- средний ток в полупроводниковом ключе VT1 ( $I_{VT1}$ );
- средний ток в полупроводниковом ключе VT2 ( $I_{VT2}$ );
- средний ток в полупроводниковом выпрямительного моста ( $I_{VD0}$ ).

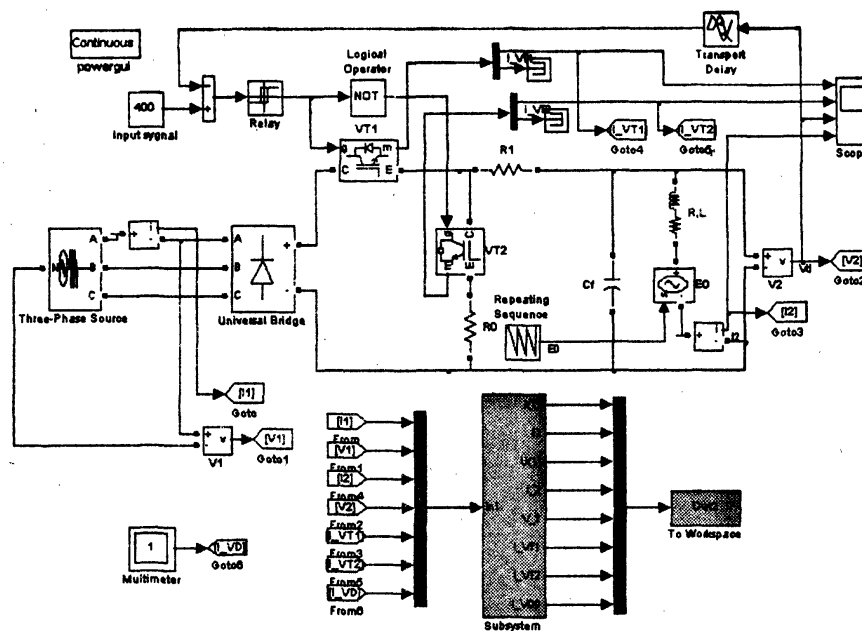


Рис. 5.80. Модель ВИП с широтно-импульсным стабилизатором и релейным регулятором

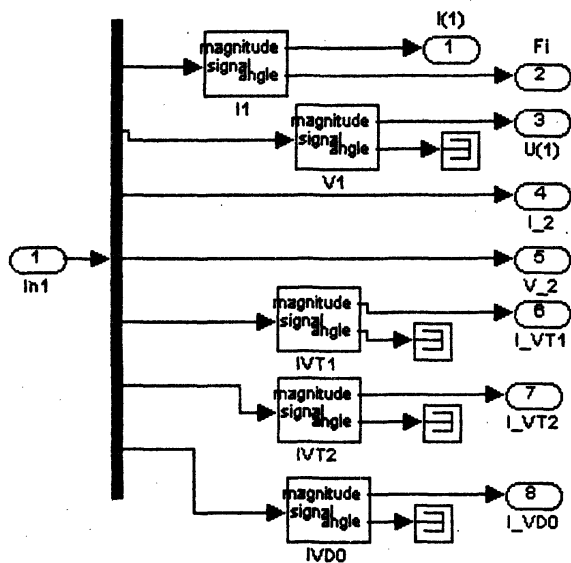


Рис. 5.81. Блок Subsystem модели ВИП с широтно-импульсным стабилизатором

**Листинг 5.5**

```

I1=Out2(:,1);
Fi=Out2(:,2);
V1=Out2(:,3);
I2=Out2(:,4);
V2=Out2(:,5);
I_VT1=Out2(:,6);
I_VT2=Out2(:,7);
I_VD0=Out2(:,8);
S11=(1.5*V1.*I1);
P11=S11.*cos(Fi*pi/180);
P2=V2.*I2;
subplot(3,1,1);
plot(I2,V2,I2,0);grid on;
ylabel("V2 (V)");
subplot(3,1,2);
plot(I2,P11,I2,P2);grid on;
ylabel("P1(W),P2(W)");
text(-9,6000,'P1');
text(-9,-2000,'P2');
subplot(3,1,3);
plot(I2,I1,I2,I_VT1,I2,I_VT2,I2,I_VD0);
grid on;
xlabel("I2 (A)");
ylabel("I1(A),I_VT(A),I_VD0");
text(3,17,'I1');
text(6.5,13,'I-VT1');
text(-7.5,13,'I-VT2');
text(-1,5,'I-VD0');

```

Для построения основных характеристик служит программа, представленная в листинге 5.5. Эти характеристики представлены на рис. 5.82. Здесь при заданном напряжении (400 В) меньшем, чем амплитудное линейное напряжение сети ВИП, продолжает потреблять энергию из сети даже при отрицательном токе в нагрузке. При этом энергия, поступающая из сети и из нагрузки, рассеивается внутри ВИП на транзисторах VT1, VT2 и в сопротивлении R0.

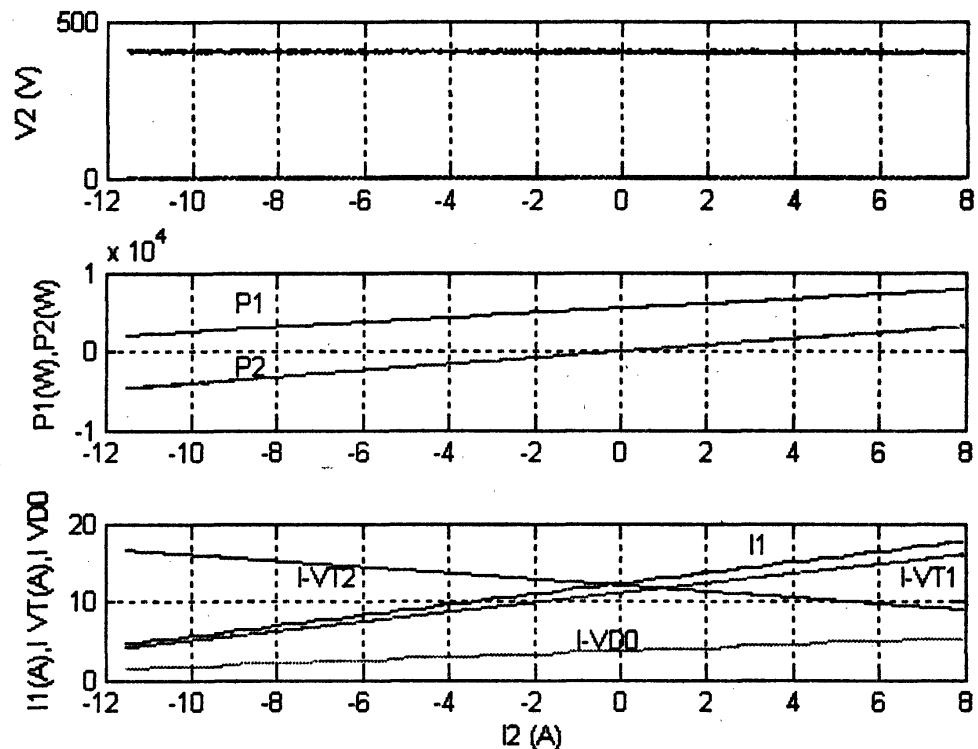


Рис. 5.82. Характеристики ВИП с широтно-импульсным стабилизатором и релейным регулятором

### 5.12.5. Сетевой трехфазный инвертор (активный выпрямитель) с синусоидальной ШИМ в качестве ВИП

Рассмотренные выше вторичные источники питания энергию торможения исполнительного двигателя рассеивают в активных сопротивлениях. Кроме того, такие источники питания потребляют из сети реактивную мощность. В системах маломощных (приблизительно до 500 Вт) отмеченные особенности обычно не приводят к существенным ухудшениям энергетических характеристик. В случае систем большей мощности с этими особенностями приходится считаться. Универсальное решение для обеспечения всех режимов работы исполнительной машины и улучшения энергетических характеристик систем реализуется путем использования сетевого инвертора. Основным достоинством сетевого инвертора в системе является способность рекуперировать механическую энергию в сеть переменного тока.

Схема ВИП с сетевым инвертором показана на рис.5.83.

В этой схеме транзисторный трехфазный инвертор подключен к сети переменного тока через индуктивности  $L_1$ . Управление инвертором осуществляется в замкнутой системе регулирования, на вход которой подается сигнал, пропорциональный току задания в сети ( $I_1^*$ ), и сигнал обратной связи, пропорциональный реальному току сети ( $I_1$ ), который вычисляется в блоке преобразования (БП). В схеме управления инвертором реализуется широтно-импульсная модуляция по синусоидальному закону.

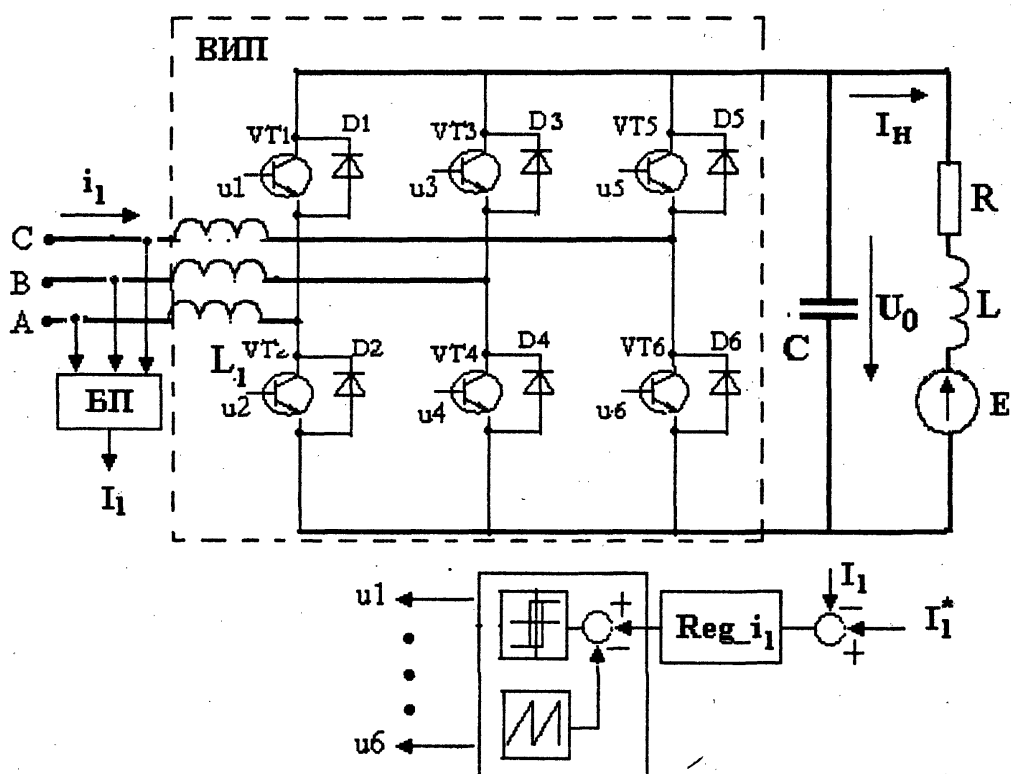


Рис. 5.83. Схема ВИП с сетевым инвертором

Функциональная схема сетевого инвертора с синусоидальной ШИМ показана на рис.5.84, в которой с одной стороны инвертор подключен к сети с напряжением  $\bar{U}_1$ , с другой – к цепи с постоянным напряжением  $U_0$ . Сам инвертор представляется преобразователем, который по отношению к сети переменного тока генерирует эдс, первая гармоника этой эдс равна

$$\bar{E}_0 = \mu U_0 e^{j\varphi_{\text{мод}}}, \quad (5.48)$$

где  $\mu$  – коэффициент модуляции,  $\varphi_{\text{мод}}$  – фаза напряжения модуляции по отношению к напряжению сети.

Уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа для схемы (рис.5.84), запишется в виде

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_0 + jx_1\bar{I}_1, \quad (5.49)$$

где  $\bar{E}_0$ ,  $\bar{U}_1$ ,  $\bar{I}_1$  – результирующие векторы эдс на выходе инвертора, напряжения сети и тока.

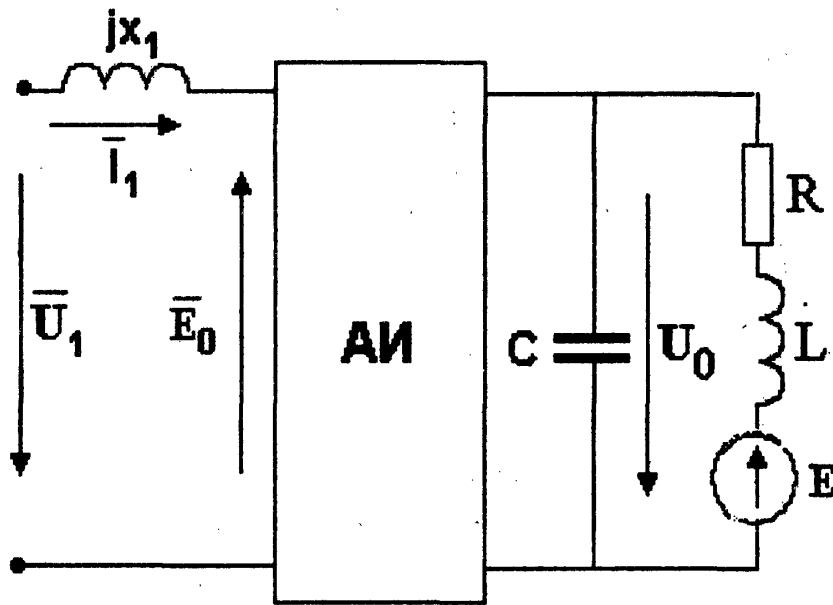


Рис. 5.84. Функциональная схема сетевого инвертора

Для подключения сетевого инвертора на сеть необходимо соблюсти ряд условий:

- частота модуляции инвертора должна в точности совпадать с частотой сети  $f_1$ ,
- очередность фаз управления инвертором должна совпадать с очередностью фаз сети,
- в каждой фазе инвертора со стороны сети должна быть включена значительная индуктивность, такая, чтобы реактивное сопротивление этой индуктивности на порядок и более превышало сумму внутренних сопротивлений сети и инвертора.

По отношению к сети переменного тока сетевой инвертор может работать и как генератор активной мощности (инвертор, ведомый сетью), и как потребитель активной мощности (активный управляемый выпрямитель). При этом активная мощность в сети определяется уравнением

$$P = -\frac{m_1 U_1 E_0}{x_1} \sin \varphi_{\text{mod}} = -\frac{m_1 U_1 \mu \cdot U_0}{x_1} \sin \varphi_{\text{mod}}, \quad (5.50)$$

где  $x_1 = 2\pi f_1 L_1$ ,  $L_1$  – индуктивность на входе инвертора,  $m_1$  – число фаз.

Из уравнения (5.50) следует, что при  $\varphi_{\text{mod}} \geq 0$  инвертор генерирует в сеть активную мощность. При  $\varphi_{\text{mod}} \leq 0$  инвертор потребляет из сети активную мощность. При  $\varphi_{\text{mod}} = 0$  вся система работает в режиме холостого хода.

Реактивная мощность, потребляемая инвертором, определяется уравнением

$$Q = -\frac{m_1 U_1 E_0}{x_1} \left( \cos \varphi_{\text{mod}} - \frac{U_1}{E_0} \right) = -\frac{m_1 U_1 \mu \cdot U_0}{x_1} \left( \cos \varphi_{\text{mod}} - \frac{U_1}{\mu U_0} \right), \quad (5.51)$$

В зависимости от знака инвертор может потреблять реактивную (индуктивную) или реактивную (емкостную) мощность. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

В режиме холостого хода инвертор не генерирует и не потребляет активной мощности. Реактивная мощность в режиме холостого хода равна

$$Q = -\frac{m_1 U_1 E_0}{x_1} \left( 1 - \frac{U_1}{E_0} \right) = -\frac{m_1 U_1 \mu \cdot U_0}{x_1} \left( 1 - \frac{U_1}{\mu U_0} \right), \quad (5.52)$$

Любое изменение коэффициента модуляции и связанной с ним эдс  $E_0$ , приводит к появлению тока в источнике. Физику процессов рассмотрим с использованием векторных диаграмм (рис.5.85).

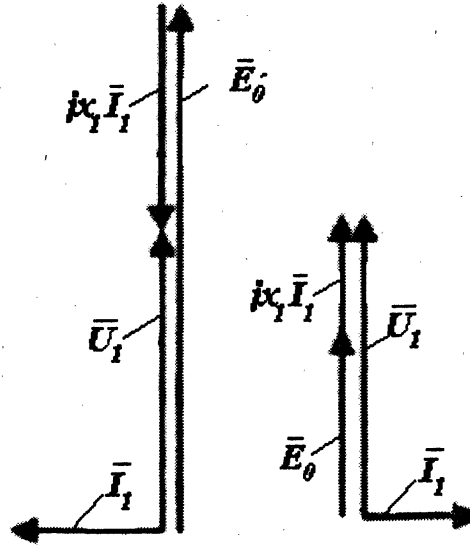


Рис. 5.85. Векторная диаграмма системы инвертор-сеть в режиме холостого хода

В питающей сети напряжение  $U_1$  постоянно, поэтому увеличение  $E_0$  по сравнению с  $U_1$  приводит к появлению емкостного тока в сети (рис.5.85). Уменьшение  $E_0$  по сравнению с  $U_1$  приводит к появлению индуктивного тока в цепи. Поскольку в обоих случаях угол между  $\bar{U}_1$  и  $\bar{E}_0$  равен  $0$ , то инвертор не отдает и не потребляет активной мощности. Таким образом, изменяя коэффициент модуляции, можно генерировать (или потреблять) реактивную мощность. Рассмотрим векторную диаграмму для общего случая, показанную на рис.5.86.

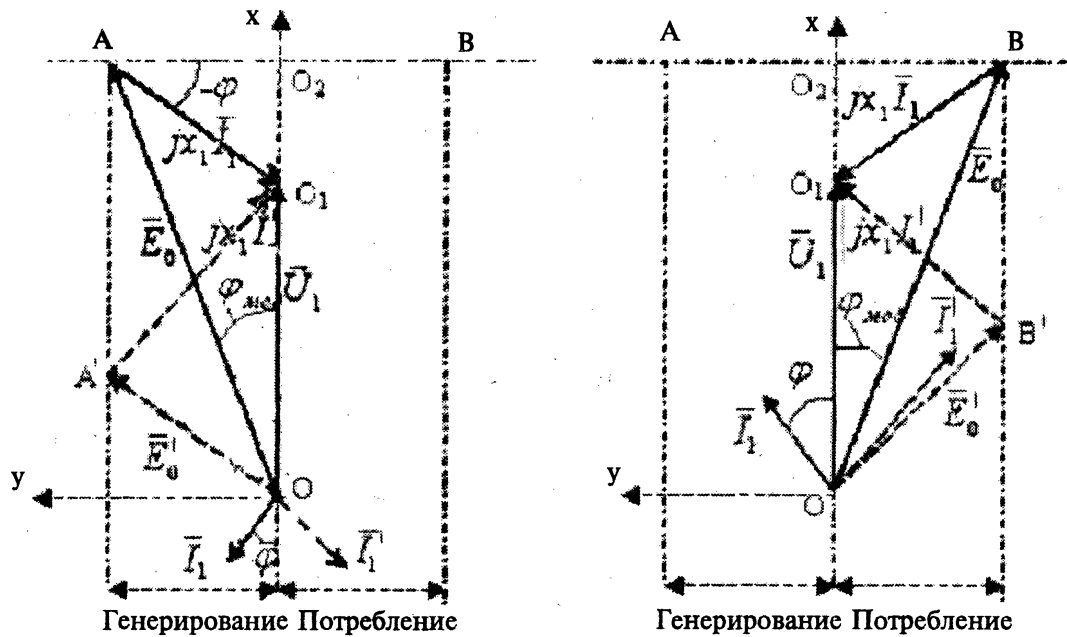


Рис. 5.86. Векторная диаграмма системы инвертор-сеть в режиме нагрузки

Из векторной диаграммы следует

$$AO_2 = x_1 I_1 \cos \varphi, \quad O_1 O_2 = x_1 I_1 \sin \varphi. \quad (5.53)$$

Активная и реактивная мощность в системе определяются уравнениями

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi, \quad Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi. \quad (5.54)$$

Сравнение уравнений (5.53) и (5.54) показывает, что при постоянном напряжении сети ( $U_1 = const$ ), отрезок  $AO_2$  в определенном масштабе – есть активная мощность, а отрезок  $O_1 O_2$  – реактивная мощность.

Поэтому для изменения активной мощности при ( $Q_1 = const$ ) конец вектора  $\vec{E}_0$  должен скользить по горизонтальной прямой (AB). Для изменения реактивной мощности при ( $P_1 = const$ ) конец вектора ( $\vec{E}_0$ ) должен скользить по вертикальной прямой (AA' или BB'). Положение вектора ( $OO_2$ ) соответствует холостому ходу. Если вектор ( $\vec{E}_0$ ) находится слева от прямой ( $OO_2$ ), то инвертор генерирует активную мощность в сеть. Если вектор ( $\vec{E}_0$ ) находится справа от прямой, то

инвертор потребляет активную мощность из сети. В режиме генерирования ( $\varphi_{\text{mod}} \geq 0$ ) при скольжении вектора вниз по вертикали, инвертор потребляет из сети реактивную (емкостную) мощность до тех пор, пока ( $E_0 \geq U_1$ ). При ( $E_0 \leq U_1$  пунктир, рис.5.86) инвертор потребляет из сети реактивную (индуктивную) мощность.

В режиме потребления мощности ( $\varphi_{\text{mod}} \leq 0$ ) из сети инвертор потребляет реактивную (емкостную) мощность до тех пор, пока ( $E_0 \geq U_1$ ) и реактивную (индуктивную) мощность при ( $E_0 \leq U_1$ ).

Все эти свойства инвертора при работе на сеть чрезвычайно полезны и часто используются (например, активные фильтры). Особенно важны эти свойства при построении электроприводов переменного тока с использованием синхронных и асинхронных машин, когда требуется рекуперация механической энергии в питающую сеть переменного тока. Перспективно также использование сетевых инверторов при построении асинхронных генераторов с фазным ротором.

Из уравнений (5.50), (5.51) следует, что изменение коэффициента модуляции, а равно и фазы модуляции, приводит к одновременному изменению активной и реактивной мощности. Для регулирования только активной мощности (при постоянной реактивной) или только реактивной мощности (при постоянной активной) необходимо организовать векторное управление инвертором с отрицательной обратной связью по току в синхронно вращающейся системе координат ( $x, y$ ), связанной с результирующим вектором напряжения сети, тогда проекция тока  $I_x$  определит активную мощность сети, а проекция  $I_y$  – реактивную. Поэтому первоначально рассмотрим вопросы, связанные с преобразованием координат.

#### *Преобразование координат.*

Для описания электромагнитных процессов в системах переменного тока используются различные системы координат:

1. неподвижные координаты, которые обозначаются через  $\alpha, \beta$ , причем ось  $\alpha$  совмещается с действительной осью комплексной плоскости, а ось  $\beta$  – с мнимой.
2. Вращающиеся с произвольной скоростью координаты  $x, y$  ( $x$  – вещественная ось,  $y$  – мнимая ось).

При составлении математического описания и синтезе мехатронных систем переменного тока преобразования координат реализуется аппаратным или программным способом в системе управления.

Рассмотрим это преобразование относительно координат, вращающихся с произвольной скоростью  $\omega_k$  относительно неподвижных координат.

Математическая основа преобразования координат поясняется на рис. 5.87.

В неподвижной системе координат  $\alpha, \beta$  вектор тока может быть представлен в алгебраической и показательной форме

$$i_H = i_\alpha + j i_\beta = I_m \exp(\Psi_1) . \quad (5.55)$$

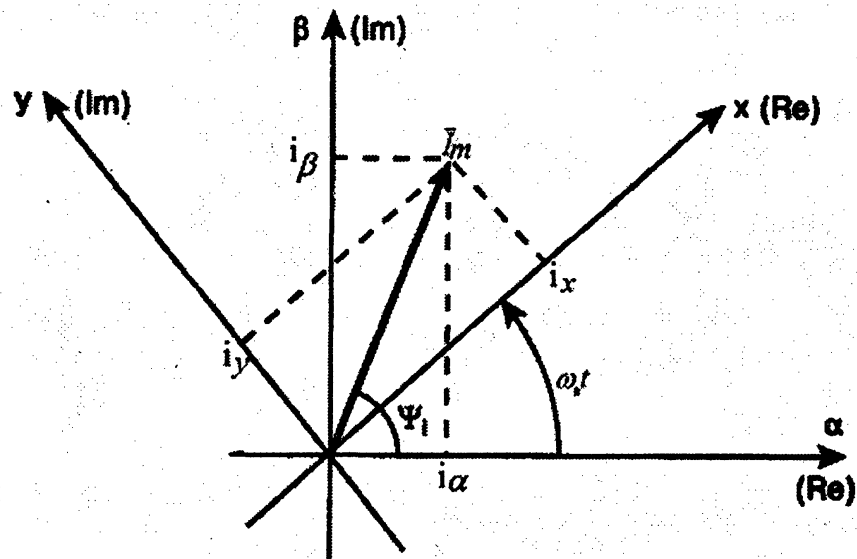


Рис. 5.87. Преобразование координат в векторной системе управления

Аналогично в системе вращающихся координат (x,y) тот же самый вектор может быть представлен в виде

$$\bar{i}_{Bp} = i_x + j i_y = I_m e^{j(\Psi_t - \omega_k t)} = \bar{i}_H \exp(-j\omega_k t). \quad (5.56)$$

Откуда легко получить уравнения перехода от неподвижной системы координат  $(\alpha, \beta)$  к вращающейся (x,y) и наоборот:

$$i_x = i_\alpha \cos(\omega_k t) + i_\beta \sin(\omega_k t), \quad i_y = i_\beta \cos(\omega_k t) - i_\alpha \sin(\omega_k t) \quad (5.57)$$

$$i_\alpha = i_x \cos(\omega_k t) - i_y \sin(\omega_k t), \quad i_\beta = i_y \cos(\omega_k t) + i_x \sin(\omega_k t) \quad (5.58)$$

Преобразование двухфазной неподвижной системы координат к трехфазной осуществляется в соответствии с выражениями:

$$i_A = i_\alpha, \quad i_B = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta, \quad i_C = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta \quad (5.59)$$

**Модельное исследование ВИП с сетевым инвертором (активным выпрямителем).**

Модель (файл *AIN\_3f\_Siec*), которая позволяет исследовать энергетические характеристика сетевого инвертора при заданном стабилизированном напряжении в звене постоянного тока и раздельным управлением по проекциям тока в сети  $I_x$  и  $I_y$ , представлена на рис.5.88. В блоке  $x, y - abc$  осуществляется преобразование из вращающихся координат  $(x, y)$  в неподвижные  $A, B, C$  в соответствии с уравнениями (5.58), (5.59). В блок Subsystem включены три релейных регулятора, реализующие «токовый коридор» в инверторе.

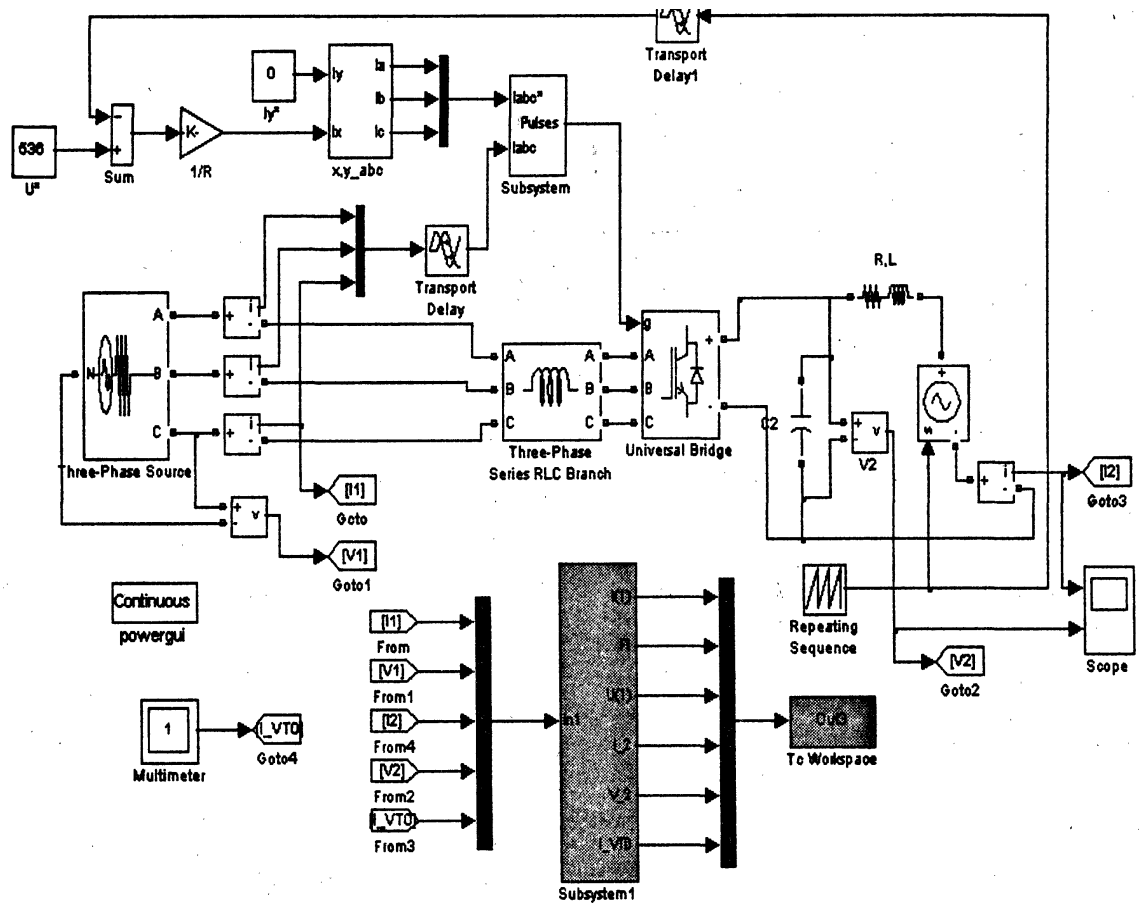


Рис. 5.88. Модель раздельного управления инвертором по проекциям  $I_x, I_y$  тока в сети

Для того чтобы сетевой инвертор не потреблял реактивной мощности ток по оси  $y$  ( $I_y$ ) задается равным нулю. Для стабилизации напряжения в звене постоянного тока сетевого инвертора ток по оси  $x$  ( $I_x$ ) задается в соответствии с уравнением (5.42).

Для построения основных характеристик служит программа, помещенная в листинг 5.6, эти характеристики представлены на рис.5.89.

**Листинг 5.6**

```

I1=Out3(:,1);
fi=Out3(:,2);
Fi=2*pi/3-(fi*pi/180);
V1=Out3(:,3);
I2=Out3(:,4);
V2=Out3(:,5);
I_VT0=Out3(:,6);
a=V2.*0.01;
S11=(1.5*V1.*I1);
Q11=S11.*sin(Fi);
P11=S11.*cos(Fi);
P2=V2.*I2;
subplot(3,1,1);
plot(I2,V2,a,I2);grid on;
ylabel("V2 (V)");
subplot(3,1,2);
plot(I2,Q11,I2,P11,I2,P2);grid on;
ylabel("P1(W),P2(W),Q1(VAR)");
text(-35,5000,'Q1');
text(5,20000,'P1');
text(-20,-20000,'P2');
subplot(3,1,3);
plot(I2,I1,I2,I_VT0);grid on;
xlabel("I2 (A)");
ylabel("I1(A),I VT(A)");
text(-19,25,'I1');
text(-28,15,'I VT');

```

Положительная активная мощность на входе и выходе ВИП соответствует режиму передачи энергии из сети в нагрузку (режим выпрямителя), отрицательная – режиму инвертирования энергии в сеть. Внешняя характеристика сетевого инвертора достаточно жесткая при значительном изменении тока в нагрузке.

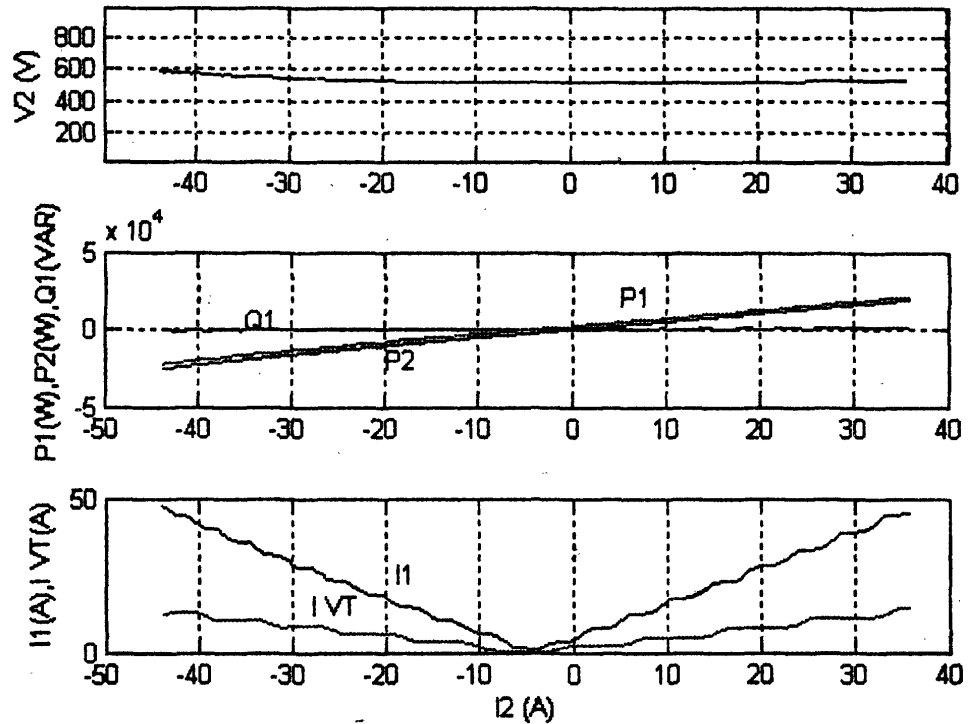


Рис. 5.89. Характеристики ВИП с сетевым инвертором

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.3.1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МОДЕЛИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА И АСИНХРОННЫХ МАШИН

### ВОПРОСЫ

1. Математическое описание и модели машины постоянного тока в пакете SIM POWER SYSTEM.
2. Математическое описание и модели асинхронных машин в пакете SIM POWER SYSTEM.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. Математическое описание и модели машины постоянного тока в пакете SIM POWER SYSTEM

Математическое описание двигателя постоянного тока, представленное ниже, является основой его модели в пакете Sim Power System.

Пиктограмма блока двигателя постоянного тока в пакете Sim Power System показана на рис. 6.1.

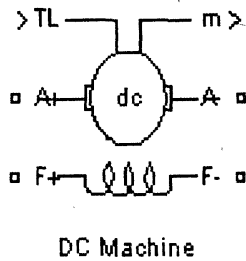


Рис. 6.1. Пиктограмма блока двигателя постоянного тока

Модель двигателя состоит из двух частей электромагнитной и механической (рис. 6.2). Электромагнитная часть модели включает\*:

1. Якорную цепь (Armature circuit), которая присоединяется к внешней цепи при помощи портов +A, -A и содержит последовательно соединенные сопротивление, индуктивность ( $R_a, L_a$ ), источник противо ЭДС (FCEM) и измеритель тока якоря;

2. Цепь возбуждения (Field circuit), которая присоединяется к внешней цепи при помощи портов +F, -F, содержит последовательно соединенные сопротивление, индуктивность ( $R_f, L_f$ ) и измеритель тока возбуждения.

Электромагнитная модель двигателя описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} u_a &= L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_a, \\ u_f &= L_f \frac{di_f}{dt} + R_f i_f, \\ e_a &= k_E \omega, k_E = L_{af} i_f. \end{aligned} \quad (6.1)$$

В уравнениях (6.1)  $u_a, i_a, e_a$  — напряжение, ток и противо ЭДС якоря,  $u_f, i_f$  — напряжение и ток возбуждения,  $L_a, R_a, L_f, R_f, L_{af}$  — параметры двигателя, которые задаются в окне параметров блока.

Механическая часть модели двигателя (Mechanics, рис. 6.2) отдельно представлена на рис. 6.3.

На вход механической части подаются момент нагрузки ( $T_L$ ), ток якоря ( $i_a$ ), ток возбуждения ( $i_f$ ). С выхода механической части снимаются противо ЭДС двигателя (этот сигнал подается на электромагнитную часть модели) и четыре величины (угловая скорость, ток якоря, ток возбуждения, электромагнитный момент), объединенные в вектор и поступающие на выходной измерительный порт «m».

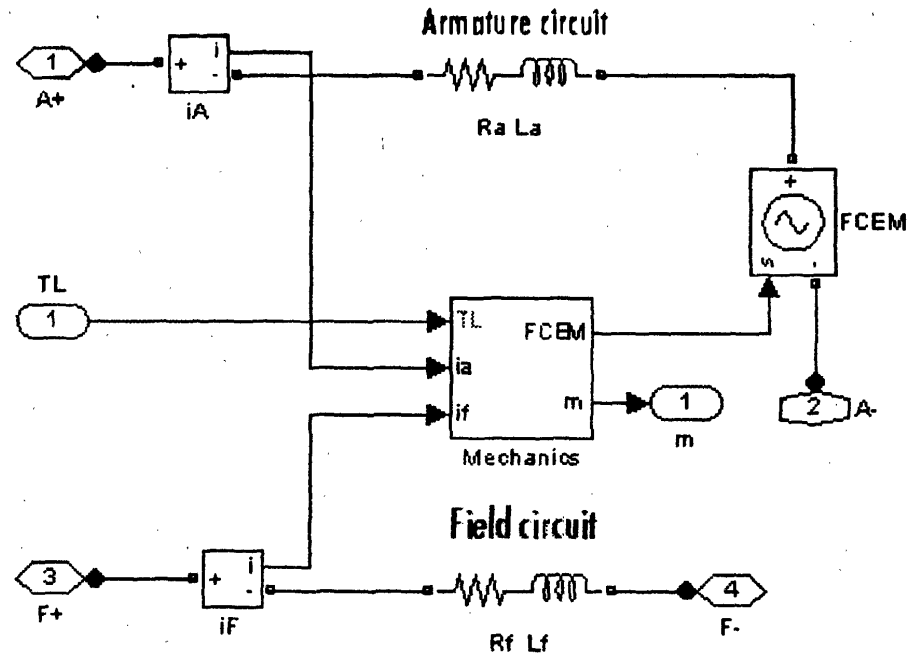


Рис. 6.2 Электромагнитная часть модели двигателя

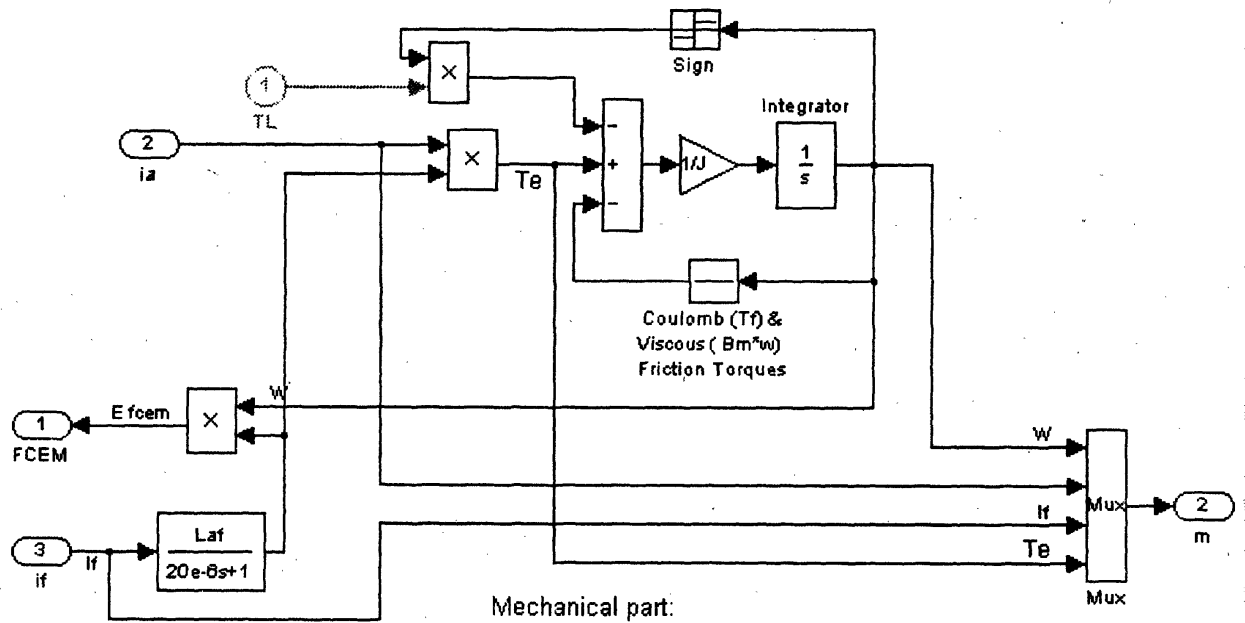


Рис.6.3. Механическая часть модели двигателя

Механическая модель двигателя описывается уравнением:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega + T_f + \text{sign} \omega \cdot T_L = k_T i_a. \quad (6.2)$$

В уравнении 6.2  $\omega$ ,  $T_L$ ,  $i_a$  – угловая скорость, момент нагрузки, ток якоря. В качестве параметров, которые должны быть заданы, приняты следующие:

- $J$  – момент инерции ротора с присоединенной нагрузкой.
- $B_m$  – коэффициенты вязкого трения.
- $T_f$  – момент сухого трения.

В модели коэффициенты момента и противо эдс приняты равными  $k_T = k_E$ , что достаточно близко к истине, когда все переменные состояния и параметры

представлены в системе СИ. Однако это обстоятельство следует учитывать при использовании результатов синтеза регуляторов структурных моделей для моделей виртуальных.

В двигателях постоянного тока с независимым возбуждением ток возбуждения постоянен и равен ( $i_f = I_f = \frac{U_f}{R_f} = \text{const}$ ).

Параметры двигателя, входящие в уравнения (6.1, 6.2), рассчитываются на основе паспортных данных, помещенных в справочных материалах.

Окно настройки параметров виртуальной модели ДПТ показано на рис. 6.4.

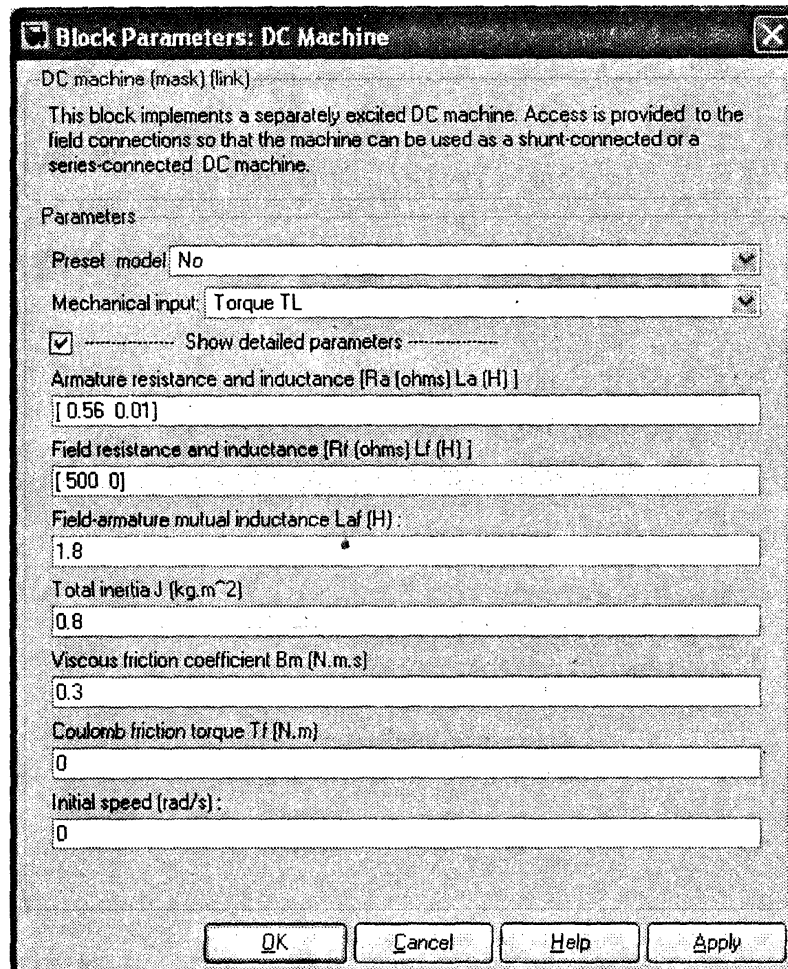


Рис. 6.4. Окно настройки параметров виртуальной модели ДПТ

В первом поле *Present model* можно выбрать тип двигателя. В этом случае все параметры будут соответствовать выбранному двигателю. Если в этом поле выбрать *No*, то параметры модели необходимо вводить вручную.

В поле *Mechanical input* можно задать момент или скорость внешней нагрузки. В первом случае двигатель будет представлять собой источник скорости, величина которой определяется приложенным к валу моментом и параметрами двигателя. Во втором случае двигатель будет представлять собой источник момента, величина которого определяется заданной скоростью и параметрами двигателя.

Это позволяет реализовать в модели механическую связь валов двух двигателей.  
*Пример 6.1.* Виртуальная установка «генератор — двигатель».

На рис. 6.5 показана модель (*файл D\_G\_Virt*) классической установки «генератор-двигатель», предназначенной для снятия механических характеристик двигателя постоянного тока.

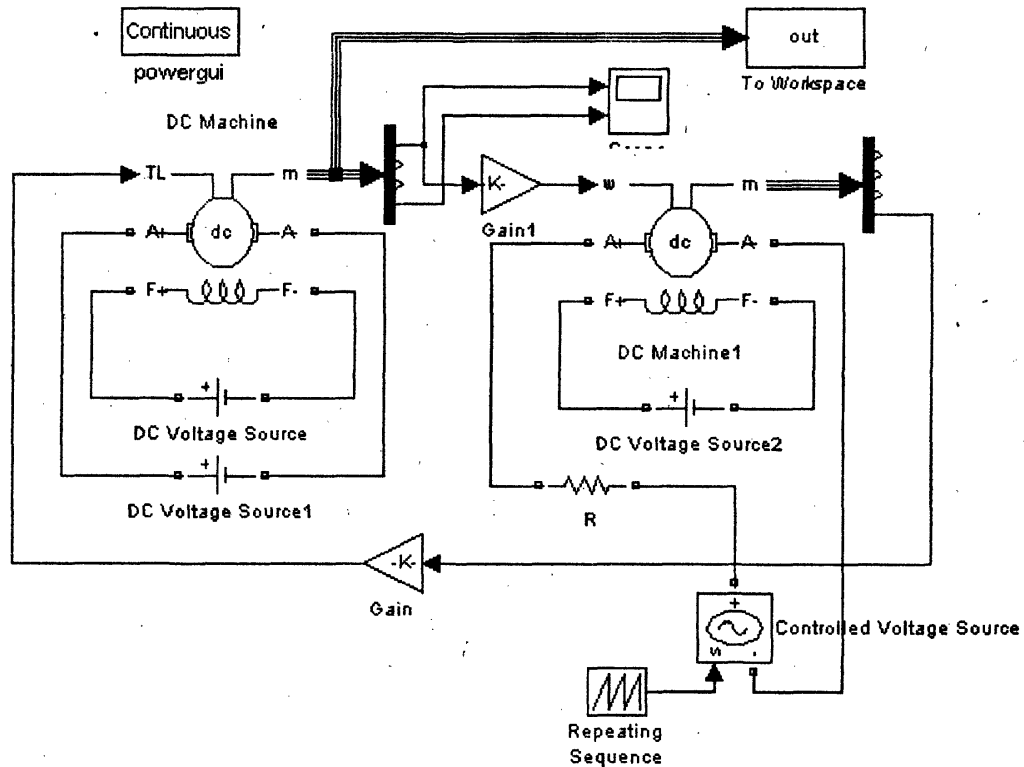


Рис. 6.5. Модель установки «генератор-двигатель»

Механическая характеристика, полученная на этой модели при независимом возбуждении и номинальном напряжении питания якоря испытуемого двигателя, приведена на рис. 6.6. (файл. *D\_G\_Measur.m*).

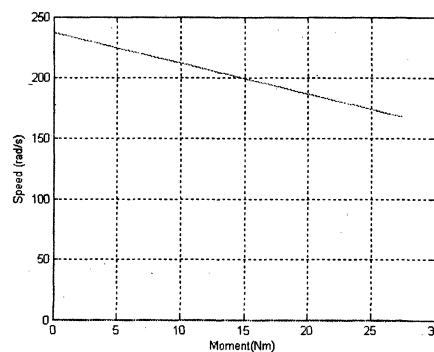


Рис. 6.6. Механические характеристики установки «генератор-двигатель»

Модель позволяет исследовать машины постоянного тока с независимым, параллельным и последовательным возбуждением.

## 6.2. Математическое описание и модели асинхронных машин в пакете Sim Power System

В основе виртуальной модели лежит математическое описание асинхронной машины во вращающейся системе координат, представленные как уравнения состояния.

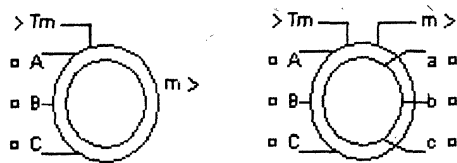


Рис. 6.7. Пиктограмма блока двигателя постоянного тока

Пиктограммы блоков асинхронной машины с короткозамкнутым и с фазным ротором в пакете Sim Power System показаны на рис. 6.7.

Математическая модель двигателя состоит из двух частей электромагнитной и электромеханической. Электромагнитная часть модели описывается системой дифференциальных уравнений во вращающейся системе координат, которые обозначены через d и q.

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds}, & \varphi_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}, & L_s &= L_{ls} + L_m \\
 V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + \omega \varphi_{qs}, & \varphi_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \\
 V'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}, & \varphi'_{qr} &= L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}, & L'_r &= L'_{lr} + L_m \\
 V'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}, & \varphi'_{dr} &= L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}.
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Этому математическому описанию соответствуют схемы замещения асинхронной машины в осях d и q, показанные на рис. 6.8.

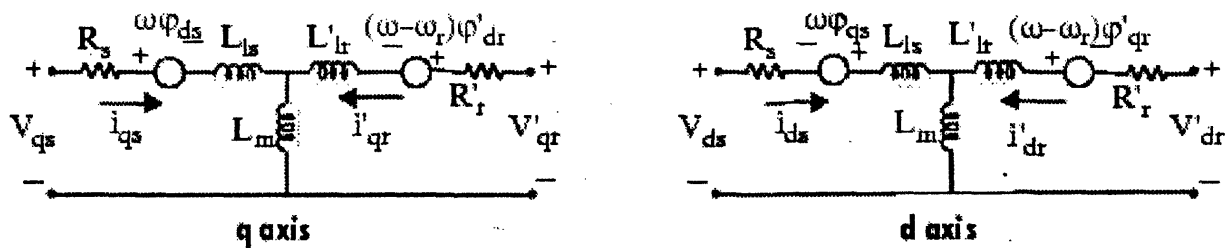


Рис. 6.8. Схемы замещения асинхронной машины в осях d и q

Электромеханическая часть машины описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}
 T_e &= 1.5p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \\
 \frac{d\omega_m}{dt} &= \frac{1}{J}(T_e - F\omega_m - T_m), & \frac{d\theta_m}{dt} &= \omega_m.
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Параметры асинхронной машины в уравнениях 6.3, 6.4 даны в таблице 6.1.

Параметр схемы замещения	Физический смысл параметра
$R_s$ (Ом), $L_s$ (Г)	Сопrotивление и индуктивность рассеяния статора.
$R'_r$ (Ом), $L'_r$ (Г)	Приведенные сопротивление и индуктивность рассеяния ротора
$L_m$ (Г)	Взаимная индуктивность между статором и ротором
$L_s$ , $L'_r$ (Г)	Полные индуктивность статора и приведенная индуктивность ротора
$V_{qs}$ (В), $i_{qs}$ (А)	Проекции пространственных векторов* напряжения и тока статора на ось q
$V'_{qr}$ (В), $i'_{qr}$ (А)	Проекции пространственных векторов напряжения и тока ротора на ось q
$V_{ds}$ (В), $i_{ds}$ (А)	Проекции пространственных векторов напряжения и тока статора на ось d
$V'_{dr}$ (В), $i'_{dr}$ (А)	Проекции пространственных векторов напряжения и тока ротора на ось d
$\varphi_{qs}$ , $\varphi_{ds}$ (Вс)	Проекции пространственного вектора потокосцепления статора на ось q и d
$\varphi'_{qr}$ , $\varphi'_{dr}$ (Ис)	Проекции пространственного вектора потокосцепления ротора на ось q и d
$\omega_m$ (рад/с)	Угловая скорость вращения ротора
$\theta_m$ (рад)	Угол поворота ротора
p	Число пар полюсов
$T_e$	Электромагнитный момент машины

Таблица 6.1.

Окно ввода параметров виртуальной асинхронной машины показано на рис. 6.9.

В первом поле Preset model можно выбрать одну из моделей библиотеки или отказаться от выбора и ввести параметры собственной модели.

Во втором поле (Mechanical input) в выпадающем списке можно выбрать два варианта:

- 1 Torque  $T_m$  (момент).
- 2 Speed  $w$  (скорость).

**Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units**

Asynchronous Machine (mask) (link):

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor or squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point. You can specify initial values for stator and rotor currents or for the stator current only.

Parameters

Preset model: 17: 20 HP (15KW) 400 V 50Hz 1460 RPM

Mechanical input: Torque Tm

Show detailed parameters

Rotor type: Squirrel-cage

Reference frame: Rotor

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [ Pn(W), Vn(Vrms), fn(Hz) ]  
 [1.5e+004 400 50]

Stator resistance and inductance [ Rs(ohm) Ls(H) ]  
 [0.2147 0.000991]

Rotor resistance and inductance [ Rr(ohm) Lr(H) ]  
 [0.2205 0.000991]

Mutual inductance Lm (H):  
 0.06419

Inertia, friction factor and pairs of poles [ J(kg.m^2) F(N.m.s) p() ]  
 [0.102 0.009541 2]

Initial conditions  
 [ 1.0 0.0 0.0 ]

Simulate saturation

OK Cancel Help Apply

Рис. 6.9. Окно ввода параметров виртуальной асинхронной машины

В первом случае асинхронная машина представляет собой источник скорости, а момент в ней компенсирует момент на валу (на входе  $T_m$  виртуальной модели). Во втором случае асинхронная машина представляет собой источник момента, а скорость в ней устанавливается равной заданной на входном порту.

В третьем поле (Rotor type) выбирается либо короткозамкнутый ротор (Squirrel-cage), либо фазный ротор (Wound).

В четвертом поле (Reference frame) выбирается система координат, в которой измеряются переменные состояния машины. Здесь из выпадающего списка можно выбрать неподвижную систему координат, синхронно вращающуюся систему координат и систему координат вращающуюся со скоростью ротора.

В остальные поля окна (при отмеченном поле Show detailed parameters) вводятся параметры модели в соответствии с математическим описанием.

Для измерения переменных состояния машин переменного тока используется универсальный блок Measurement (рис. 6.10).

В первом поле (Machine type) окна настройки параметров блока вводится тип машины. В остальных полях птичками отмечаются переменные состояния, которые выводятся для измерения.

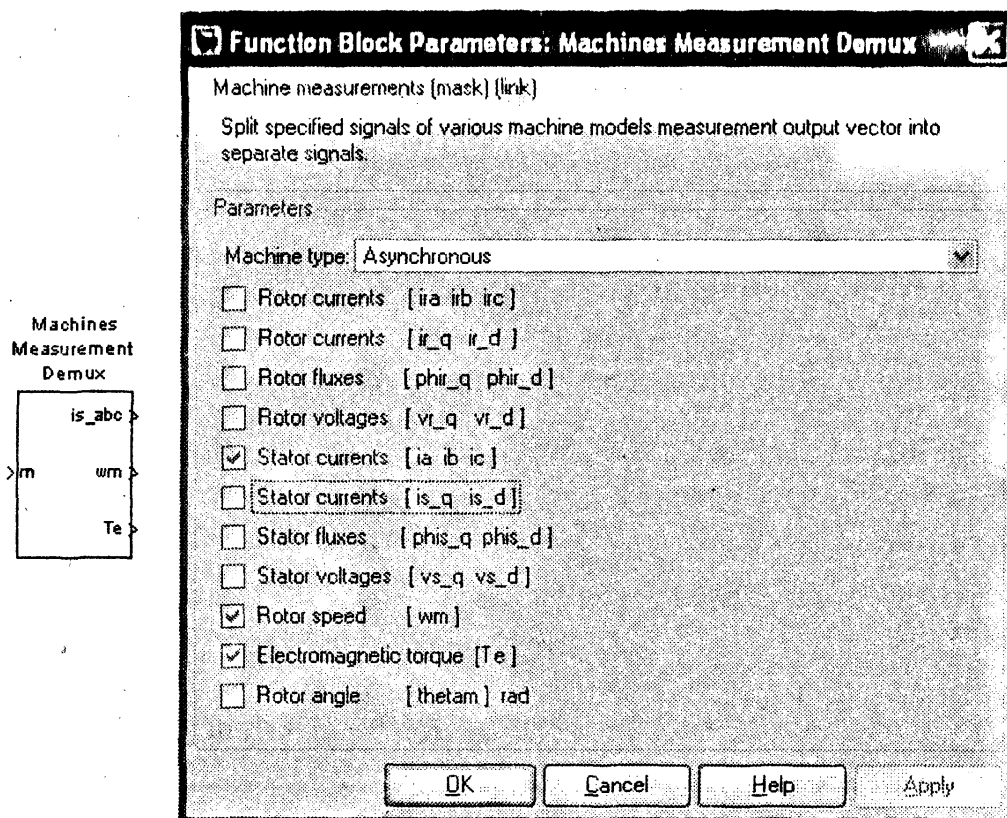


Рис. 6.10. Универсальный блок Measurement

**Пример 6.2.** Прямой пуск асинхронного двигателя.

Виртуальная модель для исследования прямого пуска АКЗ на холостом ходу с последующим приложением номинального момента показана на рис. 6.11 (*файл AKZ\_Virt*).

Модель содержит трехфазную асинхронную машину (Asynchronous Machine SI Units), запитанную от трехфазного источника (Three-Phase Source), блок для измерения скорости и момента машины (Machines Measurement Demux), блок момента нагрузки (Step) и блоки измерения (Scope, To Workspace).

При запуске модели осуществляется прямой пуск АКЗ, по истечению некоторого времени прикладывается момент нагрузки. Результаты моделирования машины 20HP (15 kw) 400 V, 50 Hz, 1460 RPM, представлены на рис. 6.12.

Из результатов моделирования видно, что при прямом пуске на холостом ходу и при приложении нагрузки наблюдаются значительные колебания момента и скорости. Подробно динамика асинхронного двигателя будет описана далее (гл. 8) при рассмотрении вопросов проектирования асинхронных систем.

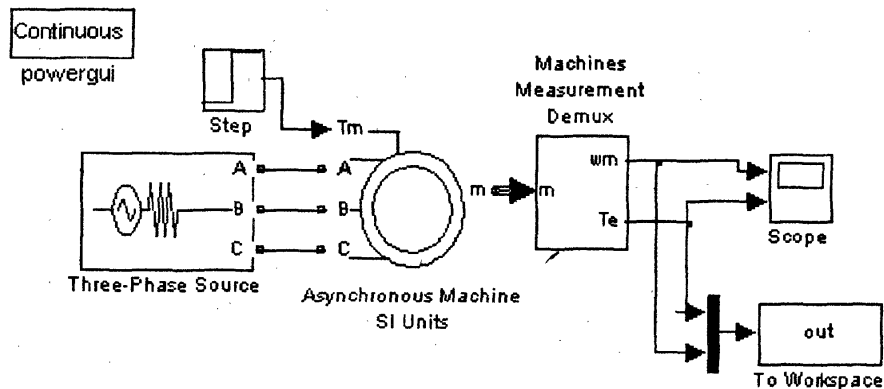


Рис. 6.11. Модель асинхронного короткозамкнутого двигателя

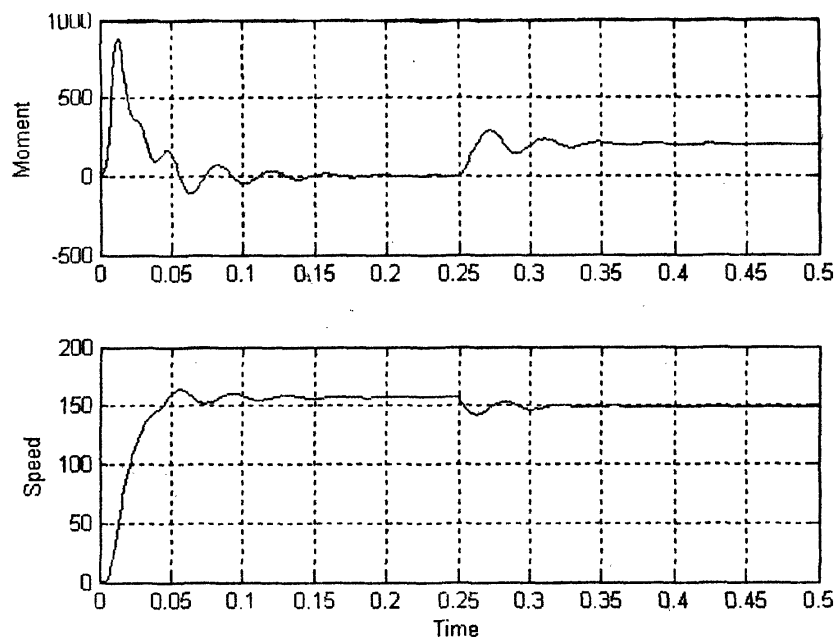


Рис. 6.12. Результаты моделирования машины 20HP (15 kw) 400V 50Hz 1460 RPM

*Пример 6.3.* Виртуальная установка для исследования механических, электромагнитных и энергетических характеристик асинхронной машины во всем диапазоне изменения скольжения.

Сложность построения модели для проведения исследования заключается в том, что механическая характеристика АМ имеет только одну устойчивую область работы в диапазоне изменения скольжения от  $-s_{k,z} \delta_0 + s_{k,d}$ . Остальные области механических характеристик являются областями неустойчивой работы.

Задача построения модели с последующим исследованием механических, электромагнитных и энергетических характеристик АМ во всем диапазоне изменения скольжения может быть решена при использовании подхода, описанного ниже.

Этот подход базируется на формировании нагрузочного момента, в точности совпадающего с моментом исследуемого АКЗ и одновременным управлением скоростью двигателя. Модель такой виртуальной установки показана на рис. 6.13 (*файл AKZ\_stat*).

Модель содержит две электрические машины. 1. Асинхронную машину (АМ) со своим источником питания (ASC). 2. Машину постоянного тока (DCM) с источником питания обмотки возбуждения (DCS) и регулируемым источником в якорной цепи (CVS). Электромагнитный момент асинхронной машины является нагрузкой на валу машины постоянного тока, а электромагнитный момент машины постоянного тока служит нагрузкой на валу асинхронной машины.

При таком построении моменты обеих машин будут всегда (в установившемся режиме) равны и противоположны по знаку. Для задания скорости вращения исследуемой асинхронной машины машина постоянного тока управляется от регулятора, на вход которого поступает сигнал задания и сигнал обратной связи — скорость асинхронной машины. Блок (Measurement) является библиотечным блоком для измерения переменных состояния асинхронной машины. Блок (Output) служит для передачи в рабочее пространство переменных для вычисления механических, электромагнитных и энергетических характеристик асинхрон-

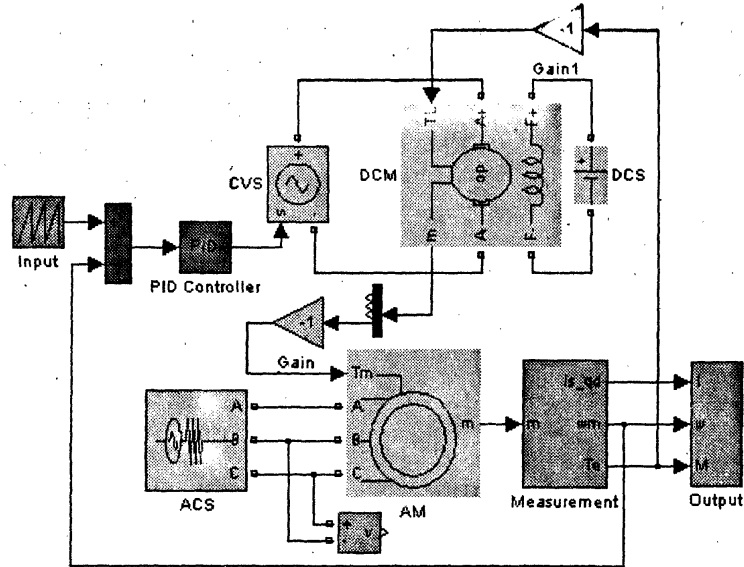


Рис. 6.13. Модель виртуальной установки для снятия статических характеристик асинхронной машины

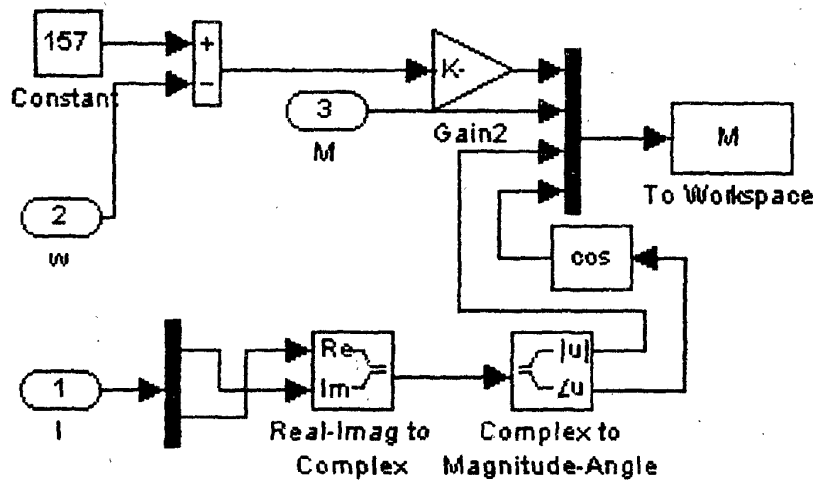


Рис. 6.14. Модель блока Output

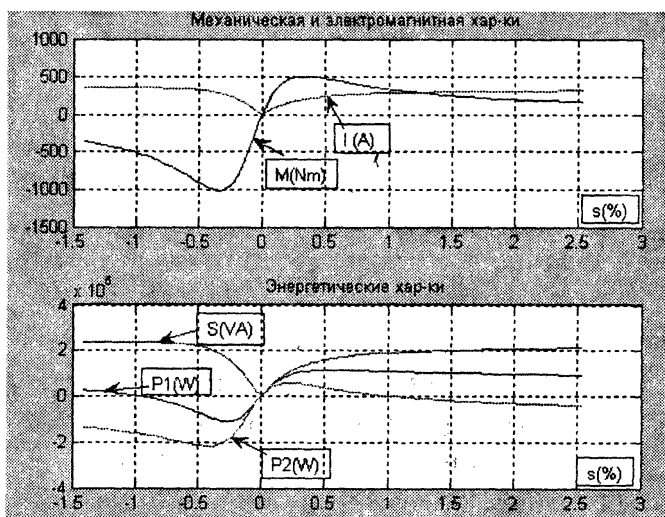


Рис. 6.15. Статические характеристики асинхронной машины

ой машины. Модель этого блока представлена на рис. 6.14. Здесь вычисляется скольжение, амплитуда тока статора и коэффициент мощности. Блок (To Workspace) служит для передачи данных в рабочее пространство MATLAB. Программа для расчета статических характеристик представлена в файле *AKZ\_Stat\_Char*, а сами характеристики показаны на рис. 6.15.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.3.2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И МОДЕЛИ СИНХРОННЫХ МАШИН В ПАКЕТЕ SIM POWER SYSTEM

### ВОПРОСЫ

1. Магнитоэлектрическая синхронная машина.
2. Шаговые двигатели.

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Магнитоэлектрическая синхронная машина

Библиотека синхронных машин пакета Sim Power System содержит в основном синхронные генераторы, однако имеются две модели синхронных двигателей, которые широко используются в системах мехатроники.

Первой из этих моделей является магнитоэлектрическая синхронная машина (Permanent Magnet Synchronous Machine).

Математическая модель машины состоит из двух частей – электромагнитной и электромеханической. Математическое описание электромагнитной части модели зависит от характера распределения поля в зазоре. При синусоидальном распределении поля электромагнитная часть машины описывается системой дифференциальных уравнений во вращающейся системе координат, которые обозначены через  $d$  и  $q$ .

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q, \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q}, \\ T_e &= 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q], \end{aligned} \quad (6.5)$$

где амплитуды тока и напряжения статора по осям  $d$ ,  $q$ ,  $\lambda$  – амплитуда потока постоянного магнита ротора сцепленного с обмоткой статора,  $T_e$  – электромагнитный момент,  $\omega_r$  – угловая скорость вращения ротора,  $L_d, L_q$  – индуктивности по осям  $d$ ,  $q$ ,  $R$  – сопротивление статора,  $p$  – число пар полюсов.

Пиктограмма и окно настройки параметров машины показаны на рис. 6.16.

В первом поле Flux distribution (форма магнитного поля в зазоре) из выпадающего списка можно выбрать два типа распределения. 1 Синусоидальное распределение магнитного поля в воздушном зазоре. 2 Трапецеидальное распределение магнитного поля в воздушном зазоре.

Во втором и третьем полях параметры задаются так, как в асинхронной машине.

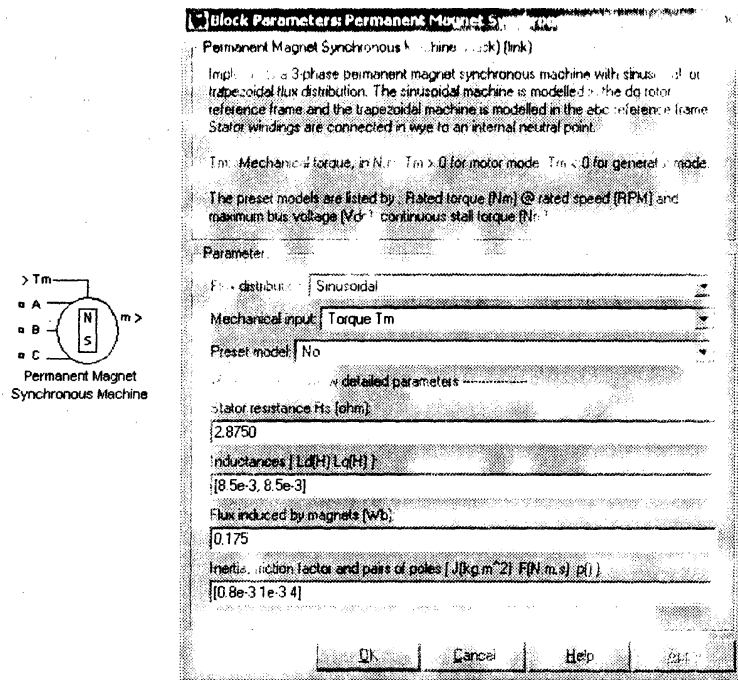


Рис. 6.16. Пиктограмма и окно настройки параметров синхронной машины при синусоидальном поле

В остальные поля окна вводятся параметры модели во вращающейся системе координат в соответствии с математическим описанием.

При трапецеидальном распределении магнитного поля в зазоре электромагнитная часть машины описывается системой дифференциальных уравнений в фазовых координатах неподвижной системы координат:

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= \frac{1}{3L_s} [2u_{ab} + u_{bc} - 3R_s i_a + \lambda p \omega_r (-2\Phi'_a + \Phi'_b + \Phi'_c)], \\ \frac{di_b}{dt} &= \frac{1}{3L_s} [-u_{ab} + u_{bc} - 3R_s i_a + \lambda p \omega_r (\Phi'_a - 2\Phi'_b + \Phi'_c)], \\ \frac{di_c}{dt} &= -\left( \frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} \right), \\ T_e &= p\lambda (\Phi'_a i_a + \Phi'_b i_b + \Phi'_c i_c), \end{aligned} \quad (6.6)$$

где  $u_{ab}, u_{bc}$  — линейные напряжения,  $i_a, i_b, i_c$  — фазные токи,  $\Phi'_a, \Phi'_b, \Phi'_c$  — единичные трапецеидальные функции, которые определяются в соответствии с рис. 6.17.

Для синхронной машины с трапецеидальным распределением поля окно выбора параметров отличаются от рассмотренных (рис. 6.16) для синусоидально распределенного поля. Панель настройки параметров для этом случая показана на рис. 6.18.

Здесь в поле Back EFM flat area (degree) вписывается значение ширины основания трапецидальной функции в градусах (рис. 6.17).

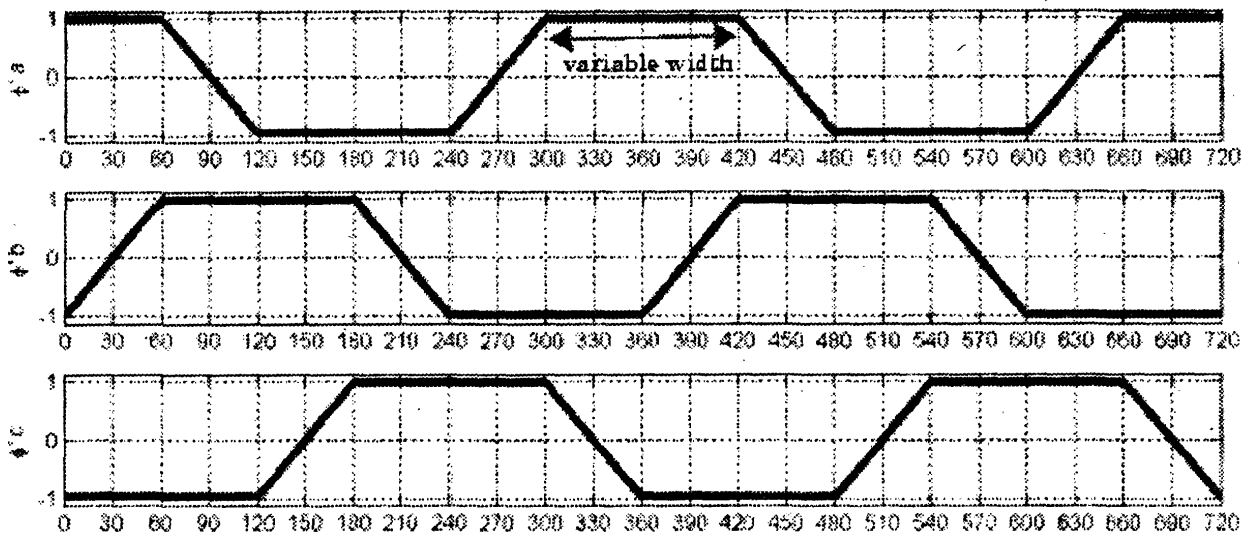


Рис. 6.17. Единичные трапецидальные функции

*Синхронные магнитоэлектрические двигатели с синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре используются для построения вентильных двигателей (ВД).*

*Синхронные магнитоэлектрические двигатели с трапецидальным распределением магнитного поля в зазоре используются для построения бесконтактных двигателей постоянного тока (БДПТ).*

Описание этих двигателей и мехатронных систем на их основе рассмотрено в девятой главе.

Электромеханическая часть описывается одинаково для обеих моделей уравнением

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J}(T_e - F\omega_r - T_m), \\ \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r, \end{aligned} \tag{6.7}$$

где  $J$  — суммарный момент инерции на валу,  $F$  — коэффициент вязкого трения,  $\theta_r$  — угол поворота ротора,  $T_m$  — внешний момент приложенный к валу машины.

Для измерения переменных состояния машин переменного тока используется универсальный блок Measurement (рис. 6.10). В первом поле (Machine type) окна настройки параметров блока вводится тип машины. В остальных полях птичками отмечаются переменные состояния, которые выводятся для измерения:

Вместо универсального блока Measurement для измерения переменных состояний машины может быть использован блок Bus Selector из библиотеки Signal Routing пакета Simulink, представленный на рис. 6.19. При подключении блока к измерительному порту машины в левом окне блока записываются все переменные состояния, которые могут быть измерены. В правое окно блока переносятся те переменные состояния машины, которые подлежат измерению.

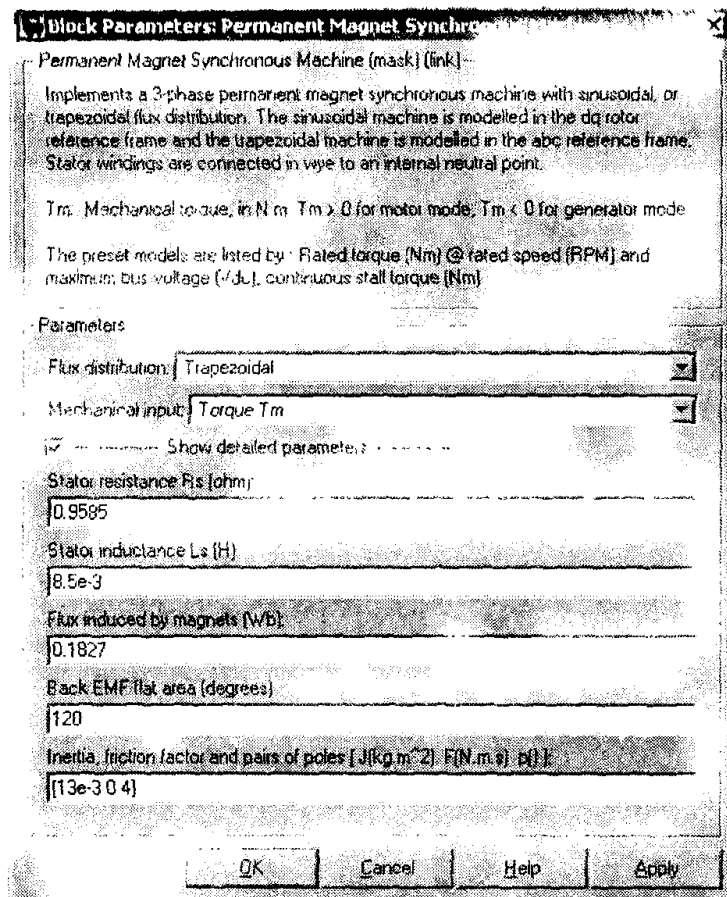


Рис. 6.18. Пиктограмма и окно настройки параметров синхронной машины при трапецеидальном поле

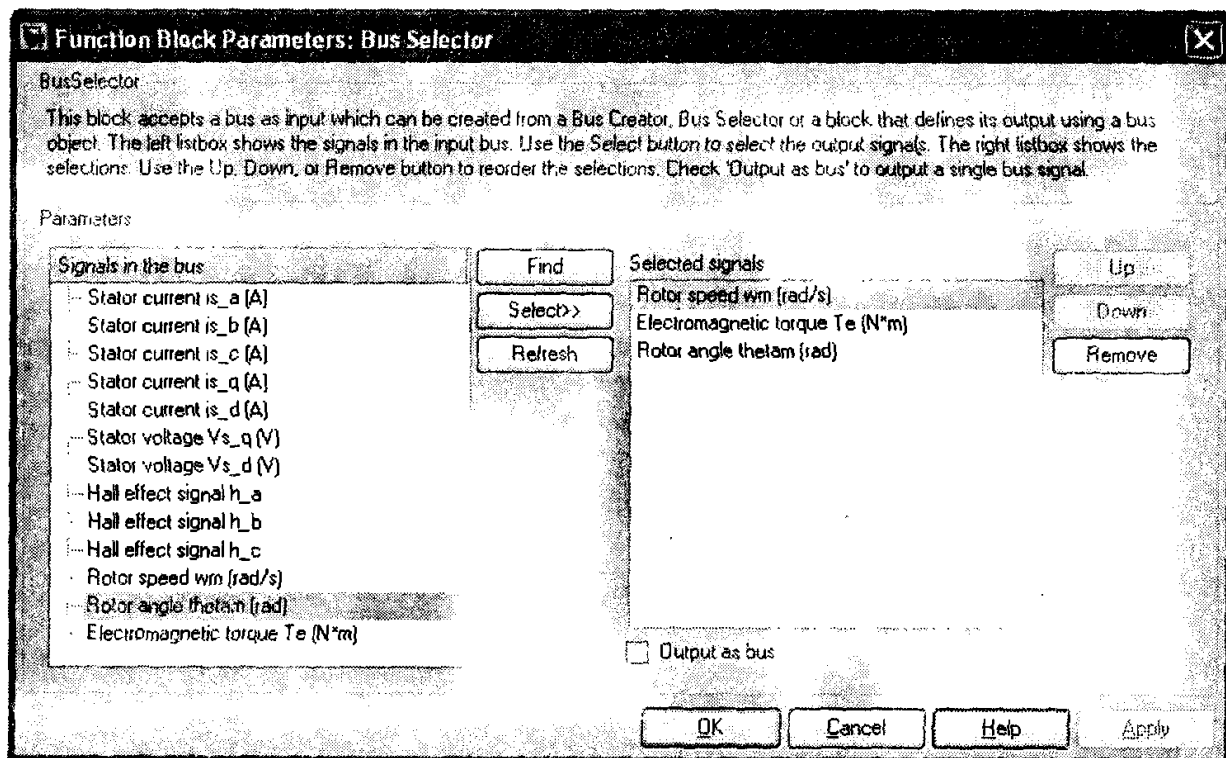


Рис. 6.19. Блок Bus Selector

Этим блоком следует воспользоваться для измерения переменных состояния виртуальной модели с трапецидальным распределением поля, на основе которой строится БДПТ.

В общем случае на выходном порту виртуальной модели измеряются переменные состояния, представленные таблицей 6.2.

Из таблицы 6.2 видно, что в виртуальной модели с трапецидальным распределением поля на выходном измерительном порту «m» генерируется три логических сигнала (Hall effect signal — сигналы с датчиков Холла). Длительность этих сигналов составляет 180 эл. град., ими управляется силовой полупроводниковый преобразователь (коммутатор).

Definition	Units	Symbol	Sinusoidal model	Trapezoidal model
Startor current is_a	A	ia	1	1
Startor current is_b	A	ib	2	2
Startor current is_c	A	ic	3	3
Startor current is_q	A	iq	4	N/A
Startor current is_d	A	id	5	N/A
Startor Voltage Vs_q	V	vq	6	N/A
Startor Voltage Vs_d	V	vd	7	N/A
Phase backEMF e_a	V	ea	N/A	4
Phase backEMF e_b	V	eb	N/A	5
Phase backEMF e_c	V	ec	N/A	6
Hall effect signal h_a*	logic 0-1	ha	8	7
Hall effect signal h_b*	logic 0-1	hd	9	8
Hall effect signal h_c*	logic 0-1	hc	10	9
Rotor speed $\omega_r$	rad/s	$\omega_r$	11	10
Rotor angle $\theta_r$	rad	$\theta_r$	12	11
Electromagnetic torque Te	N.m	Te	13	12

### 6.3.2. Шаговые двигатели

В пакете Sim Power System представлена модель реактивного шагового двигателя с различным сочетанием количества статорных и роторных полюсов.

Пиктограмма и окно настройки шагового двигателя показаны на рис. 6.20. В первом поле (Type) задается сочетание количества статорных и роторных полюсов. Здесь предлагается три варианта 6/4, 8/6, 10/8. Первая цифра обозначает количество явно выраженных полюсов статора, вторая — количество явно выраженных полюсов ротора. В поле Machine model при выборе опции Generic model параметры двигателя задаются в окне настройки параметров. При выборе опции Specific model эти параметры можно задать во внешних файлах MATLAB.

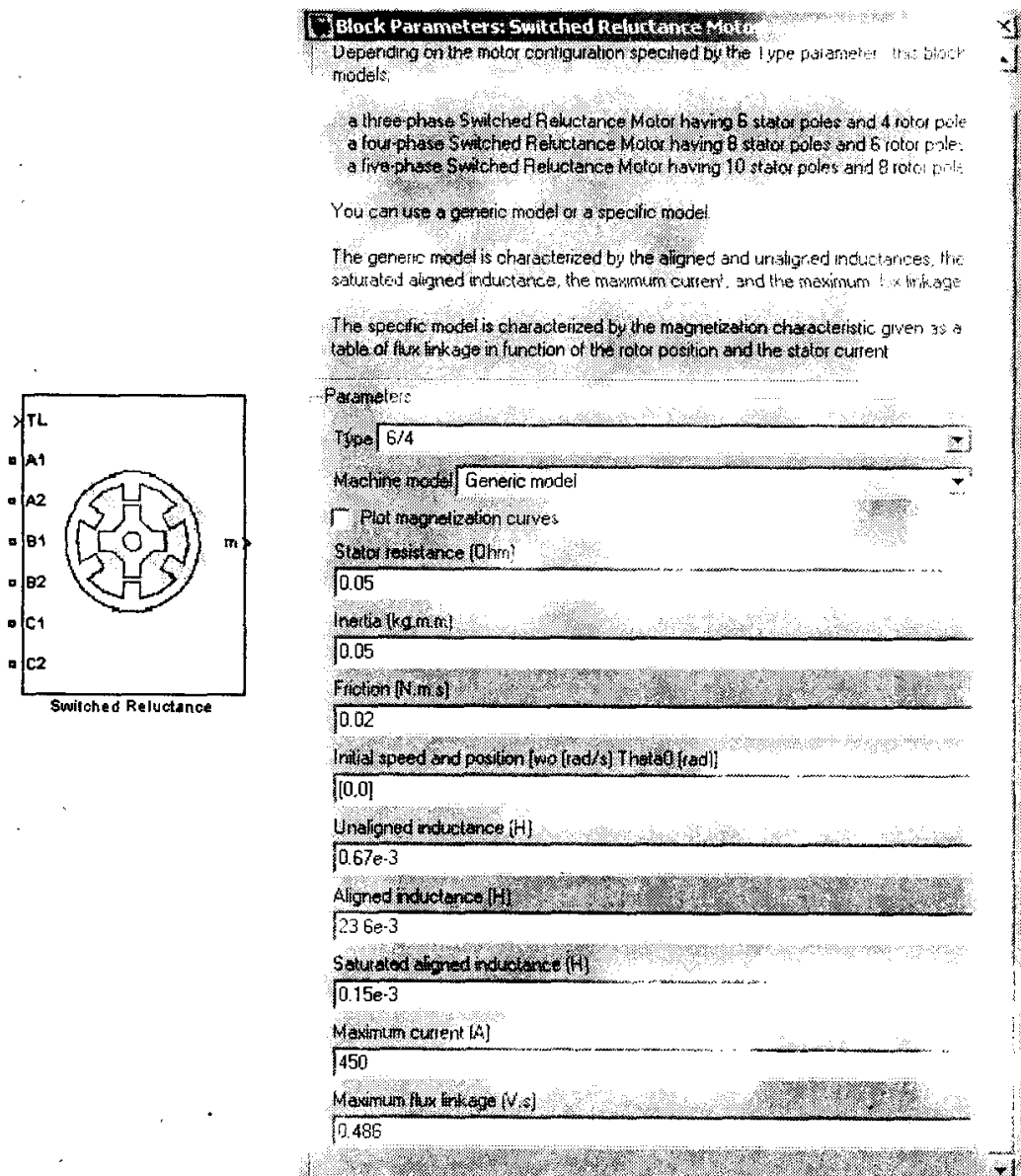


Рис. 6.20. Пиктограмма и окно настройки шагового двигателя

Суммарный момент инерции на валу (Inertia), коэффициент вязкого трения (Friction), начальная скорость и начальный угол поворота ротора (Initial speed and position) являются обычными параметрами, аналогичными для всех электрических машин. Все остальные параметры выясняет рис. 6.21.

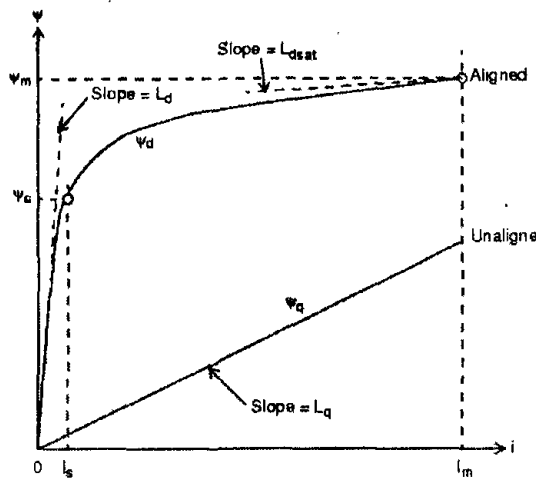


Рис. 6.21. Предельные кривые намагничивания шагового двигателя

В поле **Unalignet inductance** задается индуктивность статорной обмотки при несовпадении полюсов статора и ротора (при смещении этих полюсов на 90 эл.градусов). В поле **Alignet inductance** задается индуктивность статорной обмотки при совпадении полюсов статора и ротора. Эта характеристика для реактивного шагового двигателя является нелинейной (рис. 6.21), поэтому задаются ее начальное значение (**Alignet inductance**) и конечное значение при насыщении (**Saturated Alignet inductance**). Кроме того задается максимальный ток (**Maximum current**) и соответствующее ему потокосцепление (**Maximum flux linkage**).

Простановка птички в поле **Plot magnetization curves** открывает окно (рис. 6.22) с семейством кривых намагничивания шагового двигателя для различных углов смещения полюсов статора и ротора.

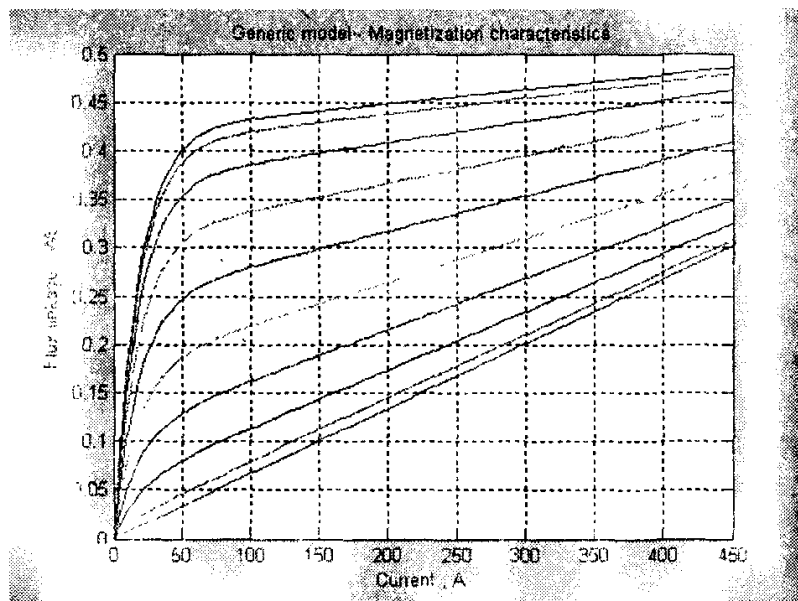


Рис. 6.22. Семейство кривых намагничивания шагового двигателя

На выходном порту блока измеряются:

- напряжение статора;
- потокосцепление статора;
- ток статора;
- электромагнитный момент;
- скорость ротора;
- угол поворота ротора.

При этом измерения необходимо производить блоком **Bus Selector** из библиотеки **Signal Routing** пакета **Simulink** (рис. 6.19).



## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.3.3. МОДЕЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

### **ВОПРОСЫ**

1. Математическое описание, структурные схемы и модели двигателя постоянного тока.

### **ЛИТЕРАТУРА**

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

- 1. Математическое описание, структурные схемы и модели двигателя постоянного тока**

В системах мехатроники преимущественное применение нашли двигатели постоянного тока с независимым возбуждением или магнитоэлектрические. Управление этими двигателями, как правило, осуществляется по цепи якоря. Уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе постоянного тока с независимым возбуждением имеют вид:

$$\begin{aligned}
 u_{\text{я}} &= R_{\text{я}} \left( T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} \right) + e_{\text{я}}, \\
 J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_{\text{H}}, \\
 \omega_m &= \frac{d\theta_m}{dt}, \\
 e_{\text{я}} &= k_E \omega_m, M = k_M i_{\text{я}}.
 \end{aligned} \tag{7.1}$$

В уравнениях (7.1)  $u_{\text{я}}, i_{\text{я}}, e_{\text{я}}$  — напряжение, ток и противо ЭДС якоря, —  $L_{\text{я}}, R_{\text{я}}, T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$  индуктивность, сопротивление и электромагнитная постоянная

времени якоря,  $\omega_m, M, M_{\text{H}}, \theta_m$  — механическая угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки и механический угол поворота вала,  $J$  — момент инерции ротора, коэффициенты  $k_E, k_M$  являются конструктивными постоянными.

Параметры двигателя, входящие в уравнения (7.1) рассчитываются на основе паспортных данных, помещенных в справочных материалах.

$P_{\text{H}}$ [кВт]	$U_{\text{я}} = U_{\text{В}}$ [В]	$n_{\text{H}}$ [об / мин]	$I_{\text{я}}$ [А]	$R_{\text{я}}$ [Ом]	$R_{\text{В}}$ [Ом]	$J$ [кгм <sup>2</sup> ]
0.12	110	3000	1.53	1.48	642	0.06
0.2	110	3000	2.46	0.762	560	0.08
0.25	110	3000	3.05	0.945	827	0.14
0.37	110	3000	4.4	0.546	934	0.16
0.45	110	3000	5.6	0.585	400	0.36
1.0	110	3000	9.96	0.561	500	0.8

Таблица 7.1

В качестве примера в таблице 7.1 приведены параметры малоинерционных двигателей постоянного тока с электромагнитным возбуждением, разработанные для робототехнических комплексов.

В таблице 7.1 введены следующие обозначения:

- номинальная мощность двигателя  $P_H$  [кВт];
- номинальное напряжение питания якоря  $U_{\text{я}}$  [В];
- номинальное напряжение возбуждения  $U_B$  [В];
- номинальный ток якоря  $I_{\text{я}}$  [А];
- номинальная скорость вращения якоря  $n_H$  [об/мин];
- сопротивление обмотки якоря  $R_{\text{я}}$  [Ом];
- сопротивление обмотки возбуждения  $R_B$  [Ом].

Номинальный момент двигателя в (Нм), номинальный ток возбуждения в (А), конструктивные постоянные и индуктивность якоря рассчитываются из уравнений:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} = \frac{30P_H}{\pi n_H} \quad I_B = \frac{U_B}{R_B} \quad k_M = \frac{M_H}{I_{\text{я}}} \quad (7.2)$$

$$k_E = \frac{30(U_{\text{я}} - R_{\text{я}}I_{\text{я}})}{\pi n_H} \quad L_{\text{я}} \approx \frac{30 U_{\text{я}} c_x}{\pi n_H I_{\text{я}}},$$

где  $c_x = 0.3-0.4$  — эмпирический коэффициент.

Передаточные функции скоростной части ДПТ по управляющему и возмущающему воздействиям могут быть представлены соответственно выражениями:

$$W(s) = \frac{\omega_m(s)}{u_{\text{я}}(s)} = \frac{1/k_E}{\frac{T_{\text{я}}}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1} \quad (7.3)$$

$$W'(s) = \frac{\omega_m(s)}{M_H(s)} = - \frac{(T_J s + 1) \cdot k_M}{\frac{T_J}{K_1 K_2 k_E} s^2 + \frac{1}{K_1 K_2 k_E} s + 1} \quad (7.4)$$

В выражениях (7.3), (7.4) введены обозначения:

$$K_1 = \frac{1}{R_J}, \quad K_2 = \frac{k_M}{J} \quad (7.5)$$

Корни характеристического уравнения определяются выражением

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2T_J} \mp \frac{1}{2T_J} \sqrt{1 - 4T_J K_1 K_2 k_E} \quad (7.6)$$

В зависимости от соотношения параметров  $K_1, K_2, T_J$  и  $k_E$  корни характеристического уравнения могут быть либо вещественными либо комплексно-сопряженными. При выполнении условия  $4T_J K_1 K_2 k_E \leq 1$  корни характеристического уравнения являются вещественными, эквивалентная передаточная функция ДПТ по управляющему воздействию может быть представлена в виде двух последовательно включенных апериодических звеньев первого порядка с постоянными времени  $T_1, T_2$  и коэффициентом передачи  $1/k_E$ .

$$W(s) = \frac{x(s)}{u_J(s)} = \frac{1/k_E}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (7.7)$$

где  $T_1 = -1/s_1, T_2 = -1/s_2$ .

В качестве примера рассмотрим двигатель мощностью 0,45 кВт (табл. 7.1) параметры структурной схемы, рассчитанные по выражениям (7.2), представлены в таблице 7.2.

$K_1$	$K_2$	$k_M$	$k_E$	$T_J$	$T_1$	$T_2$
1/Ом	1/Амс <sup>2</sup>	Нм/А	Вс	с	с	с
1.72	0.72	0.26	0.34	0.043	0.044	2.15

Таблица 7.2

Модель двигателя (*файл DC\_Mod*), построенная в соответствии в уравнением (7.1) представлена на рис. 7.1, а его динамические характеристики по управлению и по возмущению показаны на рис. 7.2, рис. 7.3.

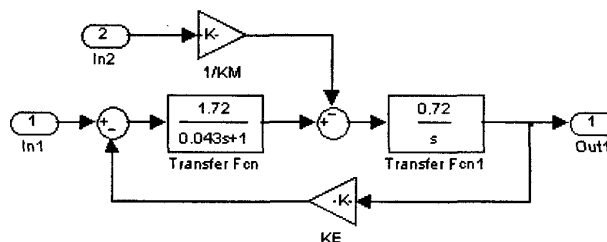


Рис. 7.1. Модель двигателя постоянного тока

Для получения динамических характеристик здесь используется пакет расширения Control System с его графическим интерфейсом, в котором эталонным сигналом является 1В.

Из характеристик (рис. 7.2, 7.3) видно, что по управлению и возмущению ДПТ с данными параметрами представляет собой апериодическое звено. Причем по возмущению коэффициент передачи более чем в 2 раза больше, чем по управлению.

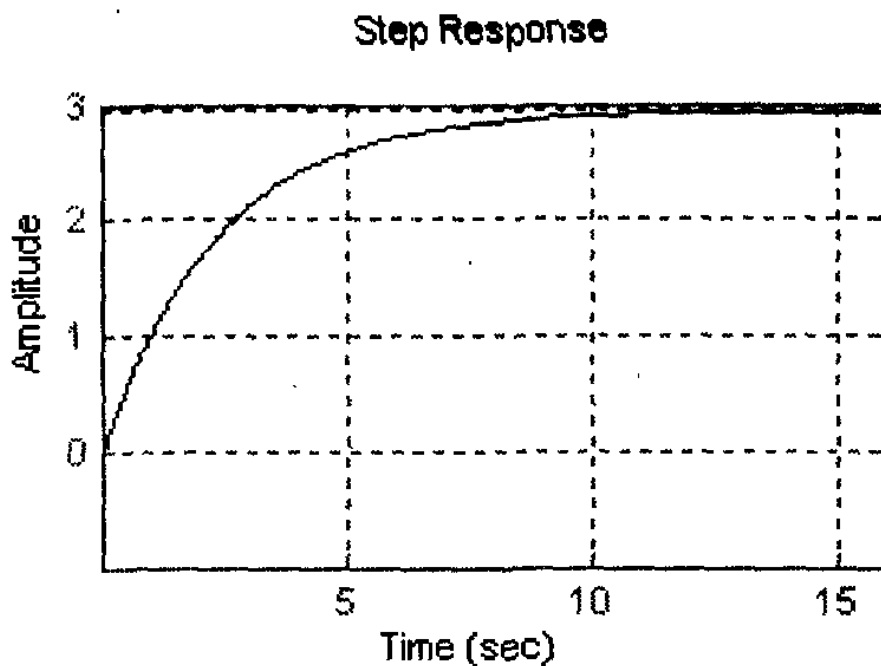


Рис. 7.2. Динамическая характеристика ДПТ по управлению

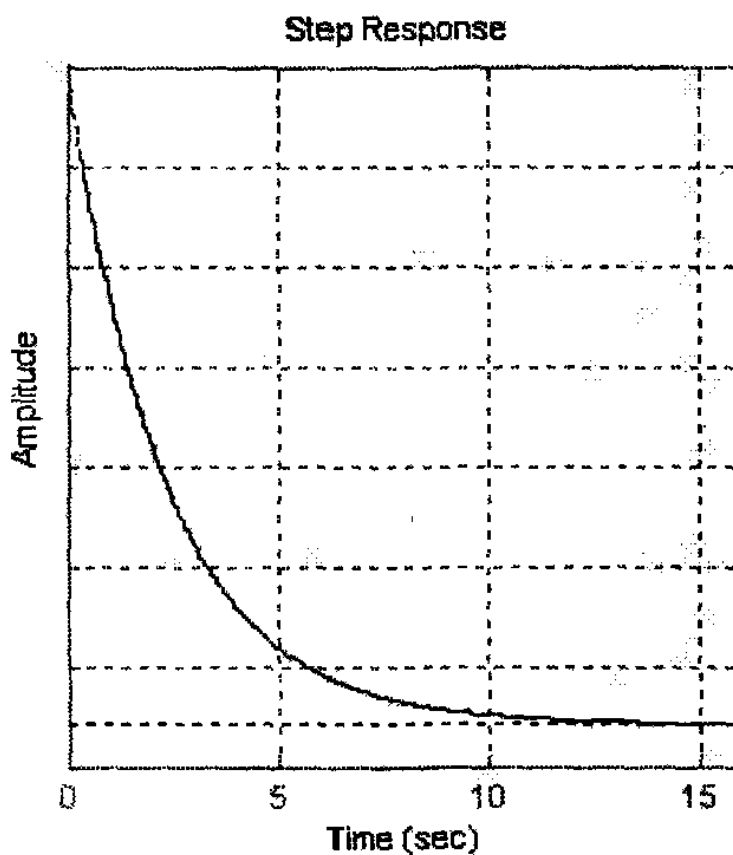


Рис. 7.3. Динамическая характеристика ДПТ по возмущению

Для придания скоростному контуру требуемых свойств используются регуляторы, структура и параметры которых зависят от параметров ДПТ и требований, предъявляемых к скоростному контуру.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.3.4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ

### ВОПРОСЫ

1. Синтез регуляторов в одноконтурной скоростной системе постоянного тока.
2. Синтез регуляторов в двухконтурной скоростной системе постоянного тока.

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Синтез регуляторов в одноконтурной скоростной системе постоянного тока

Структурная схема системы с исполнительным двигателем постоянного тока (ДПТ), управляемого по цепи якоря, представлена на рис. 7.4. Она включает сам двигатель, представленный последовательно включенными апериодическим звеном первого порядка и интегрирующим звеном, охваченными обратной связью через безинерционное звено ( $k_E$ ).

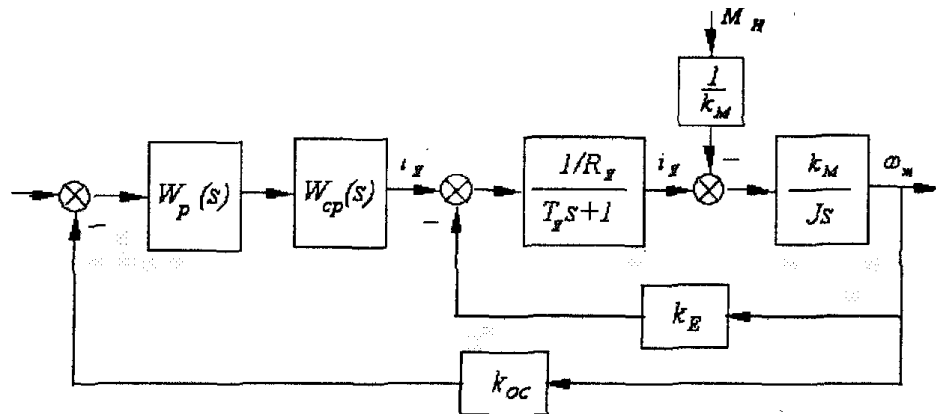


Рис. 7.4. Структурная схема одноконтурной скоростной системы постоянного тока

Двигатель постоянного тока управляется от силового регулятора, представленного звеном  $W_{cp}(s)$ . Силовой регулятор (в данном случае реверсивный широтно-импульсный преобразователь) управляется от регулятора с передаточной функцией  $W_p(s)$ , на вход которого подается разность сигнала управления и обратной связи по скорости.

Первоначально рассмотрим синтез регуляторов скоростной системы, в которой момент нагрузки является независимой от координат системы функцией. В этом случае момент нагрузки является возмущением, которое система должна компенсировать.

*Пример 7.1.* Для случая, когда постоянные времени сильно различаются  $T_2 \gg T_1$ , целесообразно строить ПИ регулятор (гл. 3), который компенсировал бы большую постоянную времени объекта

$$W_p(s) = \frac{(T_2s + 1) \cdot k_p}{T_2s} = k_p + \frac{k_p}{T_2s} = k_{\Pi} + \frac{k_{\text{И}}}{s}. \quad (7.8)$$

Тогда передаточная функция разомкнутой системы будет равна:

$$W_{\text{РАЗ}}(s) = \frac{(T_2s + 1) \cdot k_{cp} k_p k_{oc}}{T_2s} \cdot \frac{1/k_E}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1)} = \frac{k_{cp} k_p k_{oc} / k_E}{T_2s \cdot (T_1s + 1)} \quad (7.9)$$

Оптимум по модулю в такой системе достигается при  $\frac{T_2 k_E}{k_{cp} k_p k_{oc}} = 2T_1$ , откуда находятся

коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной части регулятора.

$$k_{\Pi} = k_p = \frac{T_2 k_E}{2T_1 k_{cp} k_{oc}}, \quad k_{\text{И}} = \frac{k_p}{T_2} \quad (7.10)$$

Модель одноконтурной скоростной системы (*файл DC\_Mod\_Reg1*) показана на рис. 7.5. Двигатель в модели представлен тремя звеньями (Transfer Fcn, Transfer Fcn1,  $k_r$ ). Момент нагрузки на двигатель моделируется двумя блоками (Step,  $1/k_m$ ). Силовой регулятор представлен безинерционным звеном ( $K_{cp}$ ) с насыщением, которое определяется конечной величиной напряжения питания силового регулятора.

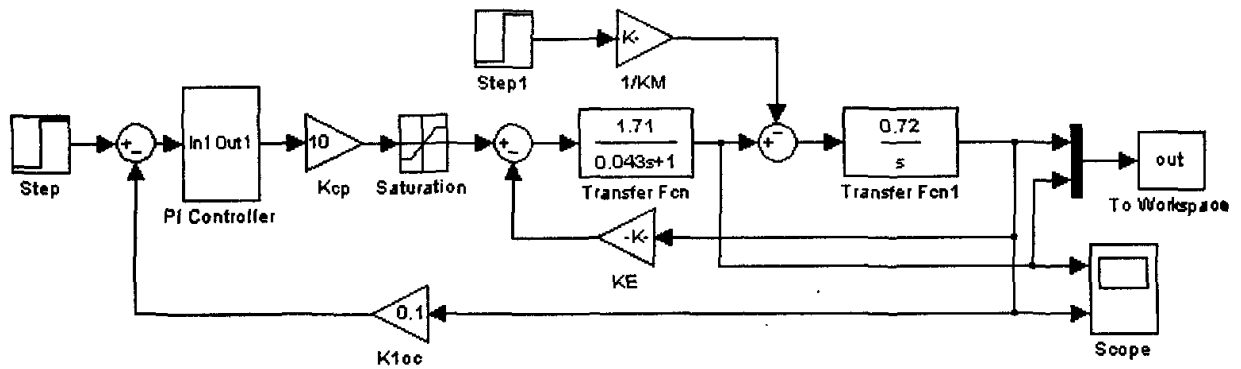


Рис.7.5. Модель одноконтурной скоростной системы постоянного тока

При  $k_{cp} = 10$ ,  $k_{oc} = 0,1$  параметры регулятора, рассчитанные по уравнению (7.10) будут равны  $k_{II} = 8,3$ ,  $k_{И} = 3,86$ , а переходные процессы в замкнутом скоростном контуре по току (моменту) и скорости при скачке входного сигнала в момент времени  $t = 0$  и скачке возмущающего сигнала (момента на валу ДПТ) в момент времени  $t = 0,5c$  представлены характеристиками на рис. 7.6.

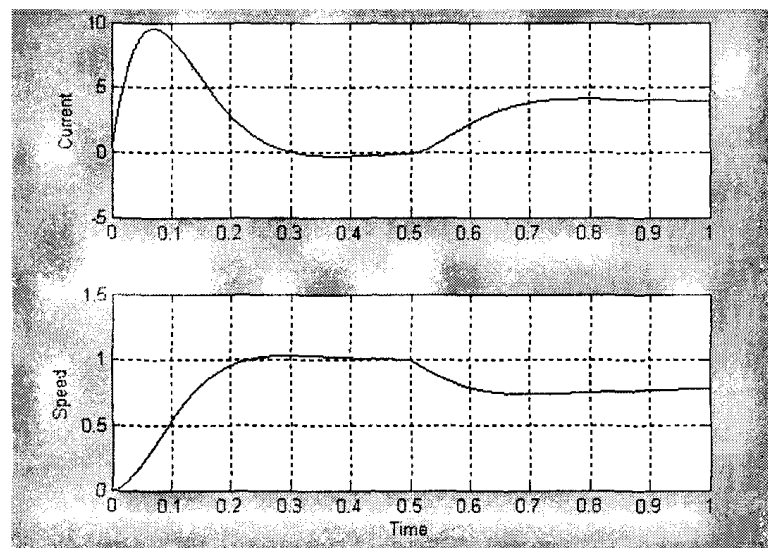


Рис. 7.6. Переходные процессы в одноконтурной скоростной системе постоянного тока при  $T_2 \gg T_1$

В замкнутой системе процесс по возмущению апериодический, при этом постоянная времени компенсации возмущающего сигнала приблизительно равна постоянной  $T_2$  двигателя.

Для проверки правильности расчета параметров регулятора с реальным ШИП следует использовать модели силового регулятора, полученные в гл. 5, (рис.5.41, 5.42). На рис. 7.7 показаны переходные процессы по скорости в замкнутой системе с симметричным и несимметричным ШИП, коэффициент усиления которых приняты равными  $k_{cp} = 10$ , т. е. такими же как в непрерывной модели рис. 7.6.

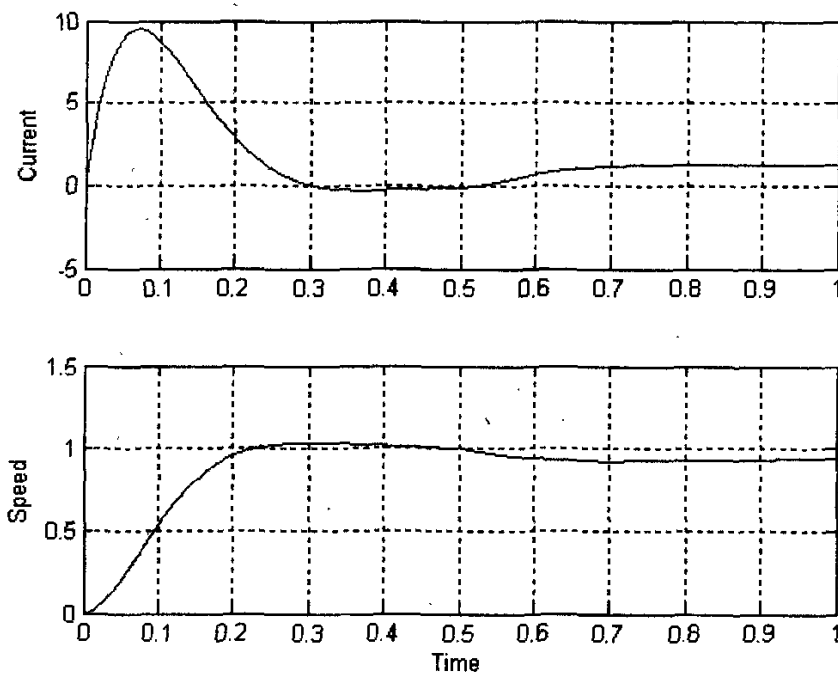


Рис. 7.7. Переходные процессы в одноконтурной системе постоянного тока с ШИП

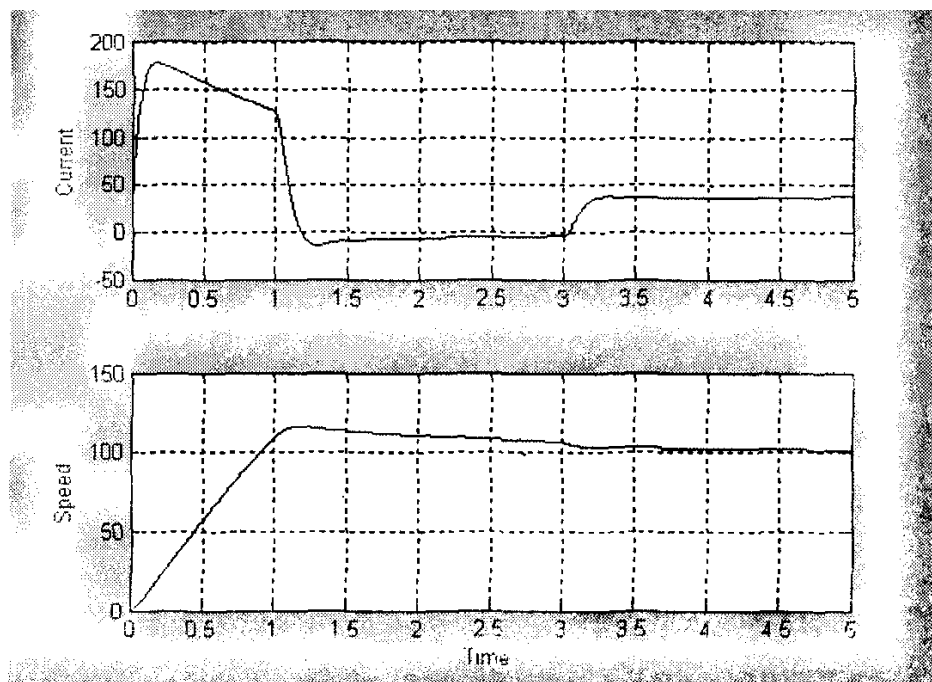


Рис. 7.8. Переходные процессы в одноконтурной скоростной системе постоянного тока «в большом»

Сравнение результатов моделирования непрерывной модели с безинерционным силовым регулятором и модели с «реальным» ШИП свидетельствует о достаточно хорошем совпадении этих результатов. Поэтому во многих практических случаях можно строить одноконтурную систему постоянного тока, считая ШИП безинерционным динамическим звеном.

При значительной величине входного сигнала в силовом преобразователе происходит ограничение напряжения, связанное с конечной величиной питания (в данном случае  $U_{\Pi} = 110 В$ ). Переходные процессы по управлению и возмущению (в «большом») для этого режима работы системы показаны на рис. 7.8

При анализе нелинейной системы важно убедиться в ее устойчивости. Поэтому вывод о том, что система остается устойчивой в «большом» можно считать достаточным при исследовании. При нарастании скорости на интервале от 0 до 1,0 с в осциллограмме тока явно прослеживается влияние противо ЭДС.

*Пример 7.2.* В случае, когда эквивалентные постоянные времени различаются незначительно для придания звену второго порядка, описанного уравнением (7.3), заданных динамических качеств, как это следует из материалов гл.3, необходимо использовать ПИД регулятор с передаточной функцией

$$W_p(s) = k_{\Pi} + \frac{k_{И}}{s} + \frac{k_D s}{T_D s + 1} = \frac{k_{И}}{s} \times \frac{\frac{k_D + T_D \cdot k_{\Pi}}{k_{И}} s^2 + \frac{k_{\Pi} + T_D \cdot k_{И}}{k_{И}} s + 1}{T_D s + 1} \quad (7.11)$$

Параметры регулятора, обеспечивающие оптимум по модулю в замкнутой скоростной системе, рассчитываются по уравнениям:

$$T_D < T_1, \quad k_{И} = \frac{k_E}{2T_D k_{cp} k_{oc}}, \quad (7.12)$$

$$\frac{k_D + T_D \cdot k_{\Pi}}{k_{И}} = T_1 T_2, \quad \frac{k_{\Pi} + T_D \cdot k_{И}}{k_{И}} = T_1 + T_2.$$

Рассмотрим предыдущий пример с электромагнитной постоянной якорной цепи  $T_{я} = 0,43$ , тогда  $T_1 = 0,56$ ,  $T_2 = 1,71$ .

Приняв  $T_D = 0,01$ ,  $K_{cp} = 10$ ,  $K_{oc} = 0,1$ , определим  $k_{И} = 17$ ,  $k_{\Pi} = 38,42$ ,  $k_D = 16,2$

На рис. 7.9 показаны динамические характеристики замкнутой скоростной системы в «малом» (*файл DC\_Mod\_Reg1a*). Следует отметить, что наличие дифференцирующего звена в регуляторе значительно сужает линейную область работы системы по входному сигналу.

Динамические процессы в системе в «большом» представлены на рис. 7.10.

Здесь так же как и в предыдущем примере выход системы в насыщение не приводит в потере устойчивости.

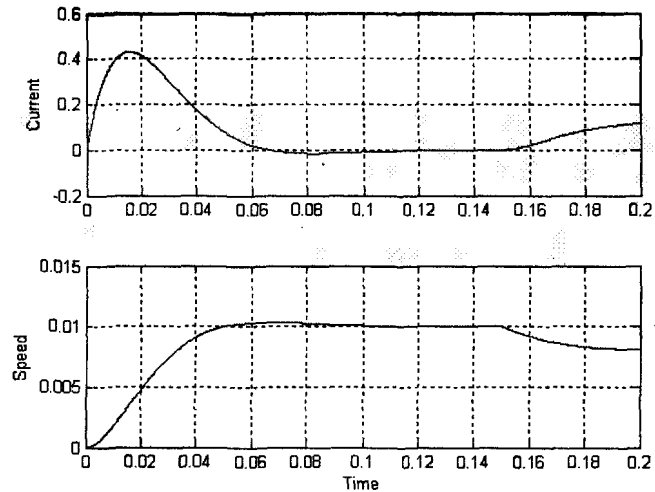


Рис. 7.9. Переходные процессы в одноконтурной скоростной системе постоянного тока при  $T_2 \geq T_1$

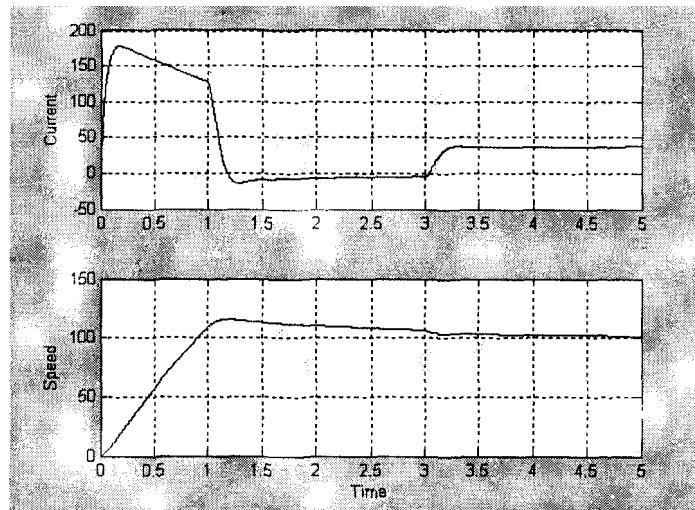


Рис. 7.10. Переходные процессы в одноконтурной скоростной системе постоянного тока «в большом»

При  $4T_{\text{я}}K_1K_2k_E > 1$  корни характеристического уравнения являются комплексно-сопряженными, эквивалентная передаточная функция ДПТ по управляющему воздействию может быть представлена в виде колебательного звена с параметрами  $T, \xi$  и коэффициентом передачи  $1/k_E$

$$W(s) = \frac{\omega_m(s)}{u_{\text{я}}(s)} = \frac{1/k_E}{T^2s^2 + 2\xi Ts + 1}, \quad (7.13)$$

где  $T = \sqrt{T_{\text{я}}/K_1K_2k_E}$ ,  $\xi = 1/\sqrt{4T_{\text{я}}K_1K_2k_E}$ .

Для такой системы (см. табл. Гл. 3) используется ПИД регулятор с реальным дифференцирующим звеном, параметры такого регулятора выбираются в соответствии с требованиями к динамике замкнутой системы (табл.3.2, гл. 3). Например, при настройке скоростной системы на оптимум по модулю параметры ПИД регулятора находятся из уравнений:

$$T_D < 2\xi T, \quad k_H = \frac{k_E}{2T_D k_{cp} k_{oc}}, \quad \frac{k_D + T_D \cdot k_{\Pi}}{k_H} = T^2, \quad \frac{k_{\Pi} + T_D \cdot k_H}{k_H} = 2\xi T. \quad (7.14)$$

Динамические свойства такой системы качественно не отличаются от рассмотренных в примере 7.2.

Переоборудование непрерывного регулятора из примера 7.1 к цифровому не приводит к существенному изменению динамических характеристик замкнутой системы, если период дискретизации определяется из условия  $T \leq 0.1T_1$ . На рис. 7.11 для сравнения представлены две модели. Верхняя из них повторяет модель (рис. 7.5), в ней силовой регулятор (ШИП) представлен непрерывным безинерционным звеном. Регулятор в этой модели также непрерывный, синтезирован в соответствии выражениями примера 7.1. Нижняя модель содержит «реальный» ШИП и переоборудованный цифровой регулятор. Модель находится в файле *DC\_Mod\_Reg1D*.

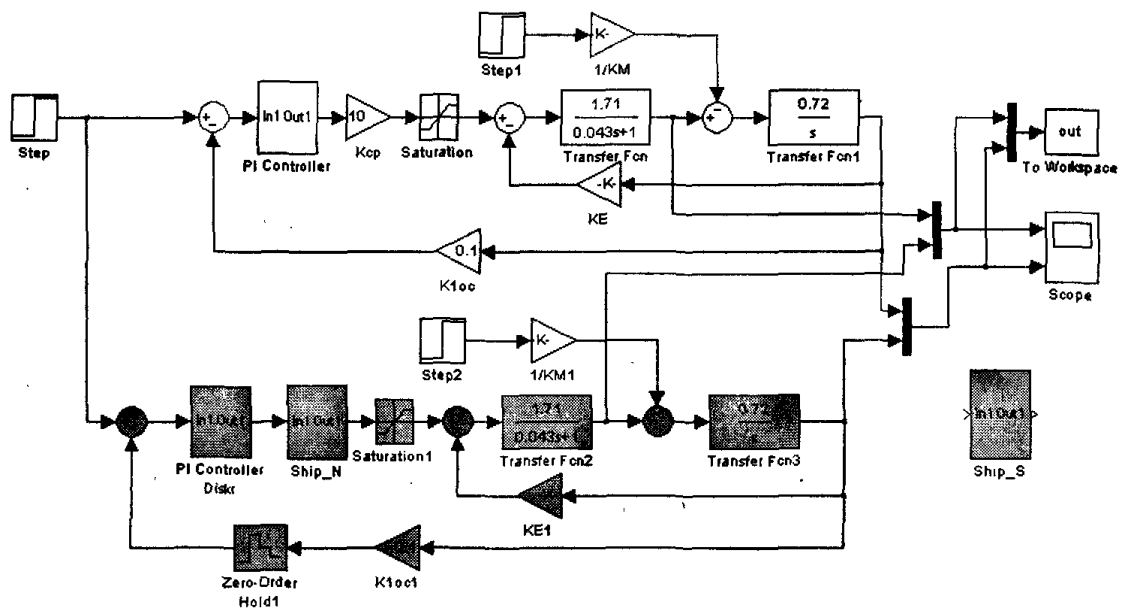


Рис. 7.11. Непрерывная и цифровая модели одноконтурной скоростной системы постоянного тока

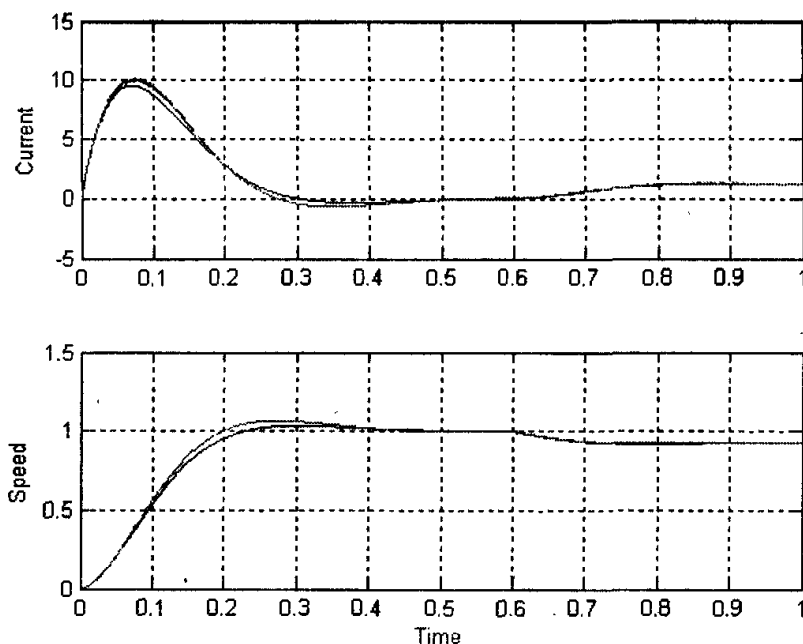


Рис. 7.12. Переходные процессы в одноконтурной скоростной системе с непрерывным и цифровым регуляторами

Результаты моделирования показаны на рис. 7.12. Из сравнения результатов видно, что система с «реальным» ШИП и цифровым регулятором имеет несколько большее перерегулирование и меньшее время первого согласования.

При переоборудовании непрерывного регулятора к цифровому для системы из примера 7.2 период дискретизации следует определять из условия  $T < 0.1T_D$ . В этом случае практически не наблюдается изменения динамики, в чем можно убедиться, запустив (файл *DC\_Mod\_Reg1aD*). В этой же модели имеются функциональные схемы симметричного и несимметричного ШИП. Если любой из этих ШИП включить в модель вместо непрерывного силового регулятора, то можно убедиться в том, что динамика системы не изменится.

### 7.3. Синтез регуляторов в двухконтурной скоростной системе постоянного тока

Когда инерционностью силового регулятора пренебречь нельзя, в скоростном контуре ДПТ используется двухконтурный регулятор (рис. 7.13). При этом первый контур называется токовым, второй — скоростным.

Такое построение дает ряд преимуществ перед одноконтурной системой.

Во-первых, в токовом контуре существенно снижаются влияние нелинейностей и запаздывания, которые может вносить силовой регулятор.

Во-вторых, в такой структуре просто реализуется ограничение тока якоря ДПТ, что практически всегда требуется в реальных системах.

В-третьих, при таком построении практически исключается влияние скорости на ток якоря (разрывается связь по  $k_E$ ), двигатель может быть представлен

двумя последовательно включенными динамическими звеньями. Первое звено апериодическое с постоянной времени  $T_{\gamma}$ , второе — интегрирующее (рис.7.13). Синтез регуляторов в такой структуре не зависит от соотношения постоянных времени и осуществляется по единой методике.

Когда в качестве силового регулятора используется широтно-импульсный преобразователь (ШИП), в токовом контуре можно использовать релейный регулятор. В этом случае токовый контур становится практически безынерционным, силовой регулятор приобретает свойства источника тока, а ДПТ — источника момента.

В-четвертых, для придания замкнутой системе заданных динамических характеристик в регуляторах исключаются дифференцирующие звенья, что улучшает помехоустойчивость и расширяет динамический диапазон работы системы.

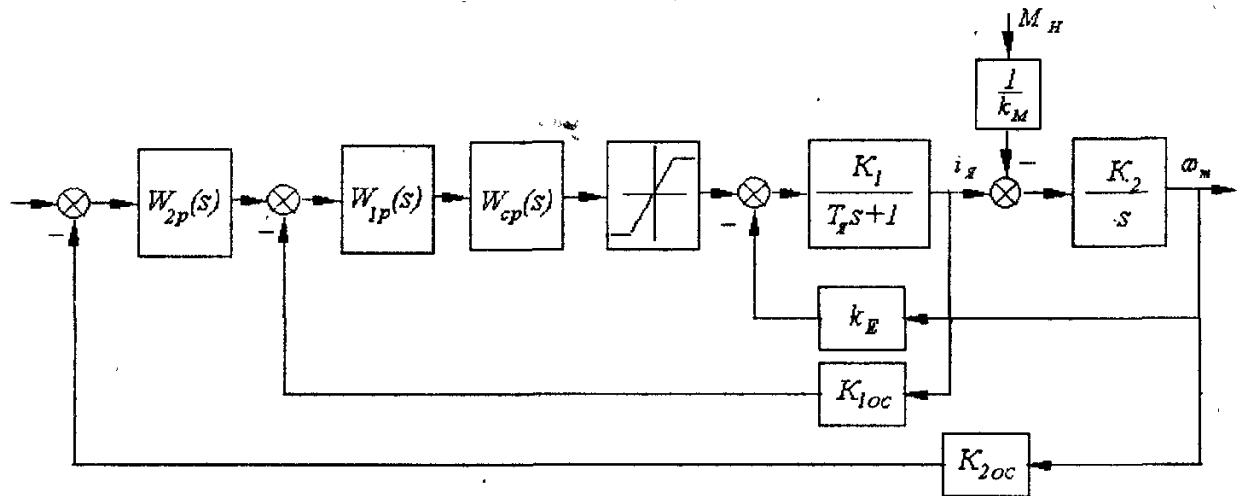


Рис. 7.13. Двухконтурная скоростная система постоянного тока

**Пример 7.3** Рассмотрим пример, где в качестве силового регулятора используется широтно-импульсный преобразователь (ШИП). Широтно-импульсный преобразователь представим звеном с запаздыванием на период коммутации  $T_{cp}$  и коэффициентом усиления  $k_{cp}$ . Кроме того, учтем насыщение, которое обусловлено конечной величиной напряжения питания ШИП и ограничение, которое осуществляется в системе. Постоянная времени запаздывания звена определяется частотой коммутации. Зададимся частотой коммутации 500 Гц, тогда  $T_{cp} = 0,002c$ .

При синтезе регулятора токового контура представим ШИП апериодическим

звеном с передаточной функцией  $W_{cp}(s) = \frac{k_{cp}}{T_{cp}s + 1}$ , тогда передаточная функция разомкнутого внутреннего (токового) контура будет равна

$$W_{PA3}(s) = \frac{W_{1p}(s)k_{cp}k_{loc}K_1}{(T_{cp}s + 1)(T_{\gamma}s + 1)}. \quad (7.15)$$

Для рассматриваемого ДПТ  $T_{\gamma} \gg T_{cp}$  и методика синтеза регулятора аналогична той, которая рассмотрена в примере 7.1.

При использовании ПИ регулятора с параметрами  $W_{1p}(s) = \frac{k_{1p}(T_{Я}s + 1)}{T_{Я}s}$  получим

$$W_{PA3}(s) = \frac{k_{1p}k_{cp}k_{1oc}K_1}{T_{Я}s(T_{cp}s + 1)} \quad (7.16)$$

Настройка замкнутого контура на оптимум по модулю реализуется при

$$k_{1p} = \frac{T_{Я}}{2T_{cp}k_{cp}k_{1oc}K_1} \quad (7.17)$$

При этом замкнутый внутренний контур может быть представлен передаточной функцией

$$W_{1з}(s) = \frac{1}{k_{1oc}} \frac{1}{2T_{cp}^2s^2 + 2T_{cp}s + 1} \approx \frac{1}{k_{1oc}} \frac{1}{2T_{cp}s + 1} \quad (7.18)$$

Для реализации оптимума по модулю во внешнем (скоростном) контуре нужно использовать П регулятор с коэффициентом усиления  $k_{2p} = \frac{k_{1oc}}{4T_{cp}K_2k_{2oc}}$ .

Модель двухконтурной системы (*файл DC\_Mod\_Reg2*) показана на рис. 7.14. Переходные процессы в модели двухконтурной системы в «малом» при  $T_{Я} = 0,043, T_{cp} = 0,002, k_{cp} = 10, k_{1oc} = 0,1, k_{2oc} = 0,05, k_{1p} = k_{1П} = 6,28, k_{1И} = 146,1, k_{2p} = 347,2$  показаны на рис. 7.15

Переходные процессы в «большом» показаны на рис. 7.16. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что на ток (момент) не влияет противо ЭДС двигателя.

В замкнутой системе наблюдается статическая ошибка по возмущению.

Передаточная функция по возмущению для рассмотренной системы определяется из выражения:

$$W'(s) = \frac{\Delta\omega_m}{\Delta M_H} = \frac{-k_{1oc}}{k_M k_{2oc} k_{2p}} \frac{2T_{cp}s + 1}{2T_2 T_{cp} s^2 + T_2 s + 1}, \quad (7.19)$$

где  $T_2 = \frac{J \cdot k_{1oc}}{k_M k_{2oc} k_{2p}}$ .

Из выражения (7.19) следует, что по возмущению система является статической и провал скорости в установившемся режиме равен:

$$\Delta\omega_m = \frac{-k_{1oc}}{k_M k_{2oc} k_{2p}} \Delta M_H. \quad (7.20)$$

Для компенсации ошибки по скорости во внешний скоростной канал следует включить интегральную составляющую. Тогда передаточная функция замкнутой системы по возмущению будет равна

$$W'(s) = \frac{\Delta\omega_m}{\Delta M_H} = \frac{-k_{1oc}}{k_M k_{2oc} k_{2p}} \frac{2T_2 T_{cp} s^2 + T_2 s}{2T_2 T_{cp} T_{cp} s^3 + T_2 T_2 p s^2 + T_2 p s + 1} \quad (7.21)$$

где  $T_{2p}$  — постоянная времени ПИ регулятора в канале скорости.

Если задать  $T_{2p} \gg T_{cp}$ , то

$$W'(s) = \frac{\Delta\omega_m}{\Delta M_H} \approx \frac{-k_{loc}}{k_M k_{2oc} k_{2p}} \frac{T_{2p}s}{T_2 T_{2p} s^2 + T_{2p}s + 1} \quad (7.22)$$

На рис. 7.17 показан переходной процесс при использовании ПИ регулятора во внешнем канале. Добавление интегральной составляющей во внешнем регуляторе приводит одновременно к изменению параметров переходного процесса по управлению.

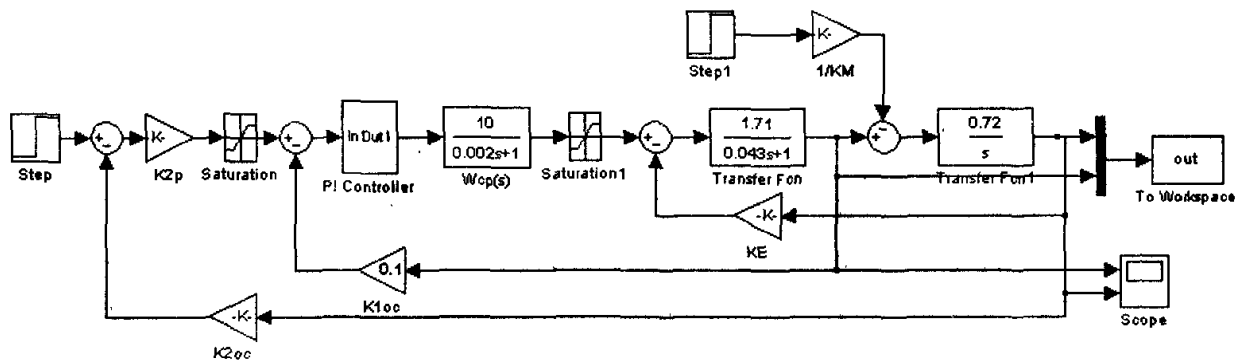


Рис. 7.14. Модель двухконтурной скоростной системы постоянного тока

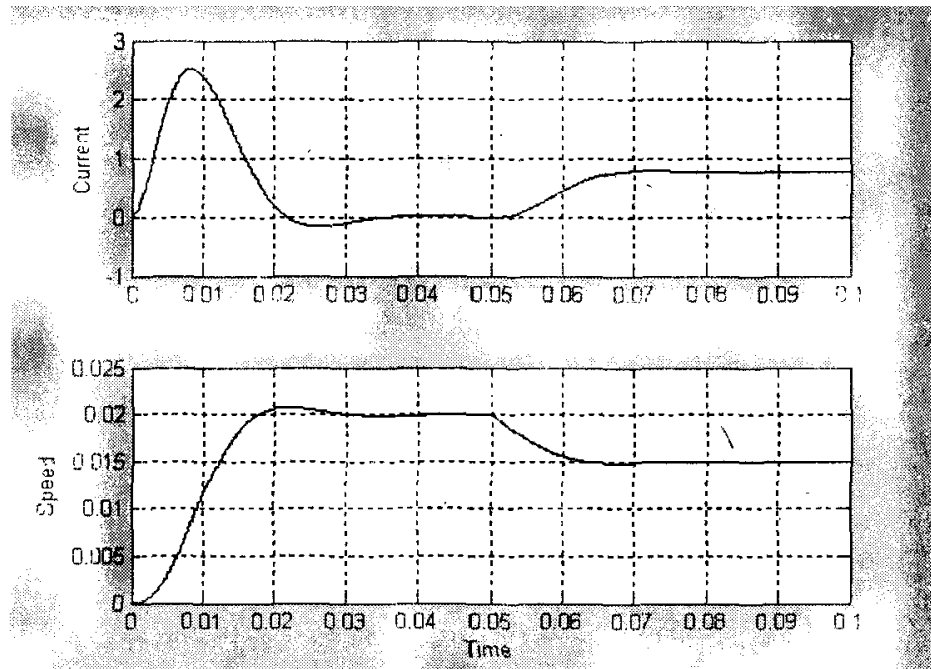


Рис. 7.15. Переходные процессы в двухконтурной скоростной системе постоянного тока

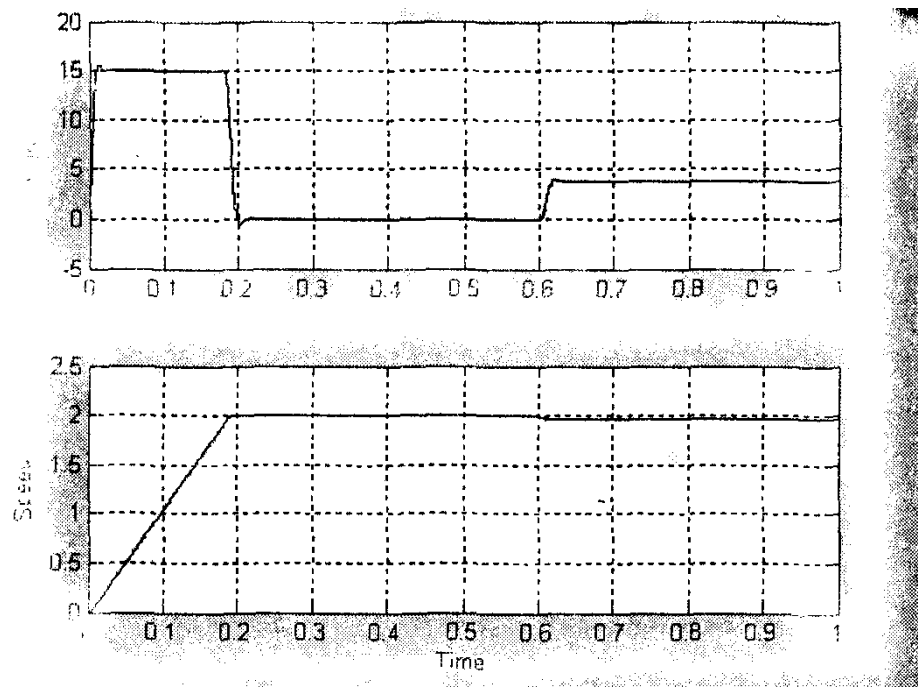


Рис. 7.16. Переходные процессы в двухконтурной скоростной системе «в большом»

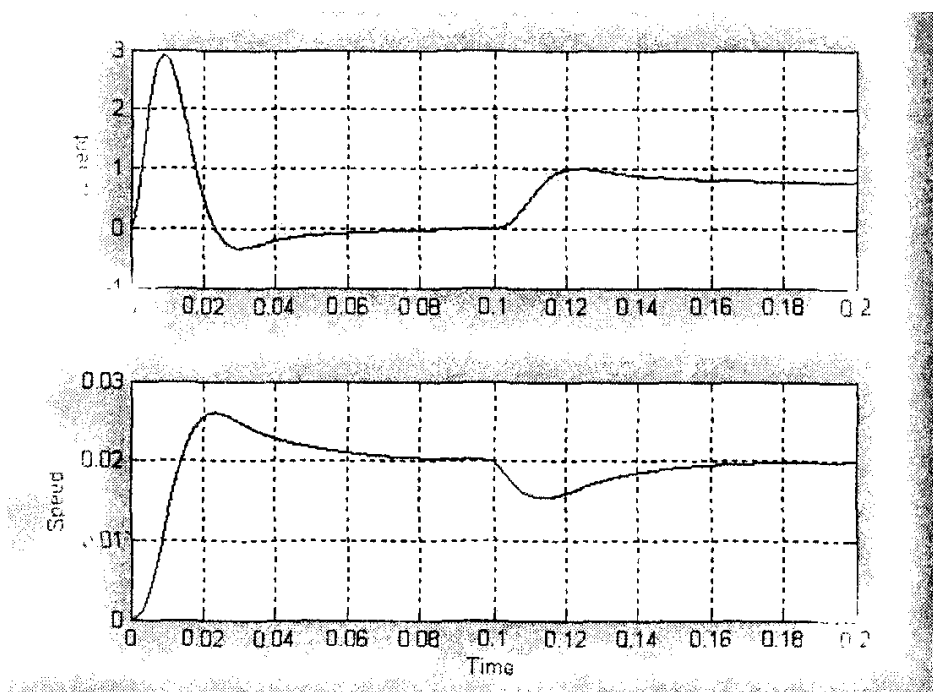


Рис. 7.17. Переходные процессы в двухконтурной скоростной системе с ПИ регулятором скорости

Переоборудование непрерывных регуляторов из примера 7.3 к цифровым и замена силового непрерывного регулятора «реальным» ШИП не приводит к заметному изменению динамики замкнутой системы при  $T < T_{cr}$ , в чем можно убедиться, запустив файл (*DC\_Mod\_Reg2D*)

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.3.5. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ В СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЕ

### ВОПРОСЫ

1. Синтез регуляторов в следящей системе постоянного тока.
2. Синтез регуляторов в следящей робототехнической системе постоянного тока.

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Синтез регуляторов в следящей системе постоянного тока

Выше рассмотрены типовые скоростные системы постоянного тока. Такие системы широко используются для стабилизации или регулирования скорости различных механизмов.

Следящие системы (системы, замкнутые по углу) широко используются при построении систем управления положением различных механизмов. Рассмотрим этот вопрос на примере построения следящей системы с широтно-импульсным преобразователем и релейным регулятором в контуре тока.

В этом случае контур тока можно считать безинерционным, а силовой регулятор — источником тока. Структурная схема такой системы представлена на рис. 7.18.

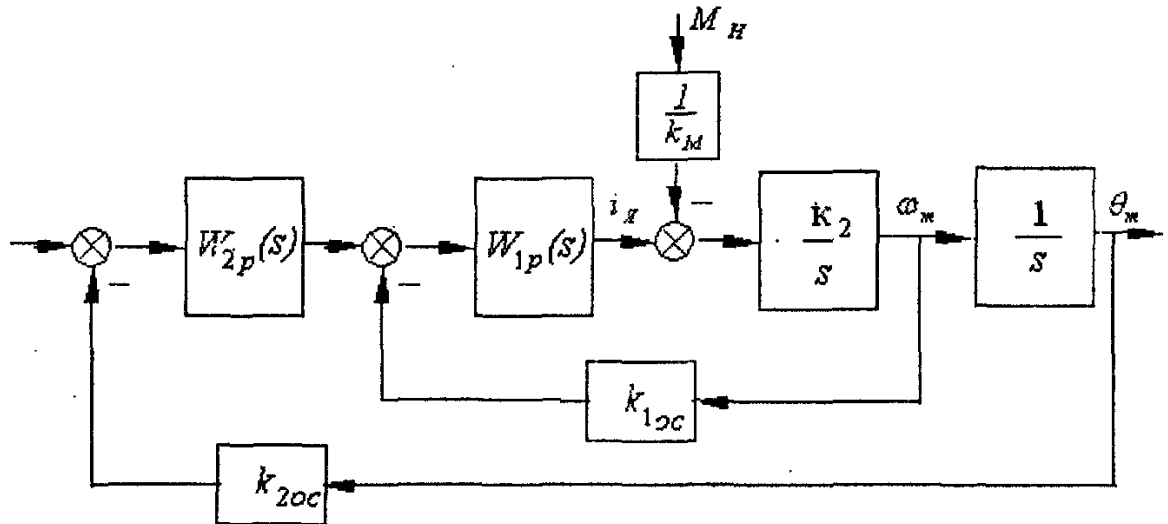


Рис. 7.18. Структурная схема следящей системы постоянного тока

*Пример 7.4.* Замкнутая структура содержит скоростной и угловой контуры, регуляторы в которых требуется синтезировать. Регулятор в скоростном контуре выберем так, чтобы разомкнутый контур удовлетворял требованию оп-

тимума по модулю  $W_{1p}(s) = \frac{k_{1p}}{(T_p s + 1)}$ , тогда

$$W_{1раз}(s) = \frac{k_{1p} K_2 k_{1oc}}{s(T_p s + 1)} = \frac{1}{2T_p (T_p s + 1)}, \quad (7.23)$$

Задавшись  $T_p = 0,01c.$ ,  $k_{1oc} = 1,0$ , определим  $k_{1p} = \frac{1}{2T_p K_2 k_{1oc}} = 70$ .

Аналогично предыдущему синтезируется внешний (угловой) контур при  $k_{2oc} = 1,0$ ,  $k_{2p} = \frac{1}{4T_p k_{2oc}} = 25$ .

Модель следящей системы показана на рис. 7.19 (*файл DC\_Mod\_Reg3*)

Переходные процессы в системе в «малом» представлены на рис. 7.20.

Так же как и в рассмотренных ранее примерах, здесь для ограничения максимального тока якоря на входе релейного регулятора тока включено звено с насыщением. Переходной процесс в системе в «большом» представлен на рис. 7.21, из которого следует, что по углу наблюдается большое перерегулирование. Для достижения приемлемых динамических характеристик в «большом» приходится включать нелинейные корректирующие устройства. Одна из многочисленных возможностей решения этой проблемы будет рассмотрена далее при синтезе регулятора для управления звеном робота.

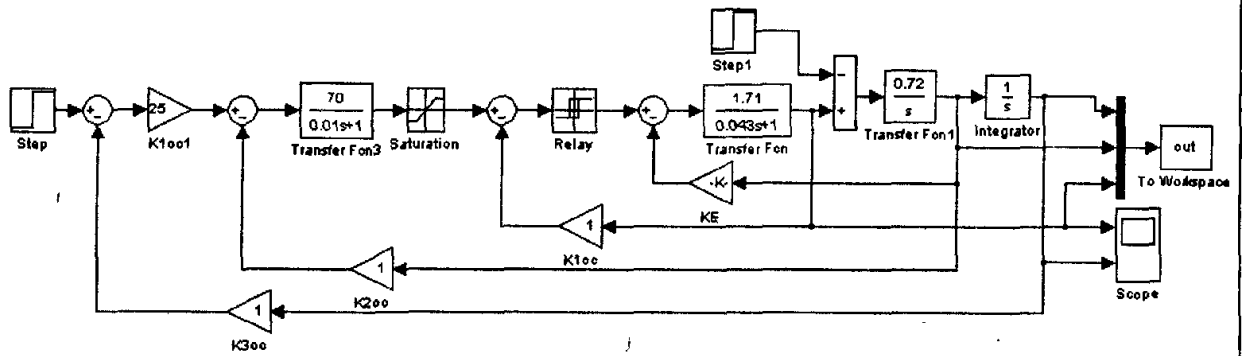


Рис. 7.19. Модель следящей системы постоянного тока

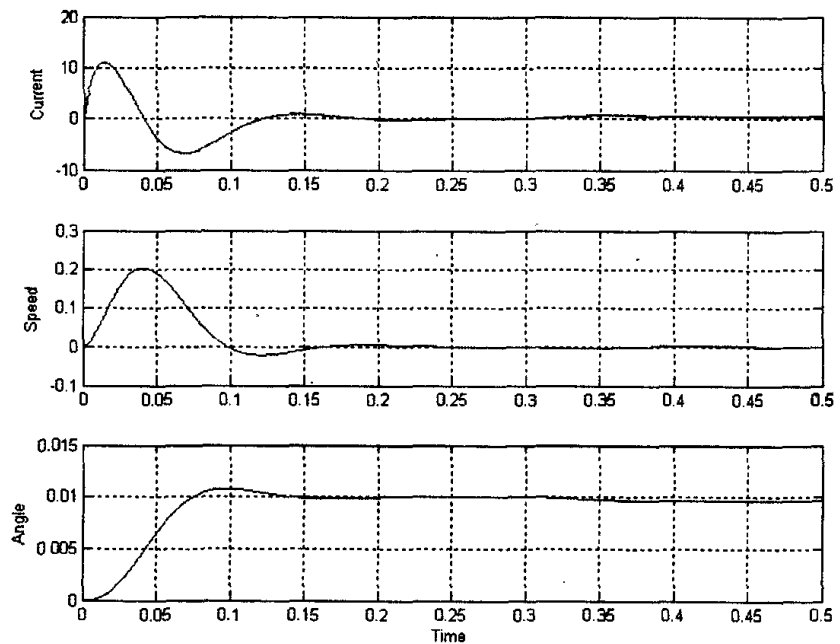


Рис. 7.20. Переходные процессы в следящей системе постоянного тока

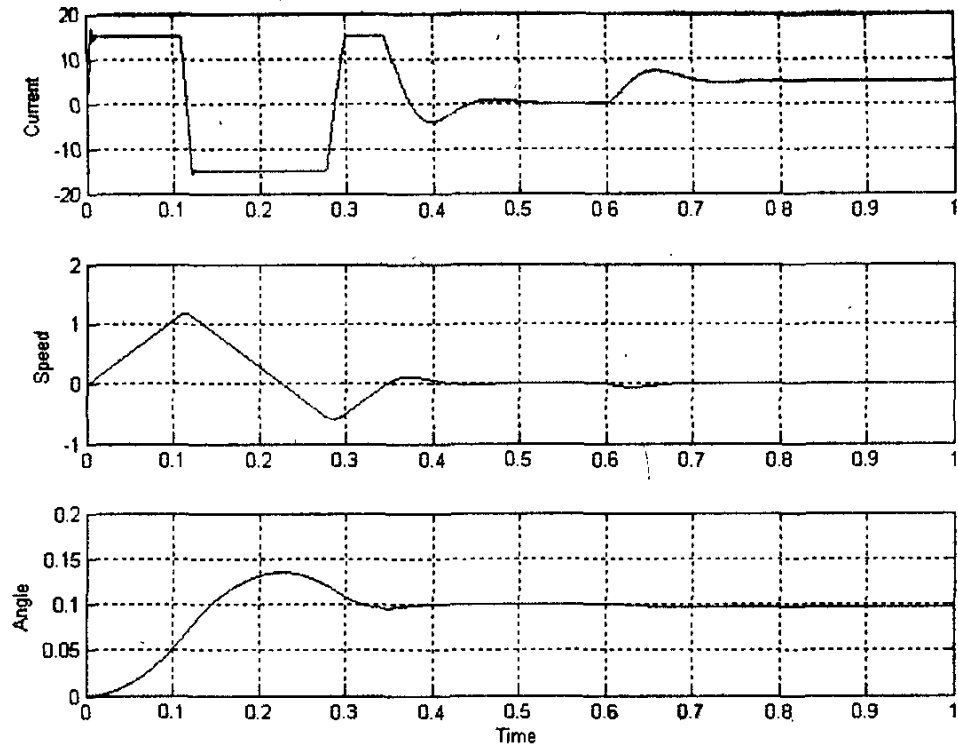


Рис. 7.21. Переходные процессы в следящей системе постоянного тока «в большом»

Характеристики системы по возмущению аналогичны рассмотренным в примере 7.3. При пропорциональном регуляторе положения система по возмущению статическая. Введение интегральной составляющей в регулятор положения делает систему астатической.

Модель системы с переоборудованным регулятором скорости приведена в файле *DC\_Mod\_Reg3D*. Динамика цифровой системы остается такой же, как в системе непрерывной при значении периода дискретизации, удовлетворяющего равенству  $T \leq 0.1T_p$ .

### 7.5. Синтез регуляторов в следящей робототехнической системе постоянного тока

В робототехнических системах, как правило, двигатель соединен с исполнительным механизмом напрямую (без редуктора).

Математическое описание одного звена робота имеет вид.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + C_1 \omega_m + C_2 \sin \theta_m = k_M i_{\text{Я}}, \quad (7.24)$$

где  $J$  — суммарный момент инерции якоря и механического звена робота,

$i_{\text{Я}}$  — ток якоря,  $\theta_m = \int \omega_m dt$  — угол поворота звена робота. Ток якоря ДПТ находится из уравнения

$$T_{\text{Я}} \frac{di_{\text{Я}}}{dt} + i_{\text{Я}} + \frac{k_E}{R_{\text{Я}}} \omega_m = \frac{u_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}}. \quad (7.25)$$

По уравнениям (7.24) и (7.25) на рис.7.22 построена модель (файл *Robot\_Mod*) объекта управления, состоящая из двигателя мощностью 0,45 кВт и звена робота.

Переходной процесс в системе при  $C_1 = 0,1, C_2 = 3.2$  и малых углах поворота звена робота представлен на рис. 7.23. Приведенный пример показывает, что двигатель с учетом нагрузки на его валу может стать достаточно колебательным динамическим звеном.

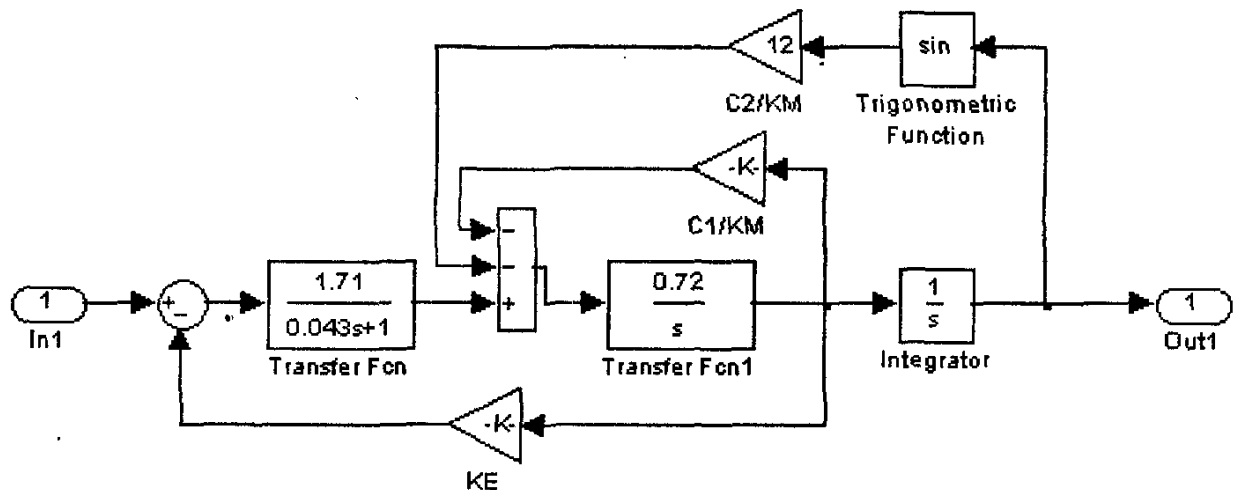


Рис. 7.22. Модель звена робота

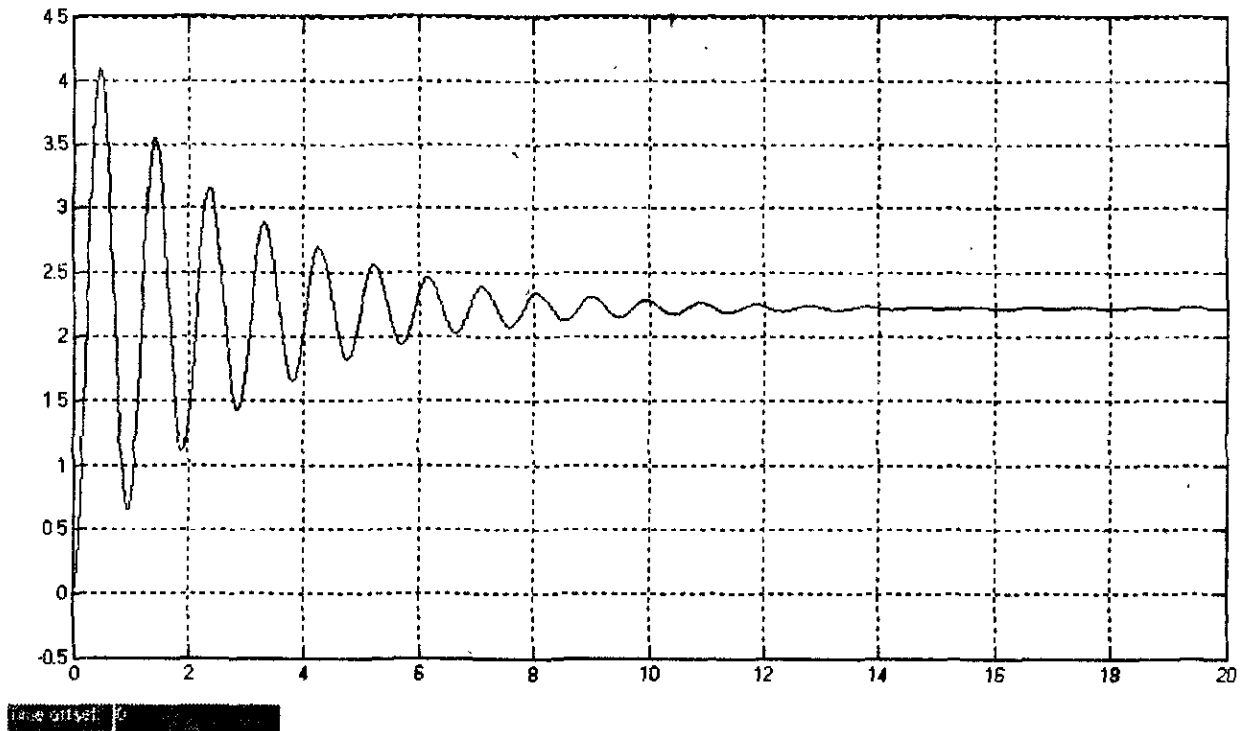


Рис. 7.23. Переходной процесс звена робота по управлению

**Пример 7.5.** Синтез регулятора при наличии датчиков по всем переменным состояниям.

Первоначально спроектируем систему подчиненного управления, модель которой показана на рис. 7.24 (файл *Robot\_Mod\_Reg3*).

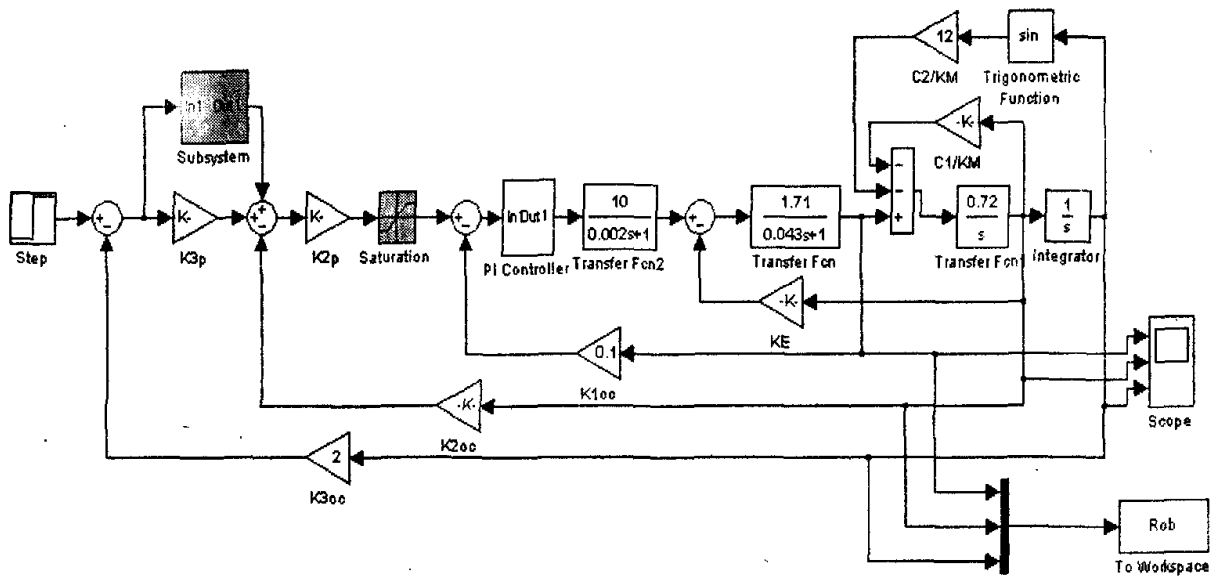


Рис. 7.24 Модель подчиненной структуры управления роботом

В этой модели имеется три контура:

1. Контур тока.
2. Контур скорости.
3. Контур положения.

Рассмотрим пример, когда в качестве силового регулятора в контуре тока используется широтно-импульсный преобразователь (ШИП).

Этот ШИП представим апериодическим звеном с насыщением и с передаточной функцией  $W_{cp}(s) = \frac{k_{cp}}{T_{cp}s + 1}$ . Постоянная времени

звена определяется частотой коммутации. Зададимся частотой коммутации 500 Гц, тогда  $T_{cp} = 0,002c$ .

Первоначально проведем синтез регуляторов в системе в линейной зоне (в «малом») при отсутствии затемненных блоков, а затем рассмотрим вопросы синтеза в нелинейной зоне (в «большом»).

*Синтез регуляторов в системе в линейной зоне.*

Передаточная функция объекта регулирования в первом контуре равна

$$W_1(s) = \frac{k_{cp}}{T_{cp}s + 1} \cdot \frac{K_1}{T_Js + 1}, \text{ в котором}$$

$$k_{cp} = 10, T_{cp} = 0,002c., K_1 = 1,71, T_J = 0,043c.$$

Поскольку  $T_{\text{я}} \gg T'_{\text{cp}}$ , то в соответствии с положениями, изложенными выше, в качестве регулятора выбираем ПИ регулятор с передаточной функцией

$$W_{1p}(s) = \frac{(T_{\text{я}}s + 1) \cdot k_{1p}}{T_{\text{я}}s} = k_{1p} + \frac{k_{1p}}{T_{\text{я}}s} = k_{1п} + \frac{k_{1и}}{s}. \quad (7.26)$$

Оптимум по модулю в замкнутом токовом контуре достигается при

$$k_{1p} = \frac{T_{\text{я}}}{2T_{\text{cp}}k_{\text{cp}}K_1k_{1\text{oc}}}. \quad (7.27)$$

Для  $k_{1\text{oc}} = 0,1$ , получим  $k_{1p} = k_{1п} = 6,29$ ,  $k_{1и} = 146,1$ .

Оптимизированный по модулю замкнутый токовый контур может быть представлен передаточной функцией

$$W_{1\text{зам}}(s) \approx \frac{1/k_{1\text{oc}}}{2T_{\text{cp}}s + 1} \quad (7.28)$$

Следует подчеркнуть, что в подчиненном контуре при наличии обратной связи практически компенсировано влияние противо ЭДС двигателя.

Передаточная функция объекта регулирования во втором (скоростном) контуре определится из выражения  $W_2(s) = \frac{K_2/k_{1\text{oc}}}{s(2T_{\text{cp}}s + 1)}$ .

Второй (скоростной) контур настраиваем так же на optimum по модулю. В этом случае регулятор должен быть пропорциональным с коэффициентом усиления

$k_{2p} = \frac{k_{1\text{oc}}}{4T_{\text{cp}}K_2k_{2\text{oc}}} = 347$  при  $k_{2\text{oc}} = 0,05$ , а передаточная функция объекта, состоящего из первого и второго контура, определится выражением

$$W_{2\text{зам}}(s) \approx \frac{1/k_{2\text{oc}}}{4T_{\text{cp}}s + 1}$$

Передаточная функция объекта регулирования в разомкнутом контуре положения с учетом предыдущего уравнения определится выражением

$$W_3(s) = \frac{1/k_{2\text{oc}}}{s(4T_{\text{cp}}s + 1)}. \quad (7.29)$$

Для оптимизации по модулю регулятор должен быть пропорциональным с

коэффициентом усиления  $k_{3p} = \frac{k_{2\text{oc}}}{8T_{\text{cp}}k_{3\text{oc}}}$ .

Переходные процессы по току (моменту), скорости и углу в замкнутой системе показаны на рис. 7.25.

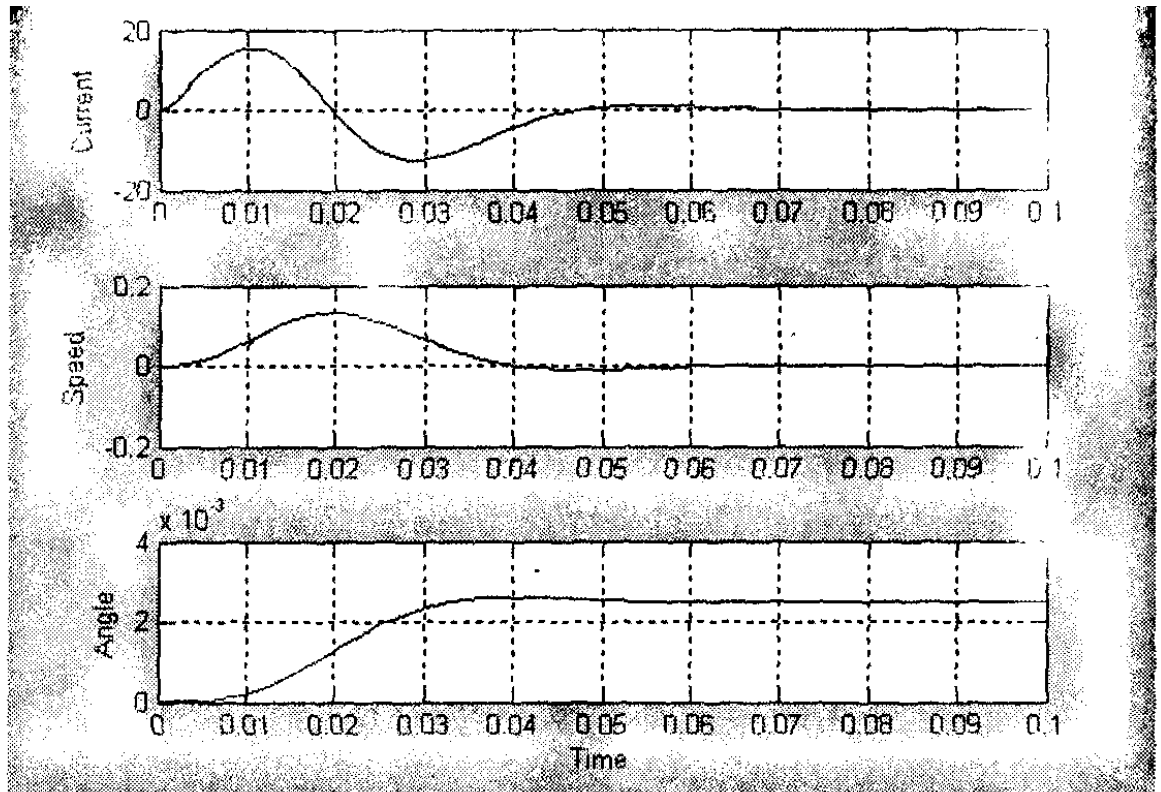


Рис. 7.25. Переходные процессы в замкнутой робототехнической системе

*Синтез регуляторов в системе в нелинейной зоне.*

Первоначально рассмотрим процессы в системе без учета звена, которое обозначено Subsystem на рис. 7.24.

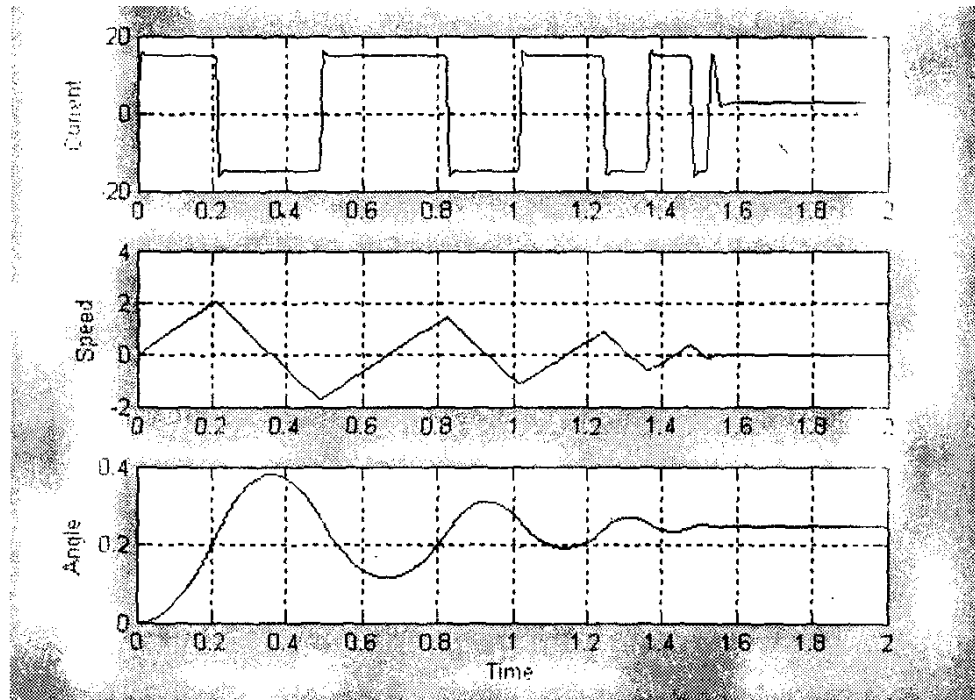


Рис. 7.26. Переходные процессы «в большом» в замкнутой робототехнической системе

Напряжение на выходе ШИМ ограничено напряжением питания — это является естественным ограничением в системе. Однако, как правило, естественного ограничения недостаточно для ограничения пускового тока. В двигателях, предназначенных для использования в мехатронных системах, пусковой ток допускается в пределах 2-3 от тока номинального. Для реализации такого ограничения на входе регулятора тока включается нелинейное звено с ограничением на требуемом уровне (рис. 7.24).

Переходные процессы в нелинейной системе при входном сигнале 0,5 рад. и ограничении тока якоря на уровне  $I_{я} = 2.7 \cdot I_{я.ном}$  для двигателя мощностью 0,45 кВт показаны на рис. 7.26

Такой переходной процесс в системе скорей всего не устроит разработчика.

Нелинейное звено на входе (блок Subsystem, рис. 7.24) содержит реальный D-регулятор и релейный элемент, который обеспечивает подключение D-регулятора при определенном значении сигнала рассогласования на входе системы. Содержание блока показано на рис. 7.27. Переходные процессы в такой системе в «малом» повторяют представленные на рис. 7.25. Переходные процессы «в большом» показаны на рис. 7.28.

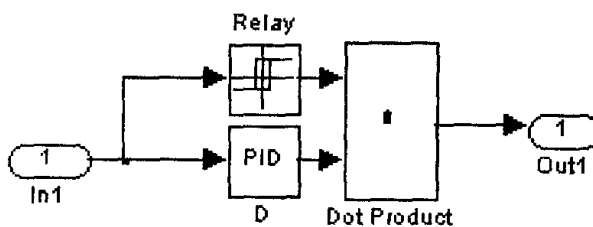


Рис. 7.27. Структура нелинейного блока

Из кривых (рис. 7.28) видно, что в такой системе при больших входных сигналах (при выходе системы в насыщение) колебаний выходной координаты (угла) не наблюдается. Поэтому такой переходной процесс может удовлетворить проектировщика.

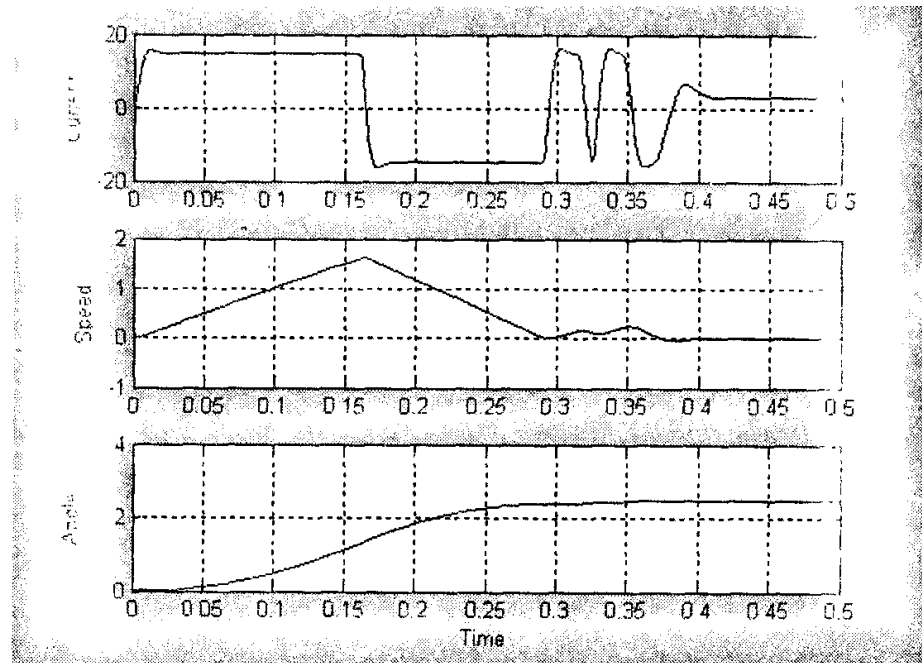


Рис. 7.28. Переходные процессы «в большом» робототехнической системы с нелинейным корректирующим блоком

*Пример 7.6.* Синтез при отсутствии датчика скорости.

Для этого случая реализуем «токовый коридор», используя в контуре тока ДПТ релейный регулятор. В этом случае контур тока можно считать безынерционным, а силовой регулятор — источником тока. Тогда звено робота вместе с ДПТ при малых  $\theta_{\mu}$  ( $\sin \theta_{\mu} \approx \theta_{\mu}$ ) описывается уравнением 7.24, из которого определим передаточную функцию

$$W_{об}(s) = \frac{k_M}{C_2} \cdot \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1}, \quad (7.30)$$

где  $T^2 = \frac{J}{C_2}$ ,  $2\xi T = \frac{C_1}{C_2}$ , при заданных значениях  $C_1 = 0,1$ ,  $C_2 = 3,2$  параметры звена робота равны:  $T = 0,33$ ,  $\xi = 0,047$ , т. е. робот представляет собой колебательное звено.

Для такой системы (см. табл. гл. 3) используется ПИД-регулятор с реальным дифференцирующим звеном, параметры такого регулятора при настройке системы на оптимум по модулю находятся из уравнений:

$$T_D < 2\xi T, \quad k_H = \frac{C_2}{2T_D k_\infty k_M},$$

$$\frac{k_D + T_D \cdot k_\Pi}{k_H} = T^2, \quad \frac{k_\Pi + T_D \cdot k_H}{k_H} = 2\xi T, \quad (7.31)$$

Модель звена робота (файл *Robot\_Mod\_Reg2*) представлена на рис. 7.29. Динамические характеристики замкнутой системы при  $T_D = 0,01$  с.,  $k_\Pi = 19,25$ ,  $k_H = 615$ ,  $k_D = 69,5$  показаны на рис. 7.30.

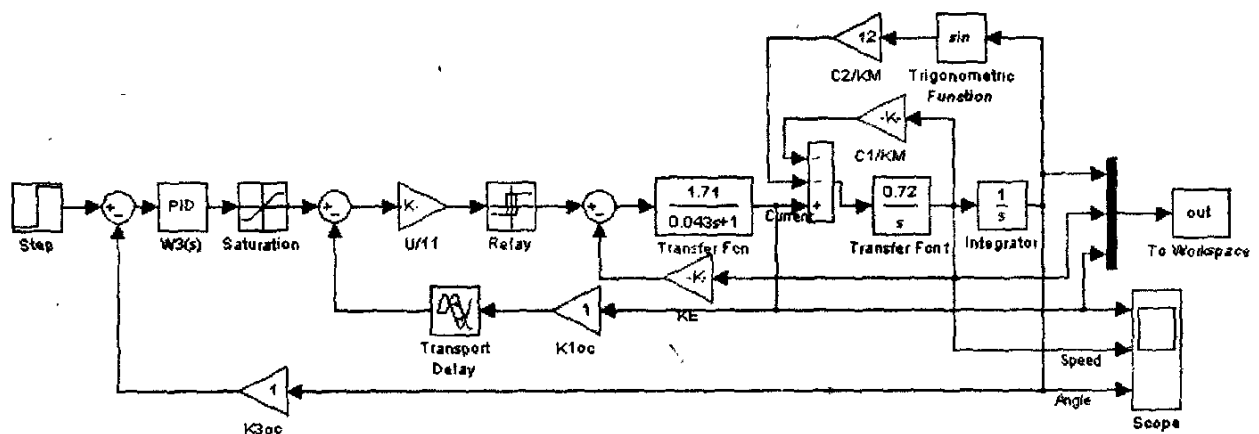


Рис. 7.29. Модель двухконтурной робототехнической системы

Модель системы с переоборудованным регулятором скорости приведена в файле *DC\_Mod\_Reg2D*. Динамика цифровой системы остается такой же, как в системе непрерывной при значении периода дискретизации, удовлетворяющего равенству  $T \leq 0,1T_D$ .

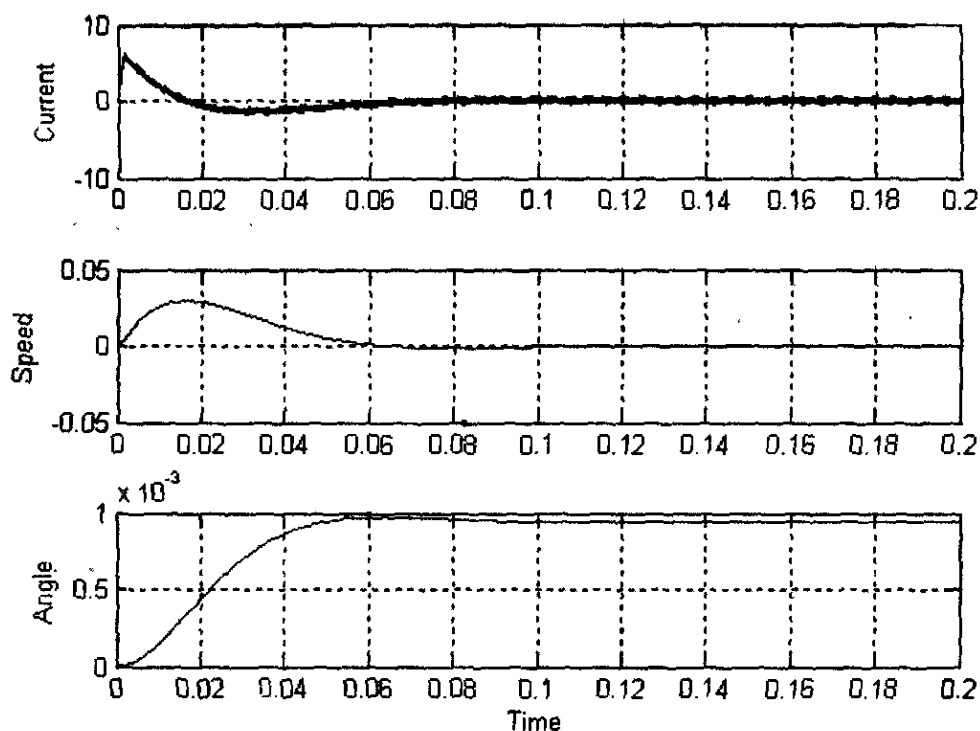


Рис. 7.30. Переходные процессы в двухконтурной робототехнической системе

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.3.6. ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ И ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ**

### **ВОПРОСЫ**

1. Виртуальная модель одноконтурной скоростной системы постоянного тока с ШИП.
2. Виртуальная модель двухконтурной скоростной системы постоянного тока с ШИП.

### **ЛИТЕРАТУРА**

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

## 1. Виртуальная модель одноконтурной скоростной системы постоянного тока с ШИП

Виртуальная модель одноконтурной скоростной мехатронной системы постоянного тока с ШИП (*файл DC\_Virt\_Reg1*) представлена на рис. 7.31.

Модель содержит:

- виртуальный двигатель постоянного тока (DC\_Machina), параметры которого соответствуют двигателю из таблицы 7.1.

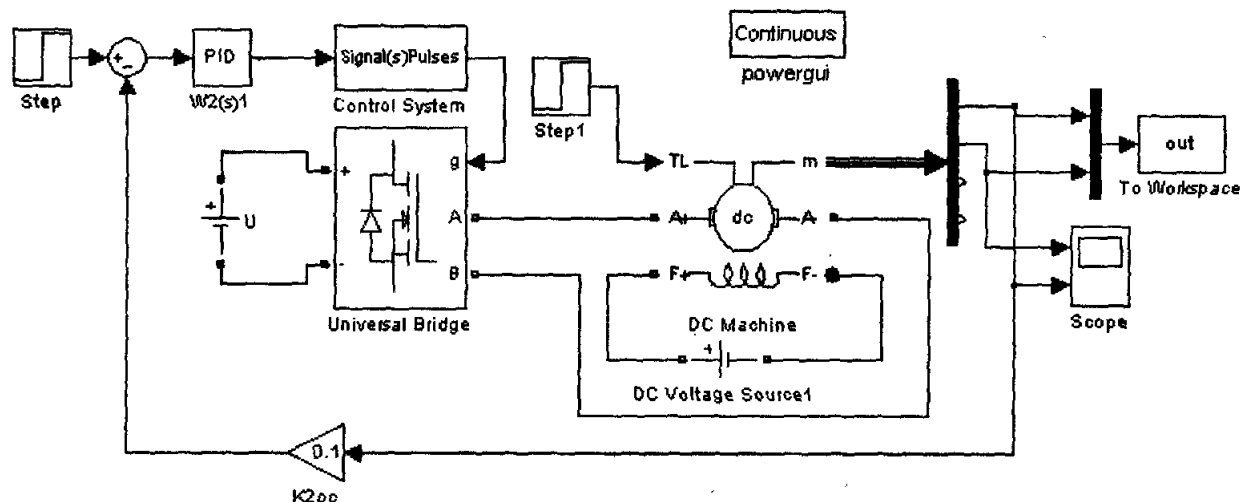


Рис. 7.31. Виртуальная модель одноконтурной скоростной системы постоянного тока

- мостовой ШИП на MOSFET транзисторах (Universal Bridge).
- библиотечный блок управления мостовым транзисторным ШИП (Control System), в окне настройки параметров которого задана частота коммутации ШИП равная 500 Гц.

- ПИ-регулятор с параметрами, рассчитанными в примере 7.1.

Переходные процессы в замкнутой по скорости одноконтурной системе показаны на рис. 7.32, рис. 7.33. Сравнивая эти процессы с аналогичными для структурной модели (пример 7.1), можно убедиться в их некотором расхождении. Это расхождение обусловлено тем, что в виртуальной модели конструктивные коэффициенты приняты равными ( $k_E = k_M$ ), тогда как регулятор скорости синтезирован (ур-я) из условия различных значений ( $k_E$ ,  $k_M$  см. табл. 7.2).

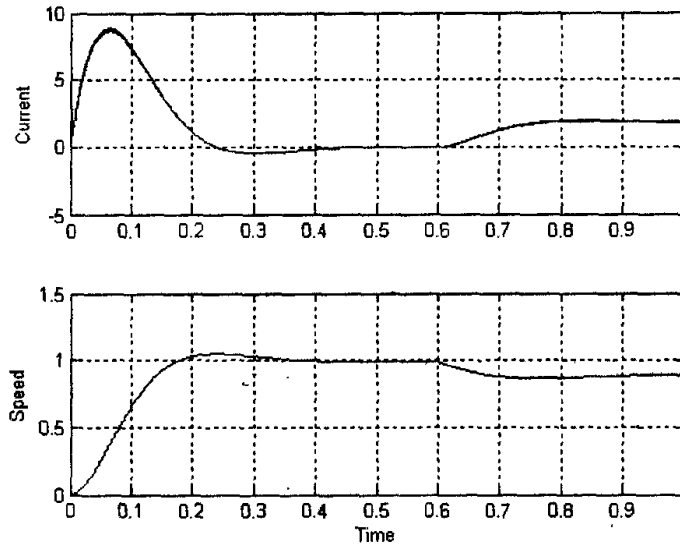


Рис. 7.32. Переходные процессы «в малом» в виртуальной одноконтурной (скоростной) системе постоянного тока

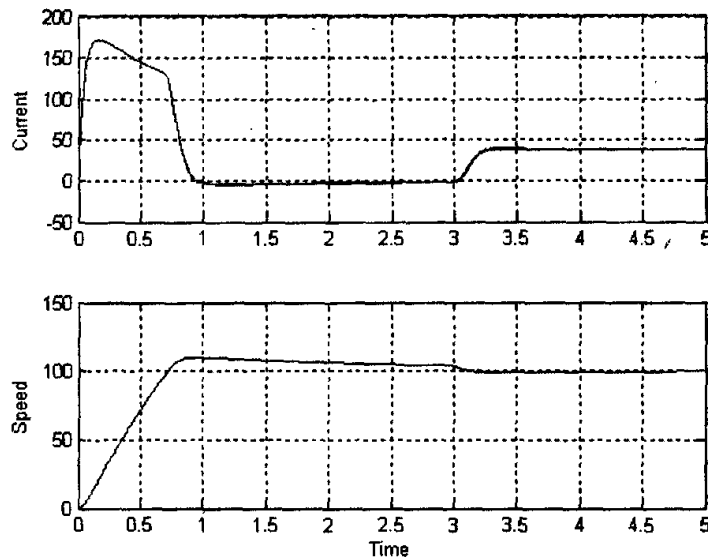


Рис. 7.33. Переходные процессы «в большом» в виртуальной одноконтурной скоростной системе постоянного тока

### 7.7. Виртуальная модель двухконтурной скоростной системы постоянного тока с ШИП

Виртуальная модель двухконтурной скоростной мехатронной системы постоянного тока с ШИП (файл *DC\_Virt\_Reg2*) показана на рис. 7.34. Параметры регуляторов для модели рассчитаны в примере 7.3. Переходные процессы в системе в «малом» и «большом» представлены на рис. 7.35, рис. 7.36 (сравните с рис. 7.15, 7.16).

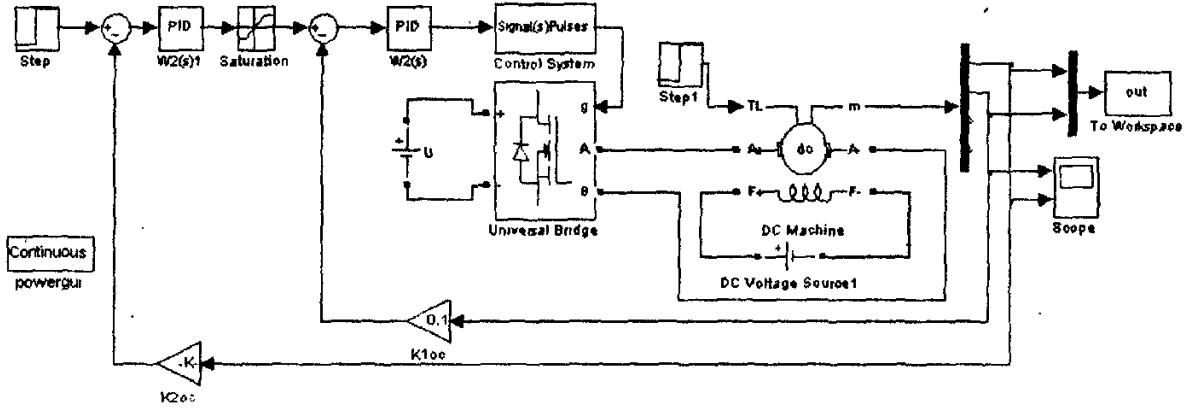


Рис. 7.34. Виртуальная модель двухконтурной скоростной системы постоянного тока

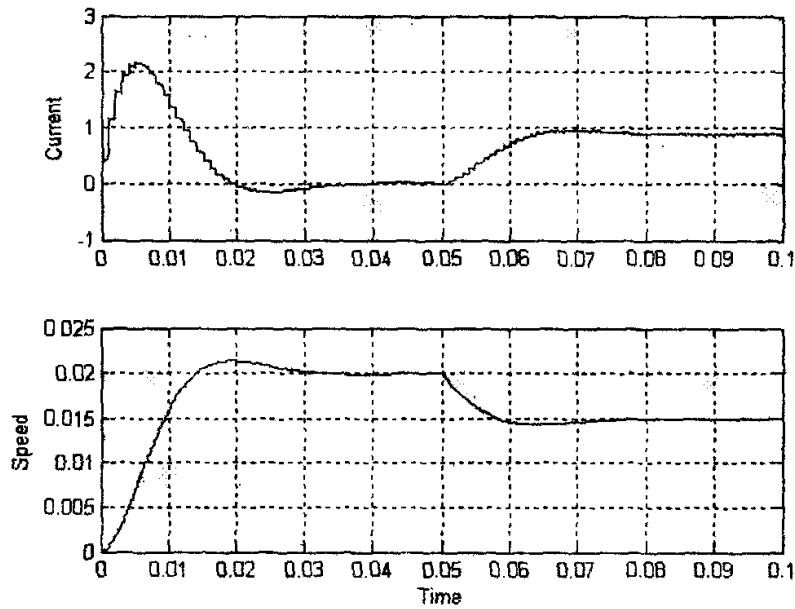


Рис. 7.35. Переходные процессы «в малом» в виртуальной двухконтурной скоростной системе постоянного тока

Время моделирования в виртуальных моделях значительно превышает время моделирования структурных моделей. Поэтому виртуальные модели рекомендуется применять для исследования электромагнитных и энергетических процессов в

замкнутых системах. Кроме того, виртуальные модели необходимы при решении вопросов совместимости, спектрального анализа, аварийных режимов и т. д.

В вышеприведенных примерах ставилась задача разработки виртуальных моделей систем постоянного тока и проверка их адекватности путем сравнения динамики с соответствующими структурными моделями. Использование виртуальных моделей для целей проектирования различных систем открывает широкие возможности как для исследования динамических, так и для исследования электромагнитных, энергетических, спектральных и других характеристик замкнутых систем в условиях адекватных реальным.

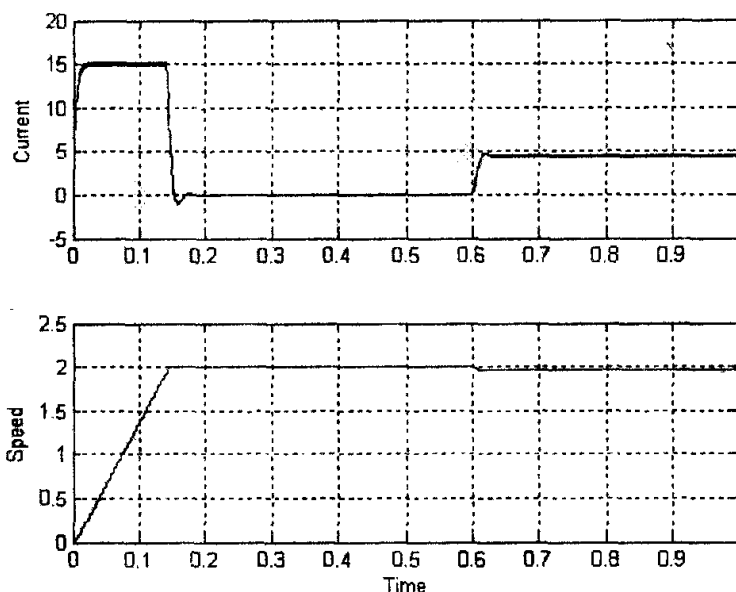


Рис. 7.36. Переходные процессы «в большом» в виртуальной двухконтурной скоростной системе постоянного тока

Ниже приведен один из возможных примеров использования виртуальной модели в двухконтурной системе для получения механических, электромагнитных и энергетических характеристик.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.3.6. ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ И ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

### ВОПРОСЫ

1. Виртуальная модель одноконтурной скоростной системы постоянного тока с ШИП.
2. Виртуальная модель двухконтурной скоростной системы постоянного тока с ШИП.

## ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Виртуальная модель одноконтурной скоростной системы постоянного тока с ШИП

Виртуальная модель одноконтурной скоростной мехатронной системы постоянного тока с ШИП (*файл DC\_Virt\_Reg1*) представлена на рис. 7.31.

Модель содержит:

- виртуальный двигатель постоянного тока (DC\_Machina), параметры которого соответствуют двигателю из таблицы 7.1.

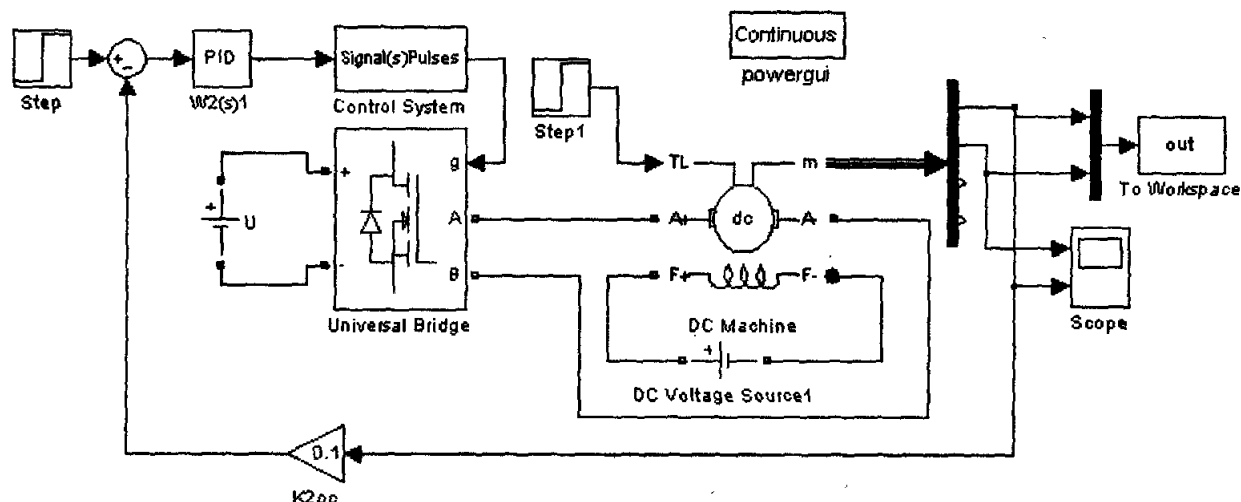


Рис. 7.31. Виртуальная модель одноконтурной скоростной системы постоянного тока

- мостовой ШИП на MOSFET транзисторах (Universal Bridge).
- библиотечный блок управления мостовым транзисторным ШИП (Control System), в окне настройки параметров которого задана частота коммутации ШИП равная 500 Гц.
- ПИ-регулятор с параметрами, рассчитанными в примере 7.1.

Переходные процессы в замкнутой по скорости одноконтурной системе показаны на рис. 7.32, рис. 7.33. Сравнивая эти процессы с аналогичными для структурной модели (пример 7.1), можно убедиться в их некотором расхождении. Это расхождение обусловлено тем, что в виртуальной модели конструктивные коэффициенты приняты равными ( $k_E = k_M$ ), тогда как регулятор скорости синтезирован (ур-я) из условия различных значений ( $k_E, k_M$  см. табл. 7.2).

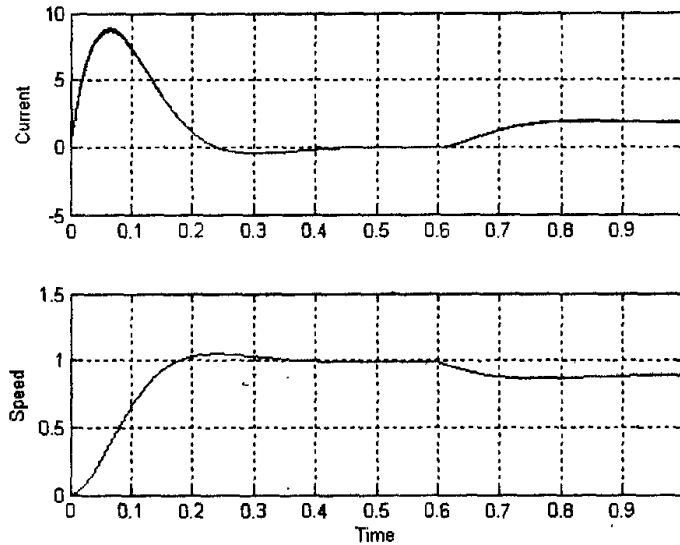


Рис. 7.32. Переходные процессы «в малом» в виртуальной одноконтурной (скоростной) системе постоянного тока

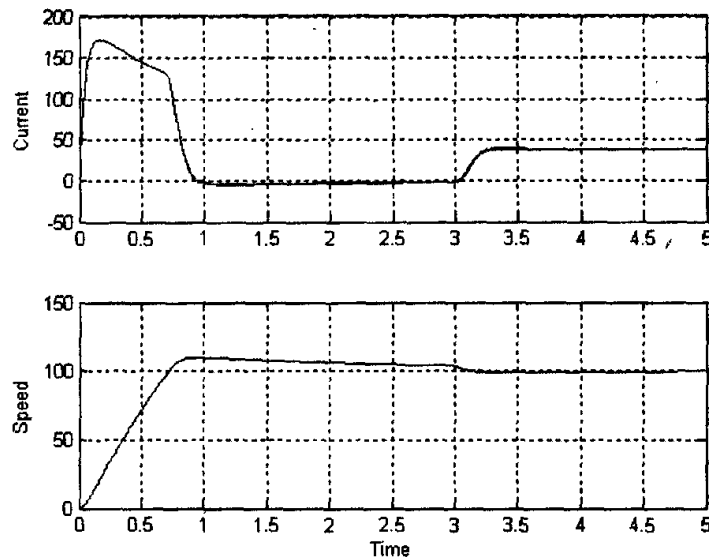


Рис. 7.33. Переходные процессы «в большом» в виртуальной одноконтурной скоростной системе постоянного тока

### 7.7. Виртуальная модель двухконтурной скоростной системы постоянного тока с ШИП

Виртуальная модель двухконтурной скоростной мехатронной системы постоянного тока с ШИП (файл *DC\_Virt\_Reg2*) показана на рис. 7.34. Параметры регуляторов для модели рассчитаны в примере 7.3. Переходные процессы в системе в «малом» и «большом» представлены на рис. 7.35, рис. 7.36 (сравните с рис. 7.15, 7.16).

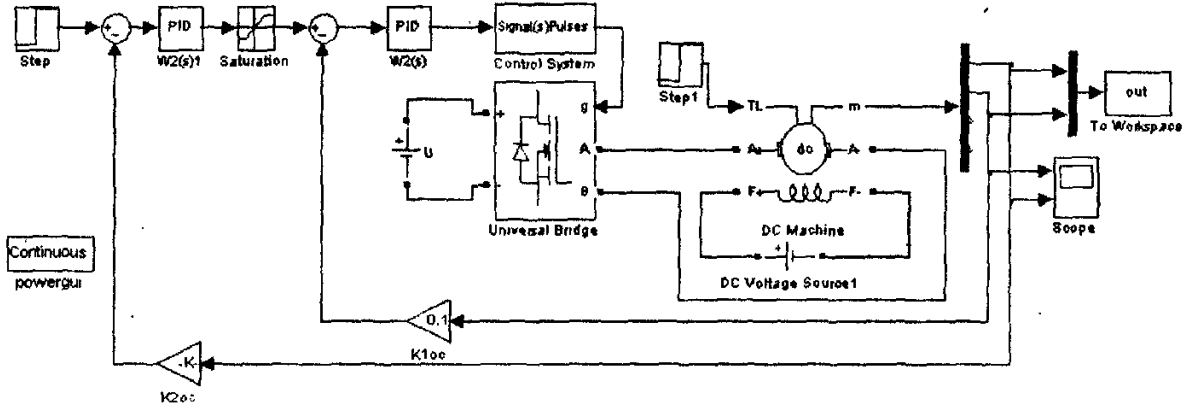


Рис. 7.34. Виртуальная модель двухконтурной скоростной системы постоянного тока

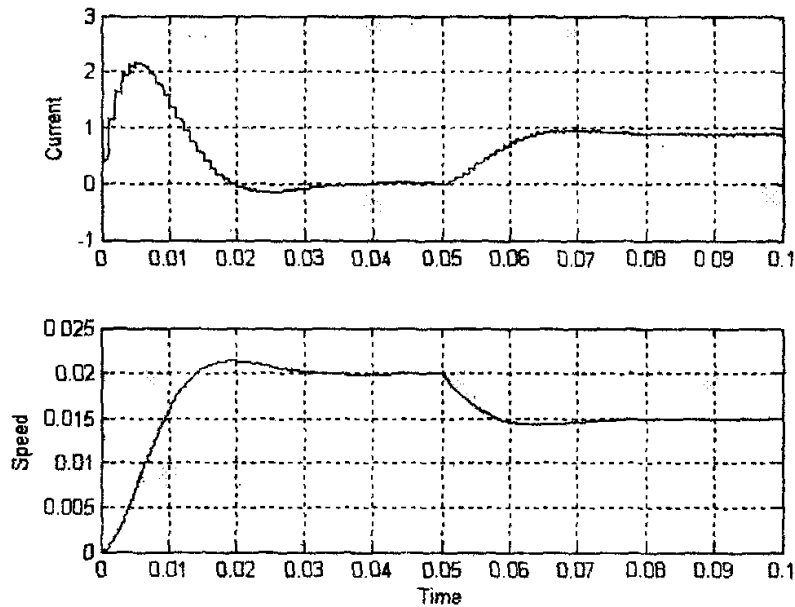


Рис. 7.35. Переходные процессы «в малом» в виртуальной двухконтурной скоростной системе постоянного тока

Время моделирования в виртуальных моделях значительно превышает время моделирования структурных моделей. Поэтому виртуальные модели рекомендуется применять для исследования электромагнитных и энергетических процессов в

замкнутых системах. Кроме того, виртуальные модели необходимы при решении вопросов совместимости, спектрального анализа, аварийных режимов и т. д.

В вышеприведенных примерах ставилась задача разработки виртуальных моделей систем постоянного тока и проверка их адекватности путем сравнения динамики с соответствующими структурными моделями. Использование виртуальных моделей для целей проектирования различных систем открывает широкие возможности как для исследования динамических, так и для исследования электромагнитных, энергетических, спектральных и других характеристик замкнутых систем в условиях адекватных реальным.

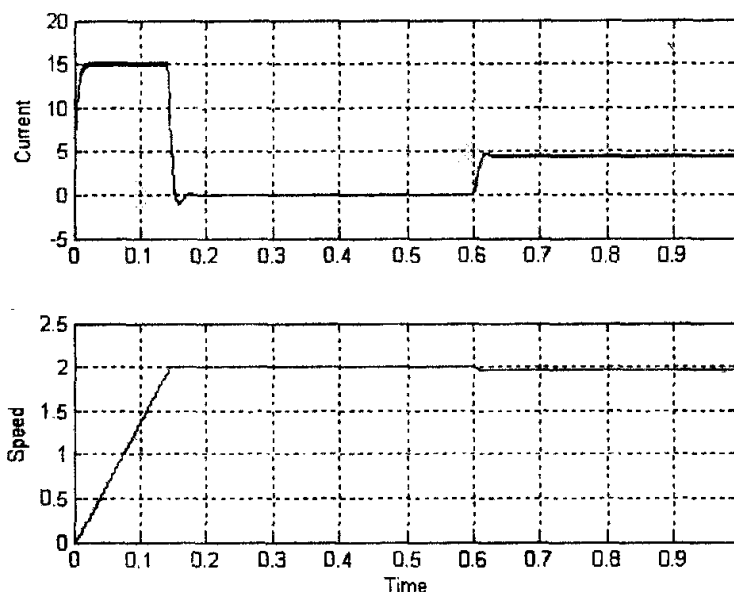


Рис. 7.36. Переходные процессы «в большом» в виртуальной двухконтурной скоростной системе постоянного тока

Ниже приведен один из возможных примеров использования виртуальной модели в двухконтурной системе для получения механических, электромагнитных и энергетических характеристик.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.3.7. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

### ВОПРОСЫ

1. Исследование статических характеристик системы постоянного тока на виртуальной модели.

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### Исследование статических характеристик системы постоянного тока на виртуальной модели

Модель показана на рис. 7.37 (файл *DC\_Viri\_Reg2\_Measur*). В отличие от модели (рис. 7.34) здесь добавлен блок Measurement для измерения необходимых переменных.

Модель блока измерения представлена на рис. 7.38. Изменяя момент нагрузки при различных значениях входного сигнала измеряются:

- ток в цепи питания блоком Fourier Id(0);
- ток и напряжение на выходе ШИП (блоки Fourier IH(0) Fourier UH(0));
- момент и скорость двигателя.

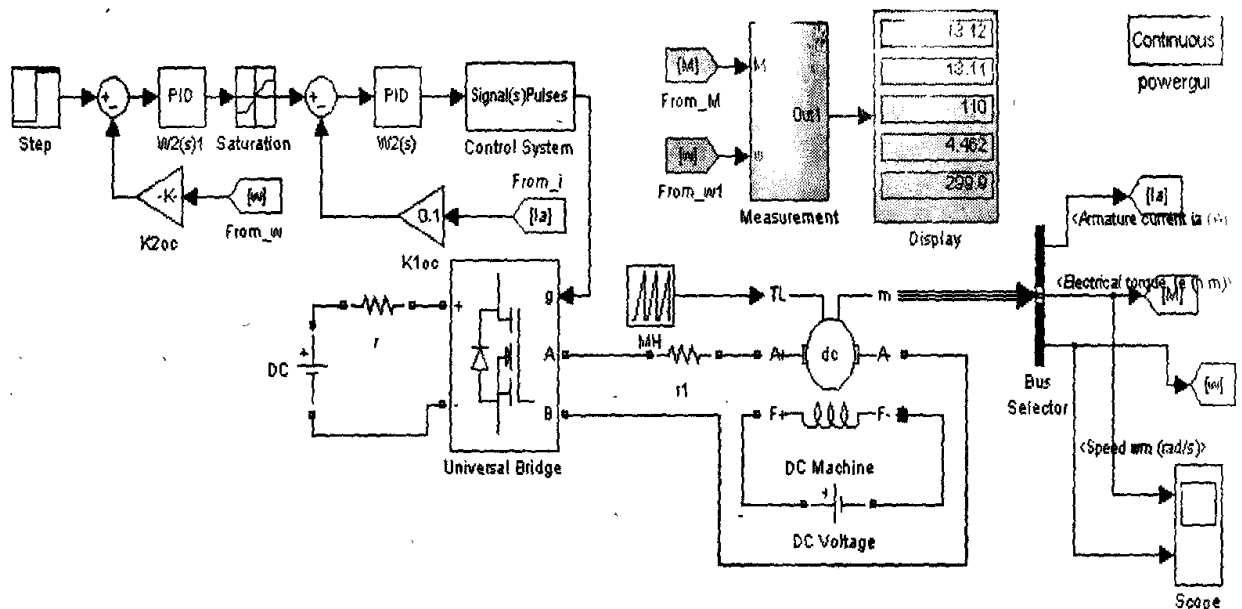


Рис. 7.37. Виртуальная модель для исследования статических характеристик системы постоянного тока

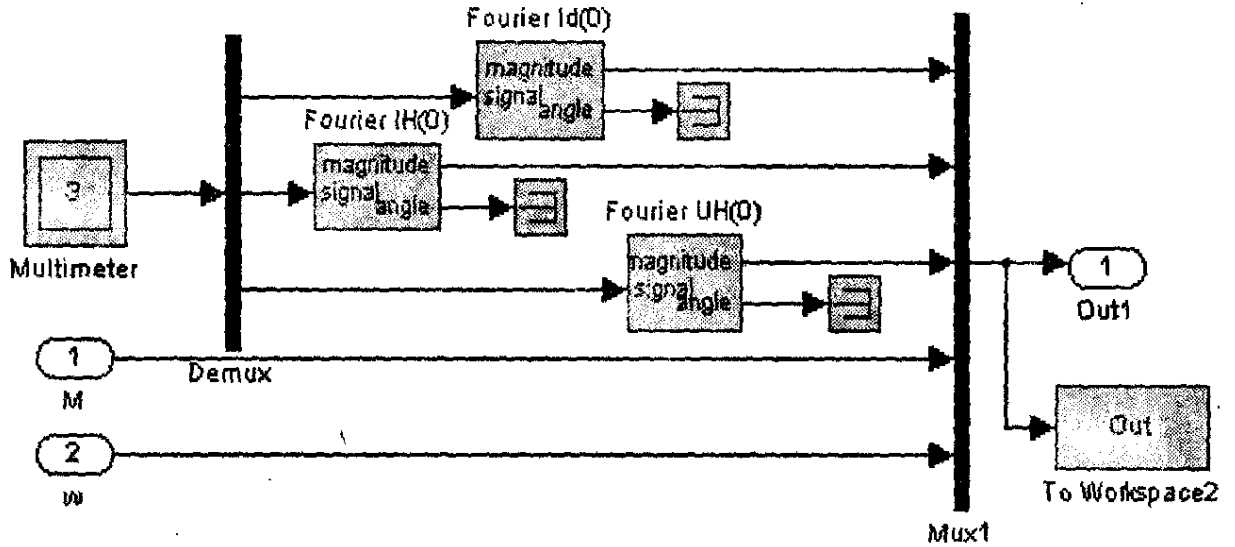


Рис. 7.38. Блок измерения

Все перечисленные значения определяются по показаниям блока Display.

Значения измеренных величин записываются в рабочее пространство Matlab для последующей обработки и построения требуемых зависимостей, которые демонстрирует рис. 7.39. Характеристики на рис. 7.39 соответствуют максимальному сигналу на входе системы.

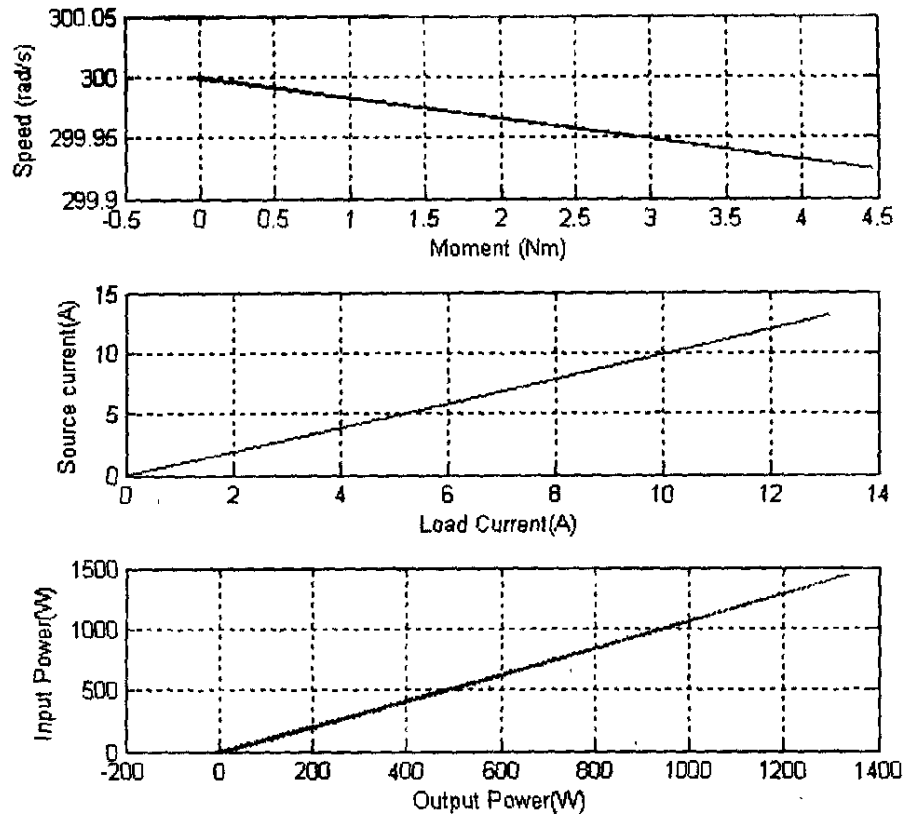


Рис. 7.39. Статические характеристики двухконтурной системы постоянного тока

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.3.8. СТЕНДЫ СИСТЕМ В SIM POWER SYSTEM

### ВОПРОСЫ

1. Имитационные лабораторные стенды систем постоянного тока в пакете Sim Power System.
2. Алгоритм проектирования системы постоянного тока с силовыми полупроводниковыми преобразователями.

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Имитационные лабораторные стенды систем постоянного тока в пакете Sim Power System.

В последней версии пакета Sim Power System добавлена библиотека электроприводов постоянного тока, показанная на рис. 7.40.

Эта библиотека содержит нереверсивные (Two-Quadrant) и реверсивные (Four-Quadrant) электроприводы с однофазными (Single-Phase) и трехфазными (Three-Phase) выпрямителями (Rectifier) и широтно-импульсными преобразователями (Chopper).

Все электроприводы построены аналогично и содержат исполнительный двигатель, силовой полупроводниковый преобразователь, регулятор тока и регулятор скорости.

Блок-схема для всех имитационных стендов одинакова и представлена на рис. 7.41.

Окном настройки параметров электропривода служит разработанный специальный графический интерфейс пользователя (GUI- Graphic User Interface), позволяющий задать параметры исполнительного двигателя, силового преобразователя и регуляторов тока и скорости.

Рассмотрим электропривод постоянного тока на примере реверсивного электропривода с однофазным управляемым выпрямителем (Four-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Drive). Функциональная схема системы показана на рис. 7.42.

Схема содержит:

- Два однофазных мостовых управляемых выпрямителя (УВ) (Single-phase full convertor) со схемой управления (Bridge firing unit).

- ПИ регуляторы тока и скорости (PI Current controller, PI Speed controller).
- Индуктивности, ограничивающие циркулирующие токи при совместном управлении УВ и сглаживающая индуктивность в цепи якоря (Circulating current inductors and smoothing inductance).
- Исполнительный двигатель постоянного тока (DC motor).
- Измерители скорости и тока (Speed sensor, Current measurement).
- Переключатель (Regulation switch), позволяющий реализовать в системе управление скоростью (Speed reference) или моментом (Torque reference).

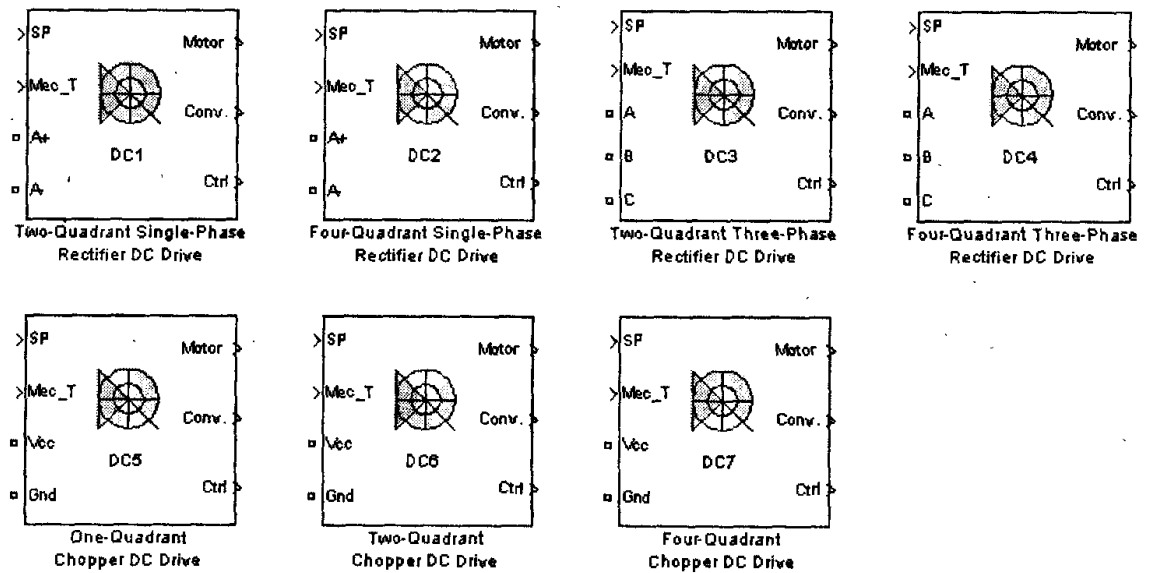


рис. 7.40. Имитационные лабораторные стенды систем постоянного тока в пакете Sim Power System

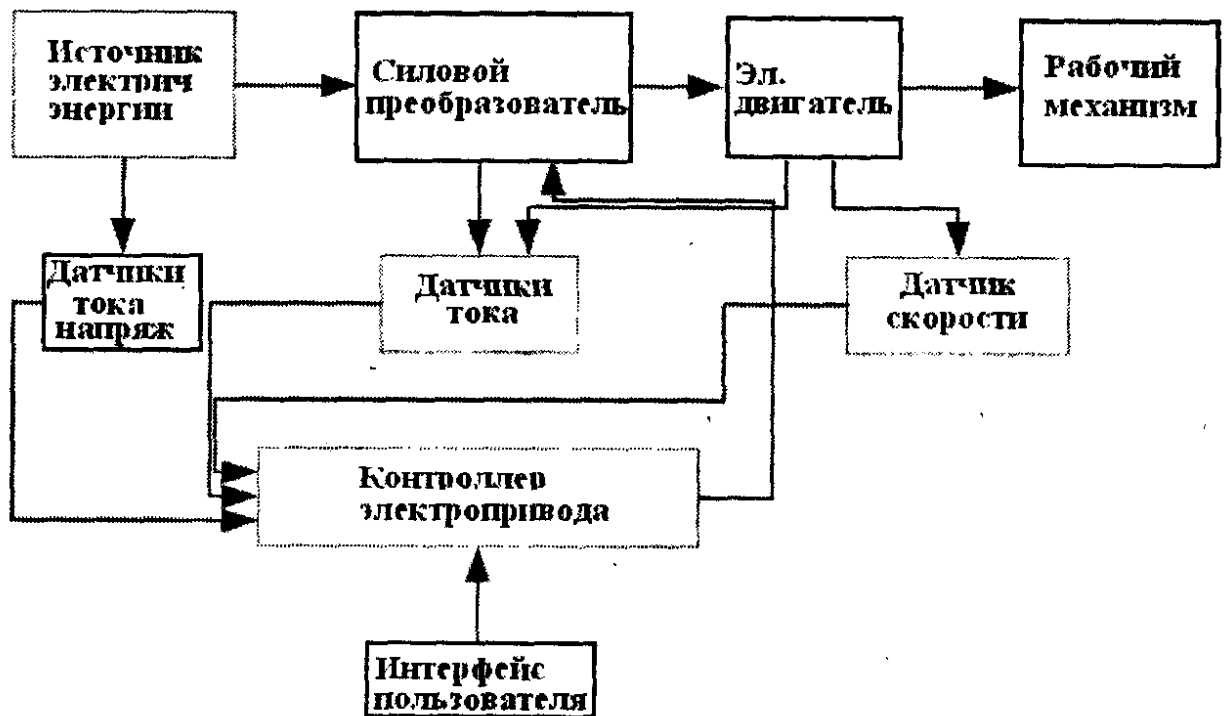


Рис. 7.41. Блок-схема имитационных стендов

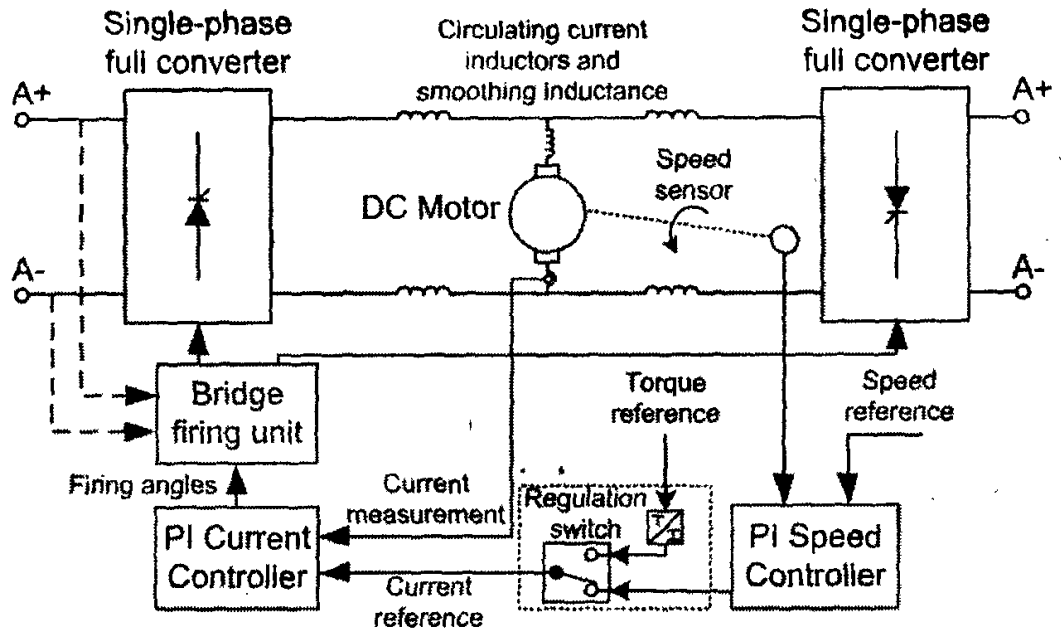


Рис. 7.42. Функциональная схема системы постоянного тока с однофазным реверсивным управляемым выпрямителем

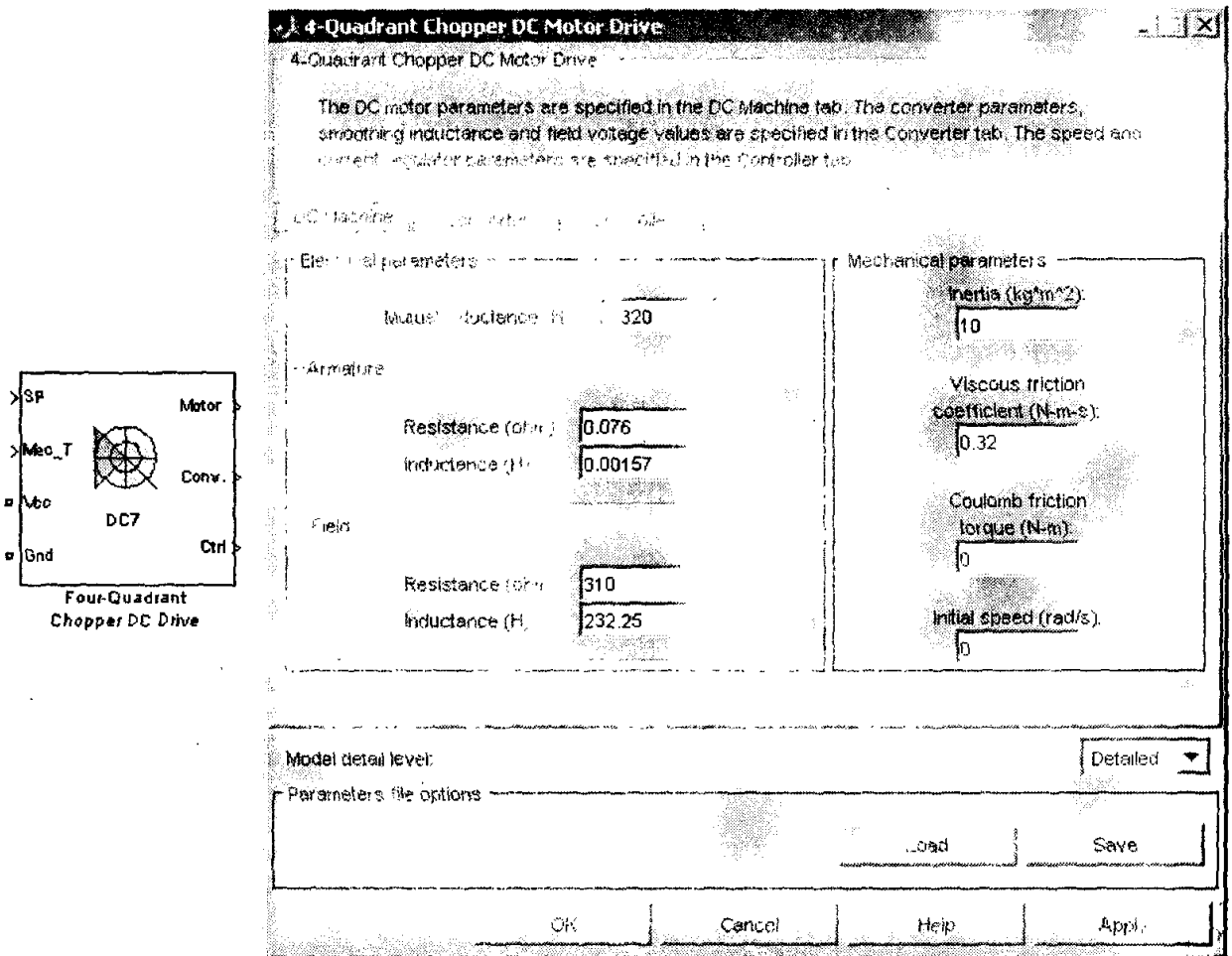


Рис. 7.43. Пиктограмма электропривода постоянного тока и окно настройки его параметров

Пиктограмма блока и окно настройки его параметров показаны на рис. 7.43. Окно настройки параметров в данном случае является панелью имитационного лабораторного стенда, разработанного с использованием инструментального средства GUI — графического интерфейса пользователя.

На этой панели имеется три основные вкладки DC Machine, Converter, Controller, позволяющие задать параметры основных блоков системы. Вид панели при нажатой вкладке DC Machine представлен на рис. 7.43.

В этом случае в окнах панели задаются следующие параметров машины:

Mutual inductance (H) — взаимная индукция в поле Electrical parameteres.

Resistance (Ohm), Inductance (H) — сопротивление и индуктивность якоря в поле Armature.

Resistance (Ohm), Inductance (H) — сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения в поле Field.

Inertia ( $\text{kgm}^2$ ), Viscous friction coefficient (Nms), Coulomb friction (Nm), Initial speed (rad/s) — момент инерции двигателя вместе с нагрузкой, коэффициент вязкого трения, момент сухого трения, начальная скорость в поле Mechanical parameteres.

**4-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Motor Drive**

The DC motor parameters are specified in the DC Machine tab. The converter parameters, circulating current inductors, smoothing inductance and field voltage values are specified in the Converter tab. The bridge firing unit, speed and current regulators parameters are specified in the Controller tab.

DC Machine    Converter    Controller

DC bus and excitation circuit

Smoothing inductance (H):	Field DC source (V):	Circulating current inductors (H):
50e-3	150	80e-3

Converter 1    Converter 2

Snubbers	Thyristor	Snubbers	Thyristors
Resistance (ohm):	On-state resistance (ohm):	Resistance (ohm):	On-state resistance (ohm):
2e3	1e-3	2e3	1e-3
Capacitance (F):	Forward voltage (V):	Capacitance (F):	Forward voltage (V):
900e-9	1.3	900e-9	1.3

Model detail level: Detailed

Parameters file options

Load    Save

OK    Cancel    Help    Apply

Рис. 7.44. Панель для ввода параметров двигателя постоянного тока

На вкладке Model detail level из выпадающего списка можно выбрать точную модель (Detailed) либо модель по средним значениям (по огибающей) (Average).

Параметры машины можно загрузить во внешний файл (Load) или сохранить во внешнем файле (Save).

На вкладке Converter (рис. 7.44) задаются:

- Smoothing inductance (H), Field DC source (V), Circulating current inductors — сглаживающая индуктивность в цепи якоря, напряжение источника в цепи возбуждения и индуктивности, ограничивающие ток циркуляции в поле DC bus and excitation circuit.

- Resistance (Ohm) Capacitance (F) — сопротивление и емкость демпфирующей цепи (Snubbers) в поле Converter 1 и аналогично в Converter 2.

- On-state resistance (Ohm), Forward voltage (V) — сопротивление и падение напряжения открытого тиристора (Thyristor) в поле Converter 1 и аналогично в Converter 2.

На вкладке Controller задаются параметры регуляторов скорости (Speed controller), регулятора тока (Current controller) и схемы управления УВ (Bridge firing unit).

**4-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Motor Drive**

4-Quadrant Single-Phase Rectifier DC Motor Drive

The DC motor parameters are specified in the DC Machine tab. The converter parameters, circulating current inductors, smoothing inductance and field voltage values are specified in the Converter tab. The bridge firing unit, speed and current regulators parameters are specified in the Controller tab:

DC Machine    Converters    **Controller**

Regulation type: **Speed regulation**    Sampling time (s): **100e-6**    Schematic

Speed Controller    Current Controller    Bridge Firing Unit

Nominal speed (rpm): **1750**    Initial speed reference (rpm): **0**    Low-pass filter cutoff frequency (Hz): **40**

Pf regulator:    Speed ramps (rpm/s)

Proportional gain: **10**    Acceleration: **1000**

Integral gain: **50**    Deceleration: **-1000**

Model detail level: **Detailed**

Parameters file options:    Load    Save

OK    Cancel    Help    Apply

Рис. 7.45. Панель для ввода параметров регулятора скорости

На вкладке Speed controller (рис. 7.45) задаются:

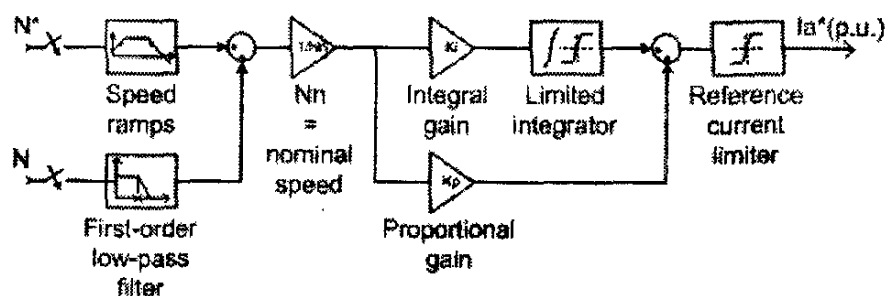
- В поле Regulation type из выпадающего меню выбирается тип регулятора 1.Speed regulation — регулятор скорости, 2. Torque regulation — регулятор момента, Sampling time (s) — период дискретизации контроллера.
- Nominal speed (rpm) — номинальная скорость, Initial speed (rpm) — начальная скорость, Low-pass cutoff frequency (Hz) — частота среза фильтра нижних частот в цепи обратной связи, в поле Speed controller.
- Proportional gain — пропорциональный коэффициент передачи регулятора, Integral gain — интегральный коэффициент передачи регулятора в поле PI regulator.
- Acceleration (rpm/s) — ограничение ускорения, Deceleration (rpm/s) — ограничение замедления в поле Speed ramps.

Вкладка Schematic позволяет просмотреть структуру регуляторов скорости и тока (рис. 7.46).

Сигнал на выходе регуляторов задается в относительных единицах (p.u.) поэтому реальный сигнал скорости делится на номинальное значение скорости, введенное в поле Nominal speed панели (рис. 7.45).

Аналогично в регуляторе тока сигнал реального тока делится на значение номинального.

### Speed controller



### Current controller

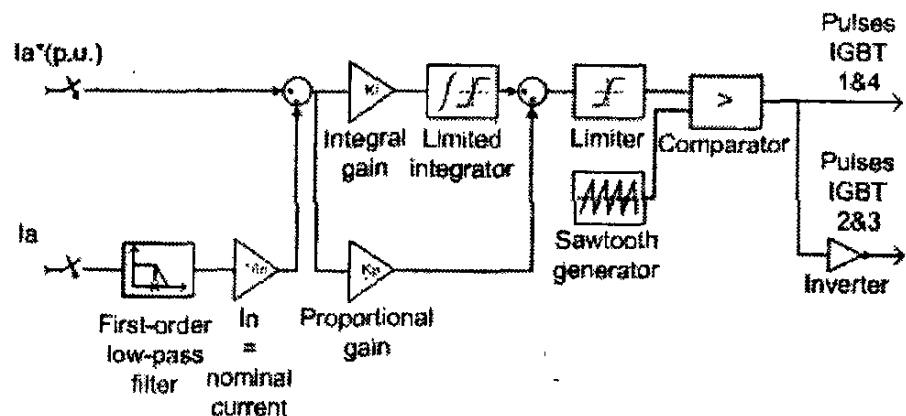


Рис. 7.46. Функциональные схемы регуляторов скорости и тока

Панель параметров регулятора тока показано на рис. 7.47. Она подобна панели регулятора скорости. Дополнительно здесь задаются полная мощность (Power (VA) ) и напряжение (Voltage (V)) на выходе УВ для вычисления номинального тока, ограничение на выходе регулятора скорости в относительных единицах (Symmetrical reference limit).

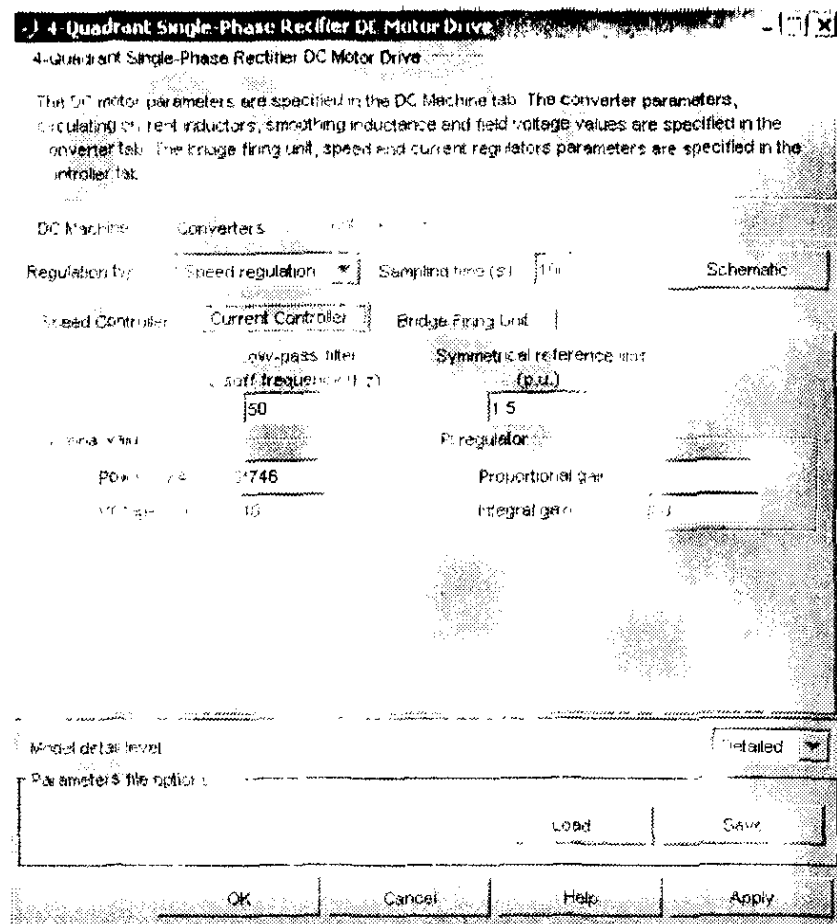


Рис. 7.47. Панель для ввода параметров регулятора тока

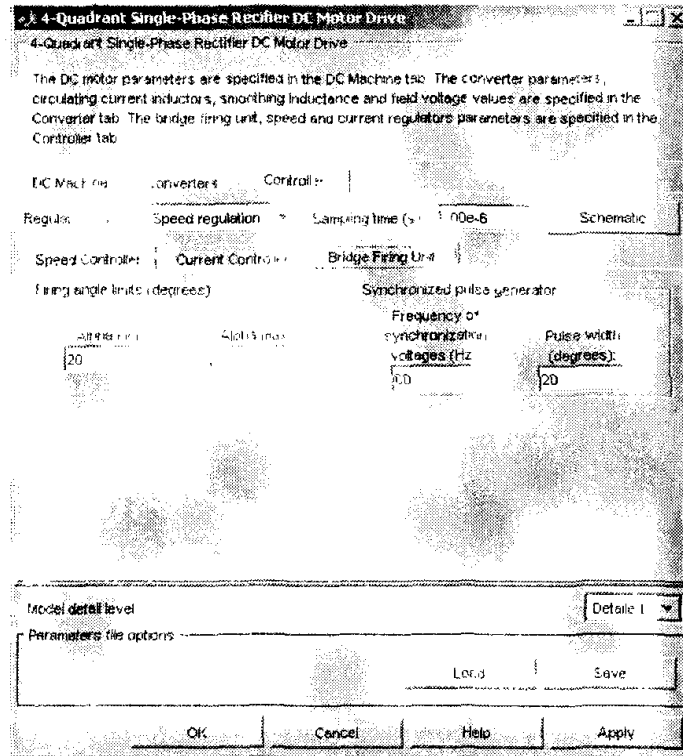


Рис. 7.48. Панель для ввода параметров схемы управления УВ

В качестве параметров схемы управления управляемыми выпрямителями задаются (рис. 7.48):

- Ограничения на углы управления ( $\alpha_{\min}$ ,  $\alpha_{\max}$ ).
- Частота синхронизирующего напряжения (частота сети) (Frequency synchronization voltage (V)).
- Ширина импульса управления (Pulse width (degrees)).

### **7.10. Алгоритм проектирования системы постоянного тока с силовыми полупроводниковыми преобразователями**

При проектировании системы постоянного тока необходимо последовательно решить следующие задачи:

1. Выбрать тип двигателя постоянного тока, исходя из требований к системе, и определить параметры его структурной схемы.
2. Выбрать тип силового регулятора (УВ, ШИП).
3. Выбрать схему силового регулятора и его алгоритм управления.
4. Определить динамические параметры силового регулятора по «гладкой составляющей».
5. Выбрать структуру замкнутой системы.
6. Синтезировать регуляторы в выбранной структуре с определенными на этапе 4 параметрами силового регулятора.
7. Реализовать структурную модель системы и определить ее динамические характеристики.
8. Сравнить полученные характеристики с заданными в техническом задании и при необходимости вернуться к пункту 1, либо 2, либо 5.
9. Учесть ограничения в системе и повторить пункты 7, 8.
10. Построить цифровую модель регулятора по полученной непрерывной модели и повторить пункты 7, 8.
11. Реализовать систему с функциональной моделью силового регулятора. Определить динамические характеристики этой системы.
12. Реализовать систему с виртуальной моделью силового регулятора и двигателя. Определить динамические характеристики этой системы и сравнить их с характеристиками структурной модели.
13. Исследовать нагрузочные, электромагнитные, энергетические, спектральные и иные требуемые характеристики разработанной мехатронной системы.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.4.2. АСИНХРОННАЯ МАШИНА С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

### ВОПРОСЫ

1. Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором.
2. Анализ АКЗ в неподвижной системе координат.

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором

Схема асинхронной машины с короткозамкнутым ротором (АКЗ) получается из обобщенной схемы (рис. 8.1), если обмотки ротора замкнуть накоротко.

При этом в общих уравнениях (8.8) следует положить  $\bar{u}_R$ .

$$\begin{aligned} \bar{u}_S &= R_S \bar{i}_S + \frac{d\bar{\psi}_S}{dt} + j\omega_k \bar{\psi}_S, \\ 0 &= R_R \bar{i}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \bar{\psi}_R, \\ \bar{\psi}_S &= L_S \bar{i}_S + L_m \bar{i}_R, \\ \bar{\psi}_R &= L_m \bar{i}_S + L_R \bar{i}_R, \\ M &= \frac{3}{2} p k_R \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_S), \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_H. \end{aligned} \tag{8.9}$$

Преобразуем уравнения (8.9), исключив из них ( $\bar{i}_R$  и  $\bar{\psi}_S$ ). Тогда уравнения (8.9) после соответствующих преобразований примут вид:

$$\begin{aligned} \bar{u}_S &= r\bar{i}_S + L'_S \frac{d\bar{i}_S}{dt} + j\omega_K L'_S \bar{i}_S - \frac{k_R}{T_R} \bar{\psi}_R + jk_R p \omega_m \bar{\psi}_R, \\ 0 &= -k_R R_R \bar{i}_S + \frac{1}{T_R} \bar{\psi}_R + \frac{d\bar{\psi}_R}{dt} + j(\omega_K - p\omega_m) \bar{\psi}_R, \end{aligned} \quad (8.10)$$

$$M = \frac{3}{2} p k_R \cdot \text{Mod}(\bar{\psi}_R \times \bar{i}_S),$$

$$j \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_H,$$

где  $r = (R_S + k_R^2 R_R), L'_S = (L_S - \frac{L_m^2}{L_R}), k_R = \frac{L_m}{L_R}, T_R = \frac{L_R}{R_R}.$

Для того чтобы лучше понять физические процессы, происходящие в АКЗ, исследуем машину в различных системах координат, сравним результаты и сделаем некоторые выводы, необходимые при построении замкнутых систем на базе этой машины. Заметим, что для представления пространственных векторов используется комплексная плоскость.

### 8.1.2. Анализ АКЗ в неподвижной системе координат

В неподвижной комплексной системе координат ( $\omega_k = 0$ ) вещественная ось обозначается  $\alpha$ , а мнимая  $\beta$ . Пространственные вектора в этом случае раскладываются по осям:  $\bar{u}_S = u_{S\alpha} + j u_{S\beta}, \bar{i}_S = i_{S\alpha} + j i_{S\beta}, \bar{\psi}_R = \psi_{R\alpha} + j \psi_{R\beta}.$

Подставив эти значения в уравнения (8.10) и приравняв отдельно вещественные и мнимые части, получим:

$$\begin{aligned}
 u_{S\alpha} &= r i_{S\alpha} + L'_S \frac{di_{S\alpha}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R p \omega_m \psi_{R\beta}, \\
 u_{S\beta} &= r i_{S\beta} + L'_S \frac{di_{S\beta}}{dt} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} + k_R p \omega_m \psi_{R\alpha}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} \psi_{R\alpha} + \frac{d\psi_{R\alpha}}{dt} + p \omega_m \psi_{R\beta}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} \psi_{R\beta} + \frac{d\psi_{R\beta}}{dt} - p \omega_m \psi_{R\alpha}, \\
 M &= \frac{3}{2} p k_R (\psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}), \\
 J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_H.
 \end{aligned} \tag{8.11}$$

Система уравнений (8.11) в операторной форме примет вид:

$$\begin{aligned}
 u_{S\alpha} &= r(1 + T'_S s) i_{S\alpha} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\alpha} - k_R p \omega_m \psi_{R\beta}, \\
 u_{S\beta} &= r(1 + T'_S s) i_{S\beta} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{R\beta} + k_R p \omega_m \psi_{R\alpha}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{S\alpha} + \frac{1}{T_R} (1 + T_R s) \psi_{R\alpha} + p \omega_m \psi_{R\beta}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{S\beta} + \frac{1}{T_R} (1 + T_R s) \psi_{R\beta} - p \omega_m \psi_{R\alpha}, \\
 M &= \frac{3}{2} p k_R (\psi_{R\alpha} i_{S\beta} - \psi_{R\beta} i_{S\alpha}), \\
 J s \omega_m &= M - M_H, \quad \text{где } \bar{T}'_S = \frac{L'_S}{r}.
 \end{aligned} \tag{8.12}$$

Структурная схема АКЗ, построенная по уравнениям (8.12), показана на рис. 8.2.

Для моделирования выберем АКЗ 20НР (15 kW) из библиотеки Sim Power System со следующими паспортными данными и параметрами:  $U_{AB} = 400\text{В}$ ,  $f = 50\text{Гц}$ ,  $R_S = 0,2147\text{ Ом.}$ ,  $R_R = 0,2205\text{ Ом.}$ ,  $L_S = L_R = 0,06518\text{ Гн.}$ ,  $L_m = 0,06419\text{ Гн.}$ ,  $J = 0,102\text{кгм}^2$ ,  $p=2$ .

Коэффициенты, необходимые для моделирования уравнений (8.12), помещены в таблицу 8.1.

коэффициенты	$r$	$T_S^1$	$T_R$	$k_R$	$L_S$
единица измерения	Ом	с	с		Гн
Значение	0.4285	0.0046	0.2956	0.9848	0.00196

Таблица 8.1

Модель АКЗ, построенная по уравнениям (8.12), представлена на рис. 8.3, (файл *AKZ\_Mod\_ab*).

На вход модели в момент времени  $t = 0$  подаются напряжения  $u_{s\alpha} = U_1 \cos \omega_1 t$ ,  $u_{s\beta} = U_1 \sin \omega_1 t$ , реализуя тем самым прямой пуск.

Результаты моделирования представлены на рис. 8.4. Они показывают, что при прямом пуске наблюдаются значительные колебания момента и скорости. Кроме того, они показывают, что при приложении момента нагрузки наблюдается также колебания момента и скорости.

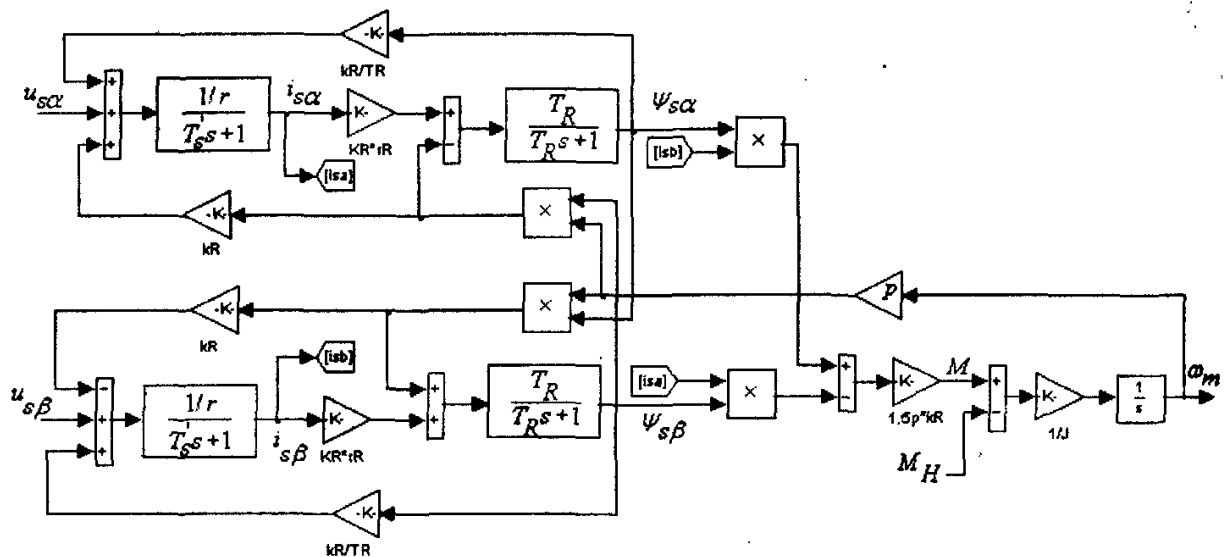


Рис. 8.2. Структурная схема АКЗ в неподвижной системе координат

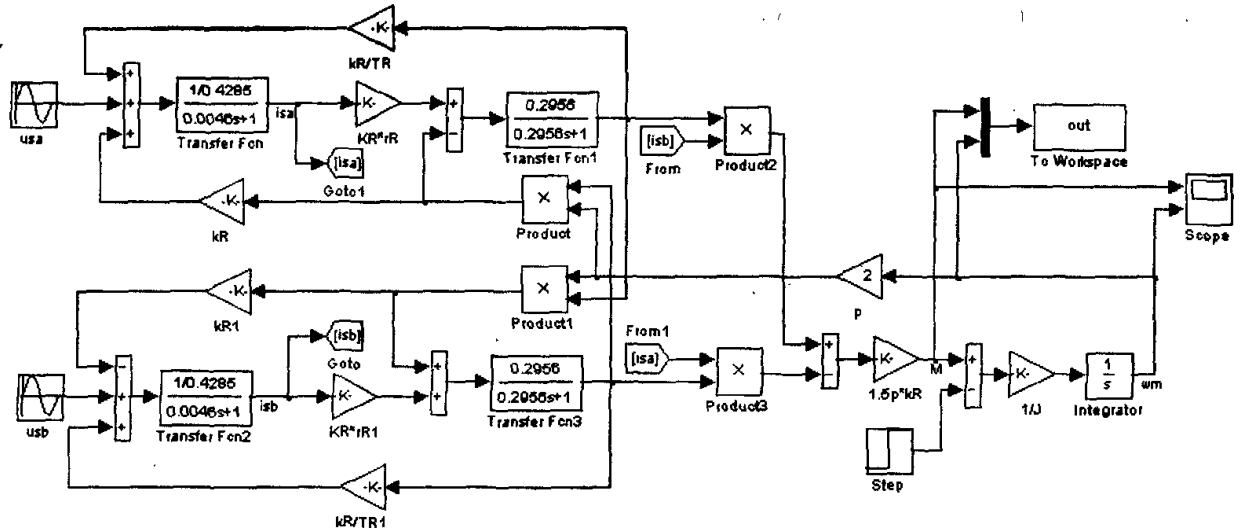


Рис. 8.3. Модель АКЗ в неподвижной системе координат

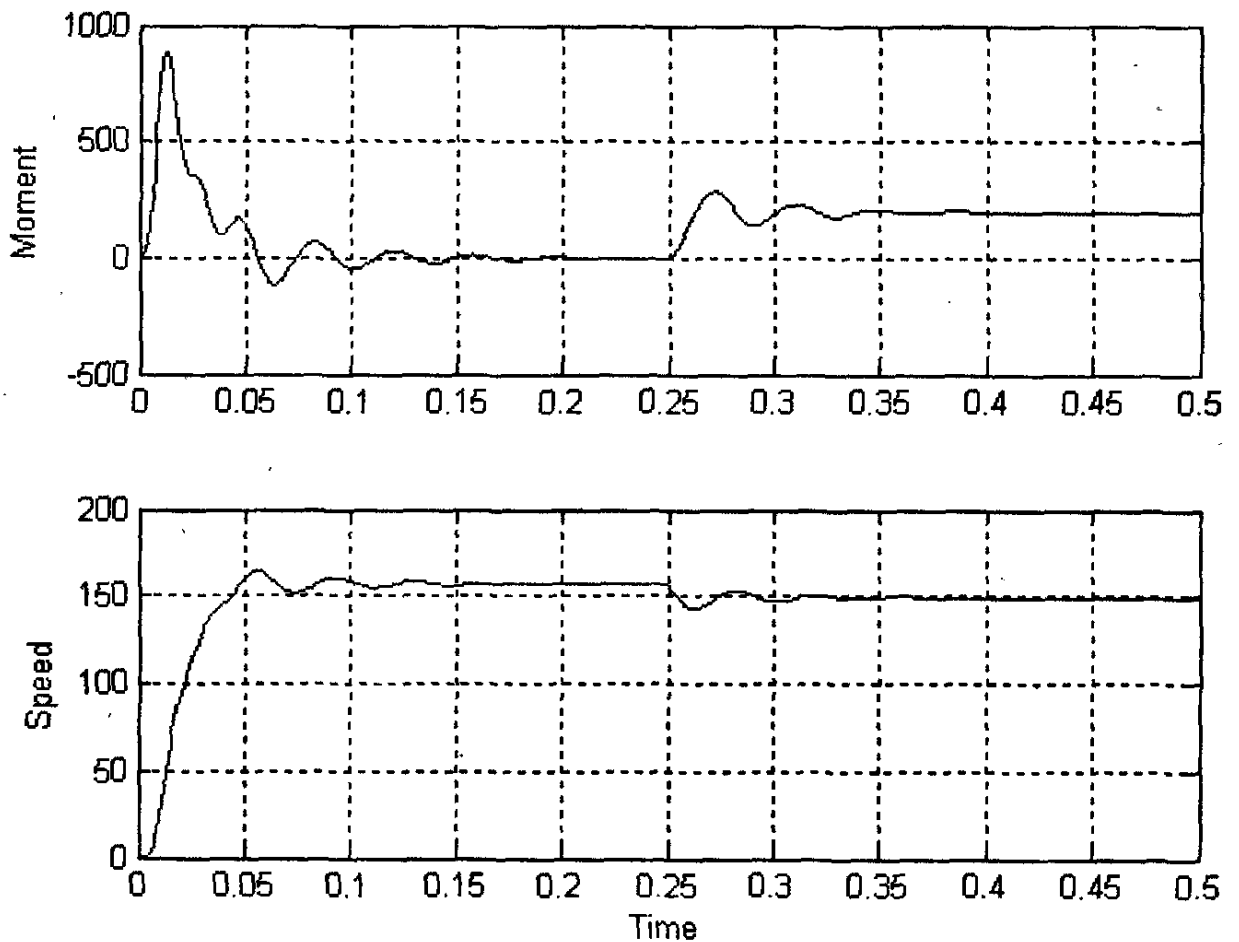


Рис. 8.4. Переходные процессы в АКЗ при пуске и набросе нагрузки

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.4.3. АСИНХРОННАЯ МАШИНА С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

### ВОПРОСЫ

1. Анализ АКЗ во вращающейся системе координат.

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Анализ АКЗ во вращающейся системе координат

Во вращающейся с относительной угловой скоростью  $\omega_k$  в системе координат с вещественной осью  $x$  и мнимой осью  $y$  уравнения (8.10) в операторной форме запишутся в виде:

$$\begin{aligned}
 u_{sx} &= r(1 + T'_s s) i_{sx} - \omega_k L'_s i_{sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} - k_R p \omega_m \psi_{Ry}, \\
 u_{sy} &= r(1 + T'_s s) i_{sy} + \omega_k L'_s i_{sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx} - (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Ry}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{sy} + \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + s \psi_{Ry} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\
 m &= 1.5 p k_R (\psi_{Rx} i_{sy} - \psi_{Ry} i_{sx}), \\
 J s \omega_m &= M - M_H.
 \end{aligned} \tag{8.13}$$

Структурная схема АКЗ и ее модель зависит от выбора базового вектора, который определяет скорость вращения координат. За базовый вектор принимается тот, который при анализе совмещается с одной из осей системы координат.

Так, если за базовый вектор принять вектор  $\vec{u}_s$ , то система координат будет вращаться со скоростью  $\omega_1$ , равной угловой частоте напряжения питания. Кроме того, если совместить вектор  $\vec{u}_s$  с осью  $x$  вращающейся системы координат, то в уравнениях (8.13) следует принять  $u_{sx} = U_1$ ,  $u_{sy} = 0$ .

$$\begin{aligned}
 U_1 &= r(1 + T_S' s) i_{Sx} - \omega_1 L_S' i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} - k_R p \omega_m \psi_{Ry}, \\
 0 &= r(1 + T_S' s) i_{Sy} + \omega_1 L_S' i_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx} - (\omega_1 - p \omega_m) \psi_{Ry}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{Sy} + \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + s \psi_{Ry} + (\omega_1 - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\
 m &= 1.5 p k_R (\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{Sx}), \\
 J s \omega_m &= M - M_H.
 \end{aligned}
 \tag{8.14}$$

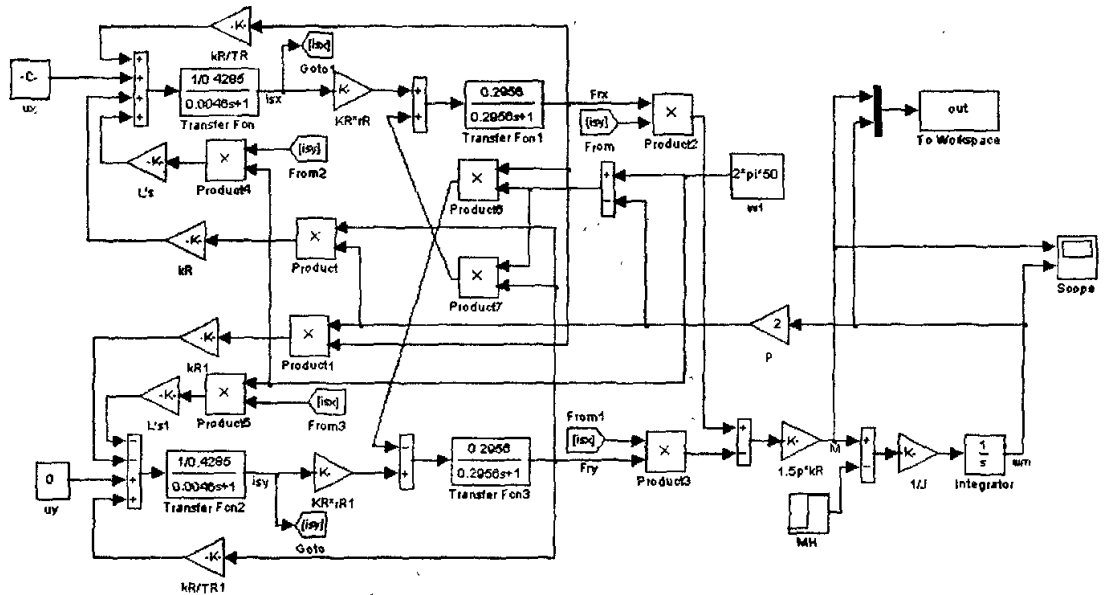


Рис. 8.5. Модель АКЗ во вращающейся системе координат с базовым вектором напряжения

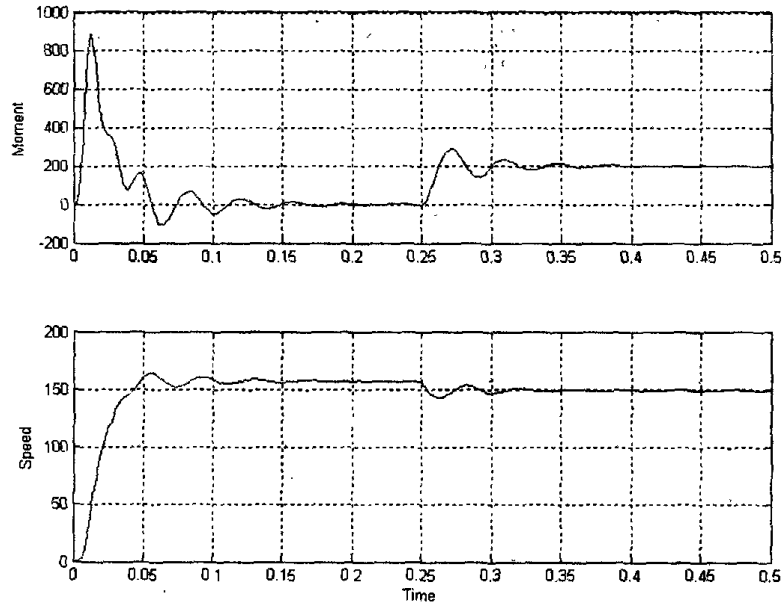


Рис. 8.6. Переходные процессы в АКЗ при пуске и набросе нагрузки

Сравнивая результаты моделирования в неподвижной и во вращающейся системе координат, можно сделать вывод об их полной идентичности.

Это доказывает, что для анализа собственно электрической машины выбор системы координат не играет роли. Однако для синтеза замкнутых систем выбор системы координат является решающим.

Это обстоятельство особенно проявляется при синтезе параметров регуляторов и при моделировании всей системы в пакете Simulink, т. к. при решении задач в этом пакете существуют ограничения, которые можно обойти только при правильном выборе системы координат.

Математические описания АКЗ, рассмотренные выше, справедливы для случая питания машины от источника напряжения. Таким источником может быть сеть или автономный инвертор напряжения, который в замкнутых системах выполняет функцию силового регулятора. Также как в системах постоянного тока силовой регулятор в системах переменного тока может быть охвачен релейной обратной связью. В этом случае силовой регулятор представляет из себя источник тока.

Рассмотрим свойства АКЗ при питании от источника тока.

При реализации в системе релейных токовых контуров АКЗ управляется от источника тока, переменными режима в этом случае становятся токи статора и уравнения (8.14) принимают вид:

$$\begin{aligned}
 k_R R_R i_{Sx} &= \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx} - (\omega_1 - p \omega_m) \psi_{Ry}, \\
 k_R R_R i_{Sy} &= \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + s \psi_{Ry} + (\omega_1 - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\
 m &= 1.5 p k_R (\psi_{Rx} i_{Sy} - \psi_{Ry} i_{Sx}), \\
 J s \omega_m &= M - M_H.
 \end{aligned} \tag{8.15}$$

Если в качестве базового вектора принять вектор тока статора  $i_s$  и совместить его с осью  $x$  системы координат, то система уравнений (8.15) переписется в виде:

$$\begin{aligned}
 k_R R_R i_{sx} &= \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx} - (\omega_1 - p \omega_m) \psi_{Ry}, \\
 0 &= \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + s \psi_{Ry} + (\omega_1 - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\
 m &= 1.5 p k_R (\psi_{Rx} i_{sy} - \psi_{Ry} i_{sx}), \\
 J s \omega_m &= M - M_H.
 \end{aligned}
 \tag{8.16}$$

Структура АКЗ, построенная по уравнениям (8.16) представлена на рис. 8.7. В этой структуре ток статора и частота, являясь переменными режима, могут

изменяться независимо друг от друга.

*Математическое описание АКЗ во вращающейся системе координат, совмещенной с вектором тока, является основой для синтеза асинхронных систем с частотно-токовыми способами управления, которые, так же как и частотные, будут рассмотрены ниже.*

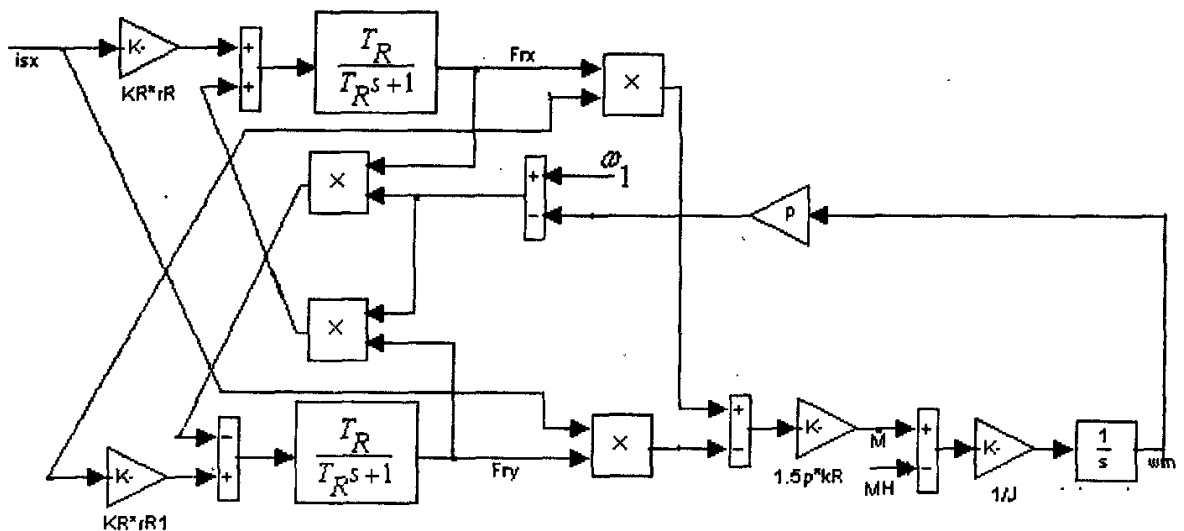


Рис. 8.7 .Структура АКЗ при питании от источника тока с базовым вектором тока статора

Если за базовый вектор принять вектор потокосцепления ротора и совместить вектор  $\bar{\psi}_R$  с осью  $x$  вращающейся системы координат, то в уравнениях (8.13) следует принять  $\psi_{Ry} = 0$ .

Тогда при питании статорных обмоток от источника напряжения получим:

$$\begin{aligned}
 u_{Sx} &= r(1 + T'_s s)i_{Sx} - \omega_k L'_s i_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx}, \\
 u_{Sy} &= r(1 + T'_s s)i_{Sy} + \omega_k L'_s i_{Sx} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{Sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx}, \\
 0 &= -k_R R_R i_{Sy} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\
 M &= 1.5 p k_R \psi_{Rx} i_{Sy}, \\
 J s \omega_m &= M - M_H.
 \end{aligned} \tag{8.17}$$

Существенной особенностью этой математической модели является то обстоятельство, что угловая скорость вращения системы координат зависит от значений переменных состояния машины и определяется из четвертого уравнения системы (8.17).

$$\omega_k = \frac{k_R R_R i_{Sy}}{\psi_{Rx}} + p \omega_m \tag{8.18}$$

Структура АКЗ во вращающейся системе координат совмещенной с потокосцеплением ротора и управлением от источников напряжения показана на рис. 8.8.

При питании статорных обмоток от источников тока уравнения (8.17) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned}
 k_R R_R i_{Sx} &= \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx}, \\
 k_R R_R i_{Sy} &= (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\
 M &= 1.5 p k_R \psi_{Rx} i_{Sy}, \\
 J s \omega_m &= M - M_H.
 \end{aligned} \tag{8.19}$$

Структура АКЗ во вращающейся системе координат, совмещенной с потокосцеплением ротора и управлением от источников тока, показана на рис. 8.9.

Можно заметить, что при постоянном сигнале  $i_{Sx}$  электромагнитный момент машины определится только составляющей тока статора  $i_{Sy}$ . В этом случае структура АКЗ повторяет структуру двигателя постоянного тока при управлении по цепи якоря.

**Математическое описание АКЗ во вращающейся системе координат, совмещенной с потокосцеплением ротора как при питании АКЗ от источника напряжения, так и при питании АКЗ от источника тока, является основой для синтеза асинхронных систем с векторным управлением.**

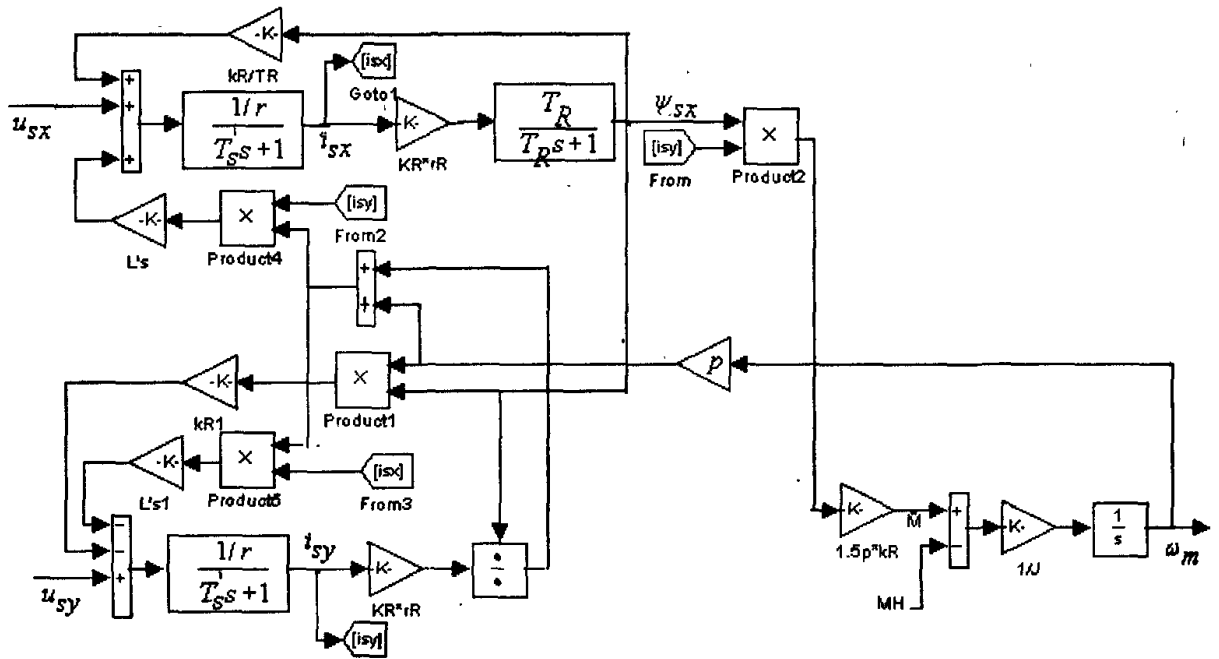


Рис. 8.8. Структурная схема АКЗ во вращающейся системе координат при питании от источника напряжения с базовым вектором потокосцепления ротора

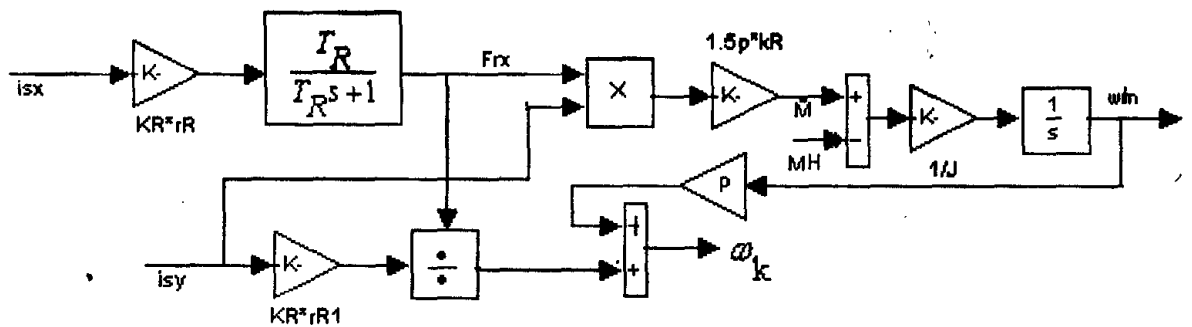


Рис. 8.9. Структурная схема АКЗ во вращающейся системе координат при питании от источника тока с базовым вектором потокосцепления ротора

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.4.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ СИСТЕМ С ЧАСТОТНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### ВОПРОСЫ

1. Структурные модели асинхронных систем с частотным управлением

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Структурные модели асинхронных систем с частотным управлением

Асинхронные системы с частотным управлением строятся как разомкнутые, поддерживающие определенное соотношение между частотой и напряжением, так и замкнутые. В разомкнутых системах выбор соотношения между частотой и напряжением зависит от момента нагрузки и определяется из условий сохранения перегрузочной способности.

$$\lambda = \frac{M_K}{M_H} = const, \quad (8.20)$$

где  $M_K$  — критический момент АКЗ,  $M_H$  — момент нагрузки на валу машины.

Закон изменения напряжения и частоты, удовлетворяющий требованию (8.20) при допущении  $R_s = 0$ , установлен М.П. Костенко.

Математически этот закон описывается уравнением:

$$\frac{U_s}{U_{НОМ}} = \frac{\omega_k}{\omega_1} \sqrt{\frac{M_H}{M_{НОМ}}}, \quad (8.21)$$

где  $U_{НОМ}$ ,  $\omega_1$ ,  $M_{НОМ}$  — номинальные значения напряжения, угловой частоты и момента машины.

Если закон изменения момента нагрузки заранее известен, то можно определить требуемые соотношения напряжения и частоты. Рассмотрим три классических вида нагрузок на валу машины:

$$M_H = const, P_H = M_H \omega_m = const, M_H = k \omega_m^2. \quad (8.22)$$

Этим нагрузкам соответствуют следующие соотношения между напряжением и частотой:

$$\left( \frac{U_s}{\omega_k} = const \right), \left( \frac{U_s}{\sqrt{\omega_k}} = const \right), \left( \frac{U_s}{\omega_k^2} = const \right) \quad (8.23)$$

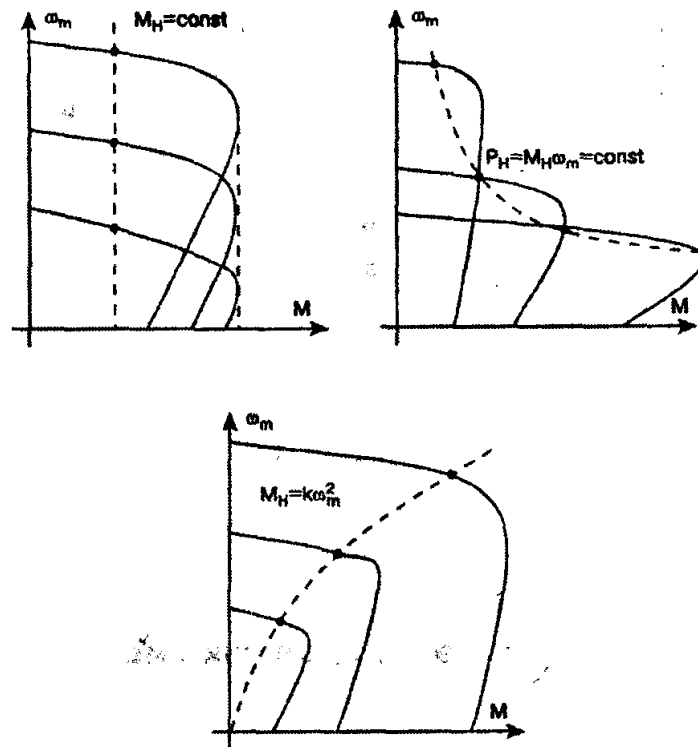


Рис. 8.10. Механические характеристики разомкнутых асинхронных электроприводов с частотным управлением

Механические характеристики АКЗ при регулировании напряжения и частоты для различных зависимостей момента от скорости приведены на рис. 8.10.

Простейшим из перечисленных законов является закон  $\frac{\bar{U}_s}{\omega_k} = const$ . Этот закон

при использовании инвертора с синусоидальной ШИМ реализован практически во всех полупроводниковых преобразователях, которые выпускаются многочисленными фирмами и предлагаются на рынке.

Удобство этого закона заключается в том, что электропривод может работать без отрицательной обратной связи по скорости и обладать естественной жесткостью механических характеристик в ограниченном диапазоне регулирования скорости.

В имеющихся на рынке преобразователях часто предусматривается возможность перестройки с целью обеспечения всех трех законов.

Реализация рассмотренных законов показана на рис. 8.11. Функциональный преобразователь (ФП) реализует одну из зависимостей (8.23), определяемую характером нагрузки. Полупроводниковый преобразователь (ПП) включает в себя автономный инвертор и его систему управления, задатчик интенсивности (ЗИ) формирует медленно нарастающий входной сигнал. В этом случае нарастание скорости не будет сопровождаться интенсивными колебаниями момента и скорости, которые наблюдаются при прямом пуске.

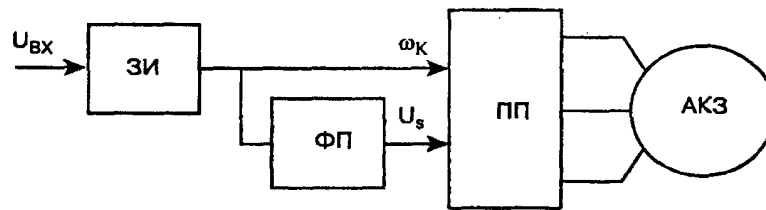


Рис. 8.11. Функциональная схема асинхронной системы с частотным управлением

Частотные способы управления АКЗ в замкнутых системах используются в основном тогда, когда заранее неизвестен характер изменения нагрузки и одновременно к системе не предъявляется жестких требований по динамике.

Частотные способы управления обеспечивают достижение требуемых статических, в основном энергетических, характеристик и используются в системах со «спокойной» нагрузкой. На входе этих систем включаются задатчики интенсивности, которые ограничивают скорость нарастания (убывания) входного сигнала до такой величины, при которой электромеханические процессы в системе можно считать установившимися, т. е. в уравнении (8.14) можно пренебречь

слагаемым  $J \frac{d\omega}{dt}$ ,  $(J \frac{d\omega}{dt} \ll M_H)$ .

Все законы частотного управления базируются на математическом описании асинхронной машины в установившемся режиме работы во вращающейся системе координат.

В этом случае  $\omega_m = const$ ,  $\frac{d\omega_m}{dt} = 0$ ,  $M = M_H$ , все пространственные векторы неподвижны в пространстве и неизменны по величине:  $\bar{u}_s = \bar{U}_s = const$ ,  $\bar{i}_s = \bar{I}_s = const$ ,  $\bar{i}_R = \bar{I}_R = const$ ,  $\bar{\psi}_s = \bar{\Psi}_s = const$ ,  $\bar{\psi}_R = \bar{\Psi}_R = const$ .

Поэтому производные от потокосцеплений также равны нулю. Тогда уравнения (8.14) после преобразования примут вид:

$$\begin{aligned} \bar{U}_s &= R_s \bar{I}_s + j\omega_k \bar{\Psi}_s = R_s \bar{I}_s + jX_{s\sigma} \bar{I}_s + j\omega_k \bar{\Psi}_m, \\ 0 &= \frac{R_R}{\beta_k} \bar{I}_R + j\omega_k \bar{\Psi}_R = \frac{R_R}{\beta_k} \bar{I}_R + jX_{R\sigma} \bar{I}_R + j\omega_k \bar{\Psi}_m, \end{aligned} \quad (8.24)$$

где  $\bar{\Psi}_m = L_m(\bar{I}_s + \bar{I}_R)$  — потокосцепление взаимоиндукции,  $\beta_k = \frac{\omega_k - p\omega_m}{\omega_k}$  —

скольжение,  $X_{s\sigma} = \omega_k L_{s\sigma} = \omega_k(L_s - L_m)$ ,  $X_{R\sigma} = \omega_k(L_R - L_m)$  — индуктивные

сопротивления рассеяния статора и ротора.

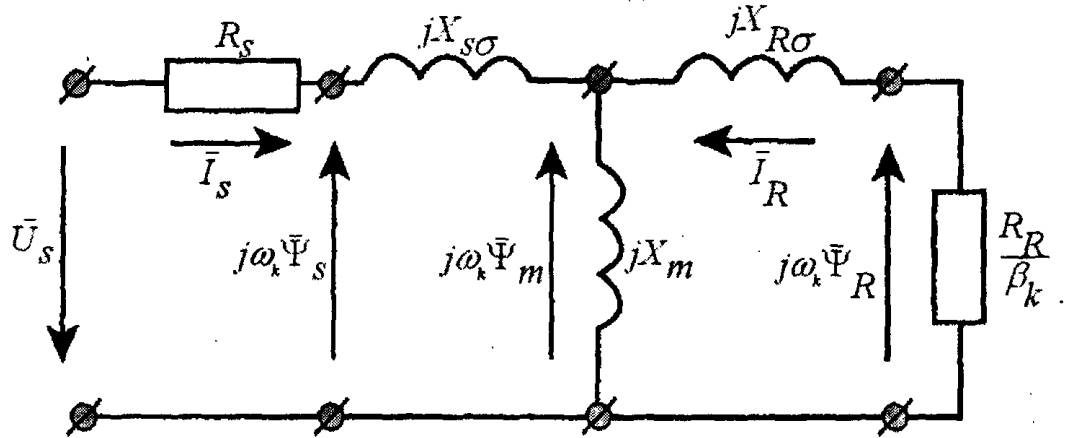


Рис. 8.12. Схема замещения АКЗ в установившемся режиме

Схема замещения асинхронного короткозамкнутого двигателя в установившемся режиме приведена на рис. 8.12. С использованием этой схемы замещения можно показать основные законы частотного управления машиной в замкнутых асинхронных системах. Этим закона четыре:

$$\begin{aligned}
 1. \frac{U_s}{\omega_k} = const, 2. \frac{E_s}{\omega_k} = \Psi_s = const, \\
 3. \frac{E_m}{\omega_k} = \Psi_m = const, 4. \frac{E_R}{\omega_k} = \Psi_R = const.
 \end{aligned}$$

Выражения момента для перечисленных законов управления находятся из схемы замещения:

$$1. M = \frac{\left(\frac{U_s}{\omega_k}\right)^2 \frac{\omega_k R_R}{\beta_k}}{(X_{s\sigma} + X_{R\sigma})^2 + \left(R_s + \frac{R_R}{\beta_k}\right)^2} \quad (8.25)$$

$$2. M = \frac{\Psi_s^2 \frac{\omega_k R_R}{\beta_k}}{(X_{s\sigma} + X_{R\sigma})^2 + \left(\frac{R_R}{\beta_k}\right)^2} \quad (8.26)$$

$$3.M = \frac{\Psi_m^2 \frac{\omega_k R_R}{\beta_k}}{(X_{R\sigma})^2 + \left(\frac{R_R}{\beta_k}\right)^2} \quad (8.27)$$

$$4.M = \frac{\Psi_R^2 \frac{\omega_k R_R}{\beta_k}}{\left(\frac{R_R}{\beta_k}\right)^2} \quad (8.28)$$

На рис. 8.13 приведены механические характеристики замкнутой асинхронной системы для всех четырех законов управления. Следует отметить, что перечисленные законы управления широко использовались и хорошо себя зарекомендовали в системах, где не требуется быстродействия по управлению и нет резких изменений момента нагрузки.

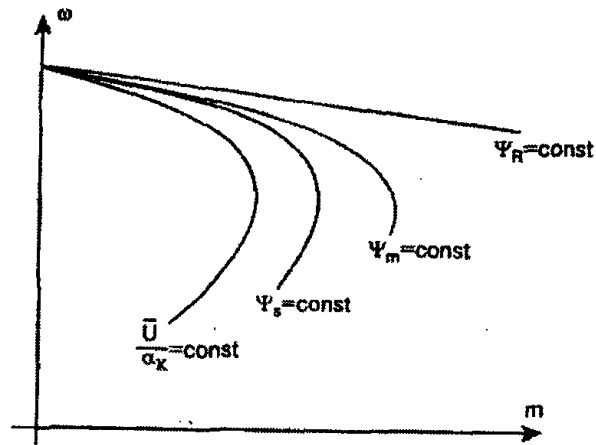


Рис. 8.13. Механические характеристики АКЗ при различных законах управления

Реализация постоянства потокосцепления требует применение отрицательной обратной связи по соответствующей ЭДС. Функциональная схема таких систем показана на рис. 8.14.

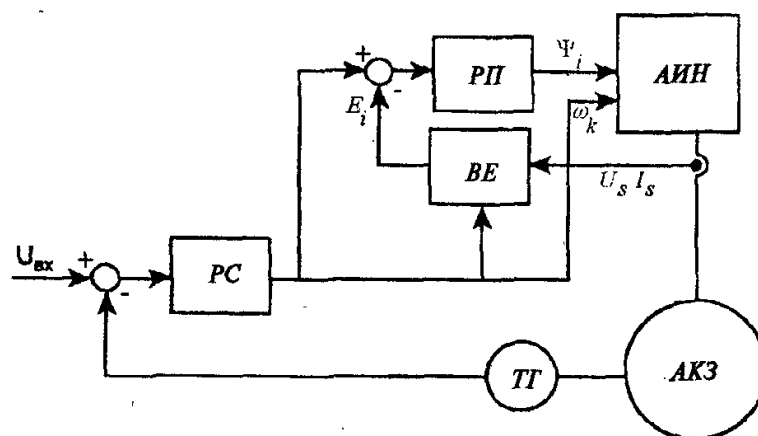


Рис. 8.14. Функциональная схема замкнутых асинхронных систем с частотным управлением

$$\begin{aligned}
 E_s &= U_s - R_s I_s \\
 E_m &= U_s - I_s \sqrt{R_s^2 + (\omega_k L_{s\sigma})^2} \\
 E_R &\approx U_s - I_s \sqrt{R_s^2 + [\omega_k (L_{s\sigma} + L_{R\sigma})]^2}.
 \end{aligned}
 \tag{8.29}$$

В системе использована обратная связь по скорости с регулятором скорости. Рассмотрим частотную систему, обеспечивающую поддержание постоянного потокосцепления ротора ( $\Psi_R = const$ ). Модель такой системы (*файл Drive\_U\_f\_Fr*) показана на рис. 8.15

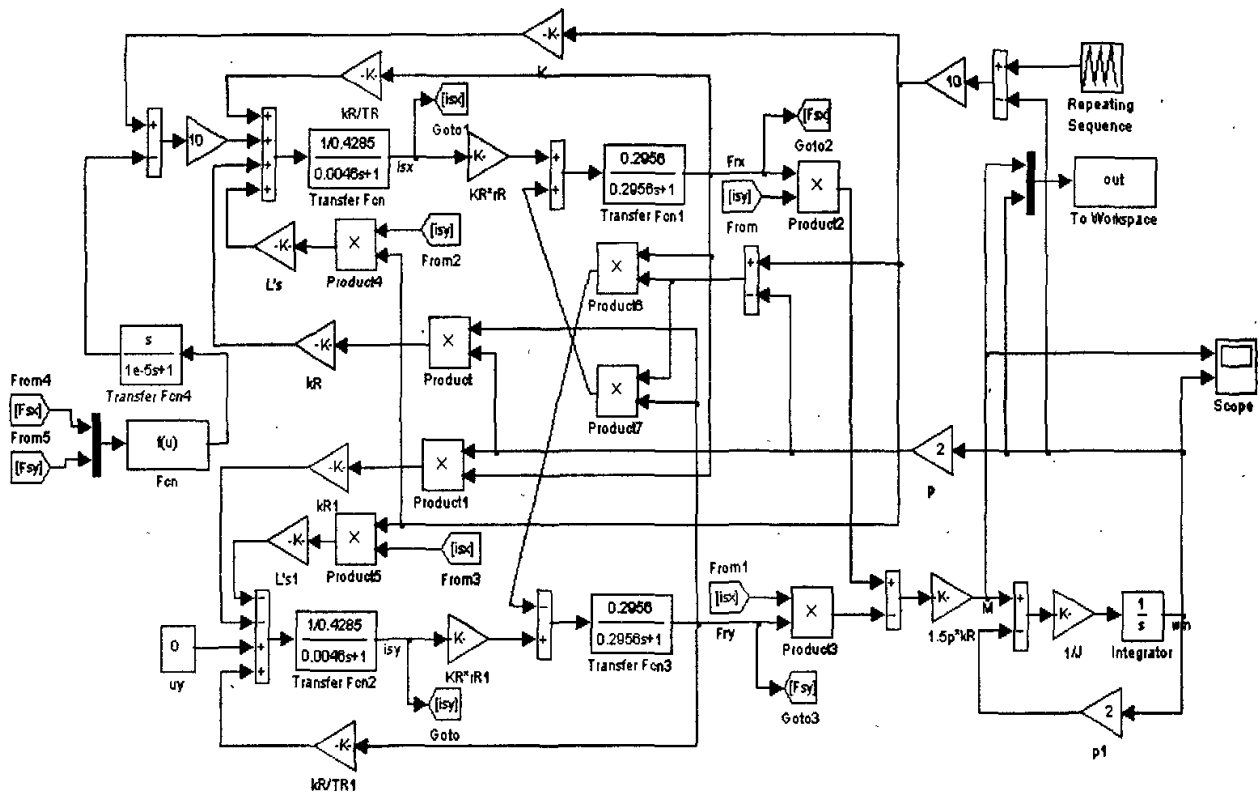


Рис. 8.15. Модель замкнутой асинхронной системы с частотным управлением и постоянным потокосцеплением ротора

Переходные процессы при линейном нарастании и убывании входного сигнала и моменте пропорциональном скорости вращения машины показаны на рис. 8.16.

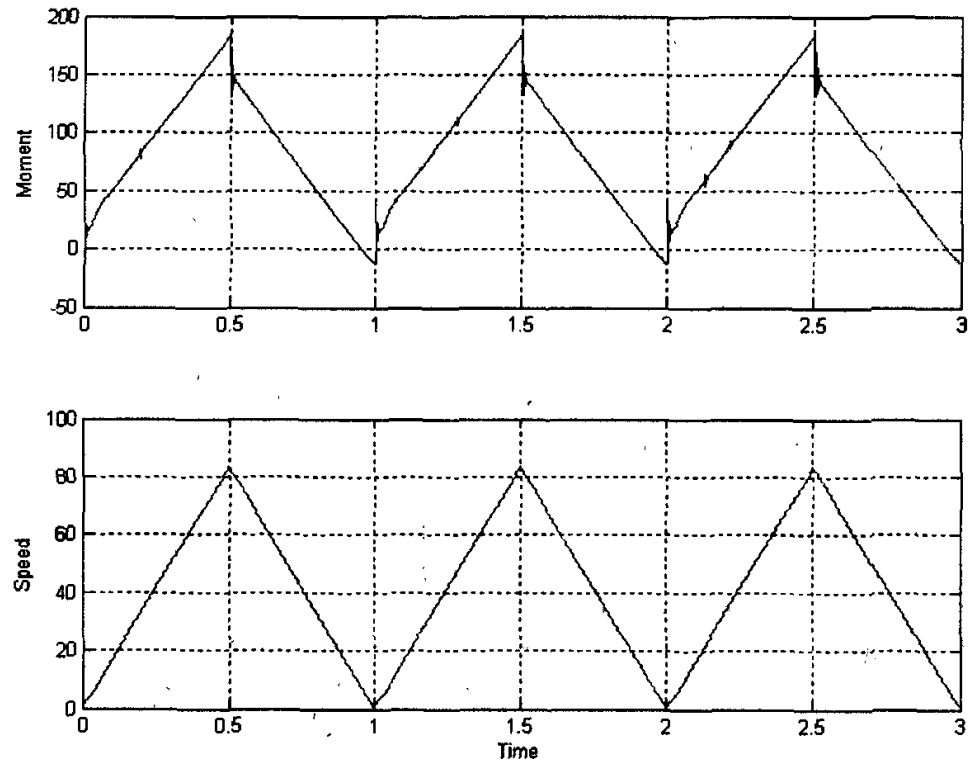


Рис. 8.16. Переходные процессы в замкнутой асинхронной системе с частотным управлением

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.4.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ СИСТЕМ С ЧАСТОТНО-ТОКОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### ВОПРОСЫ

1. Структурные модели асинхронных систем с частотно-токовым управлением

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Структурные модели асинхронных систем с частотно-токовым управлением

Рассмотрим один из возможных частотно-токовых способов управления системой с  $\psi_R = const$ , который используется при управлении АКЗ от источника тока. Из схемы замещения (рис. 8.12) нетрудно определить значение тока статора

$$\bar{I}_S = \frac{j\omega_k \bar{\psi}_R}{x_m} (1 + j\beta_k \omega_k T_R), \quad (8.30)$$

откуда можно найти зависимость между скалярными значениями тока статора, потокоцеплением ротора и абсолютным скольжением.

$$I_S = \frac{\psi_R}{L_m} \sqrt{1 + (\alpha_k T_R)^2}, \quad (8.31)$$

где  $\alpha_k = \frac{\omega_k - p\omega}{\omega_k} \omega_k = \omega_k - p\omega_m$  — абсолютное скольжение.

Реализация этой зависимости в замкнутой системе показана на функциональной схеме (рис. 8.17). Сигнал на выходе регулятора скорости суммируется с угловой электрической скоростью ротора и эта сумма определяет частоту на выходе инвертора. Поэтому на выходе регулятора скорости сигнал пропорционален скольжению. В нелинейном блоке (НБ) реализована зависимость (8.31). Релейный регулятор тока придает автономному инвертору свойства источника тока. Модель рассмотренной системы (*файл Drive\_I\_f\_Fr*) показана на рис. 8.18. Переходные процессы, полученные на модели, показаны на рис. 8.19.

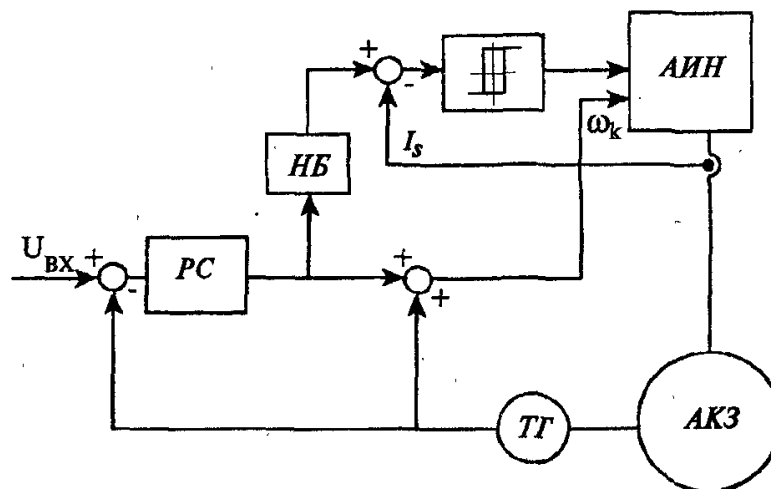


Рис. 8.17. Функциональная схема асинхронной системы с частотно-токовым управлением

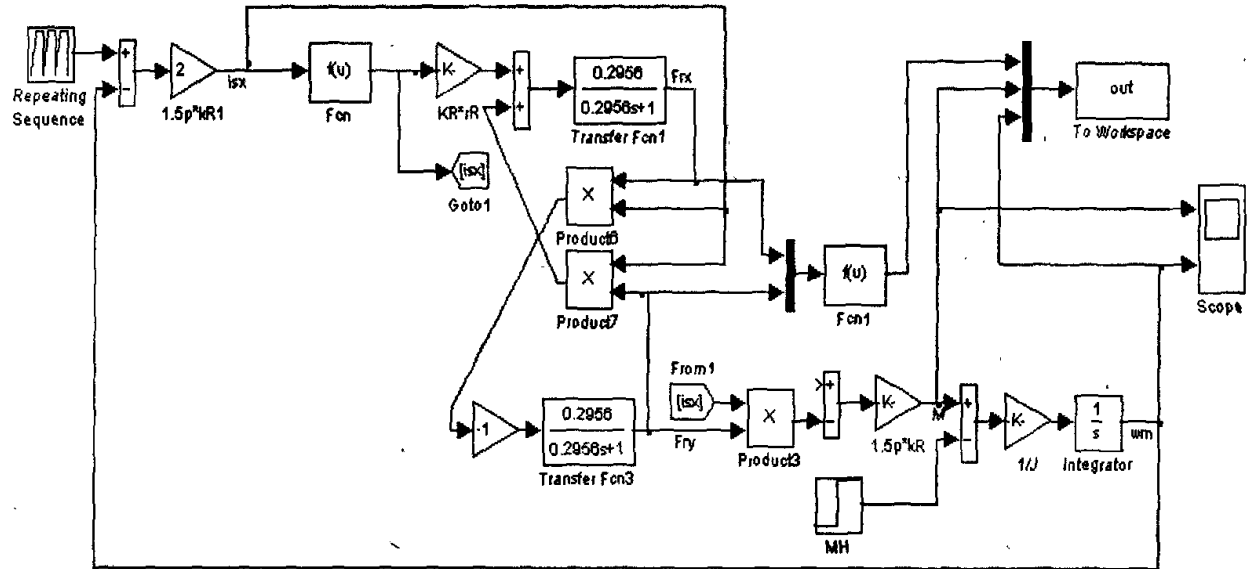


Рис. 8.18. Модель замкнутой асинхронной частотно-токовой системы

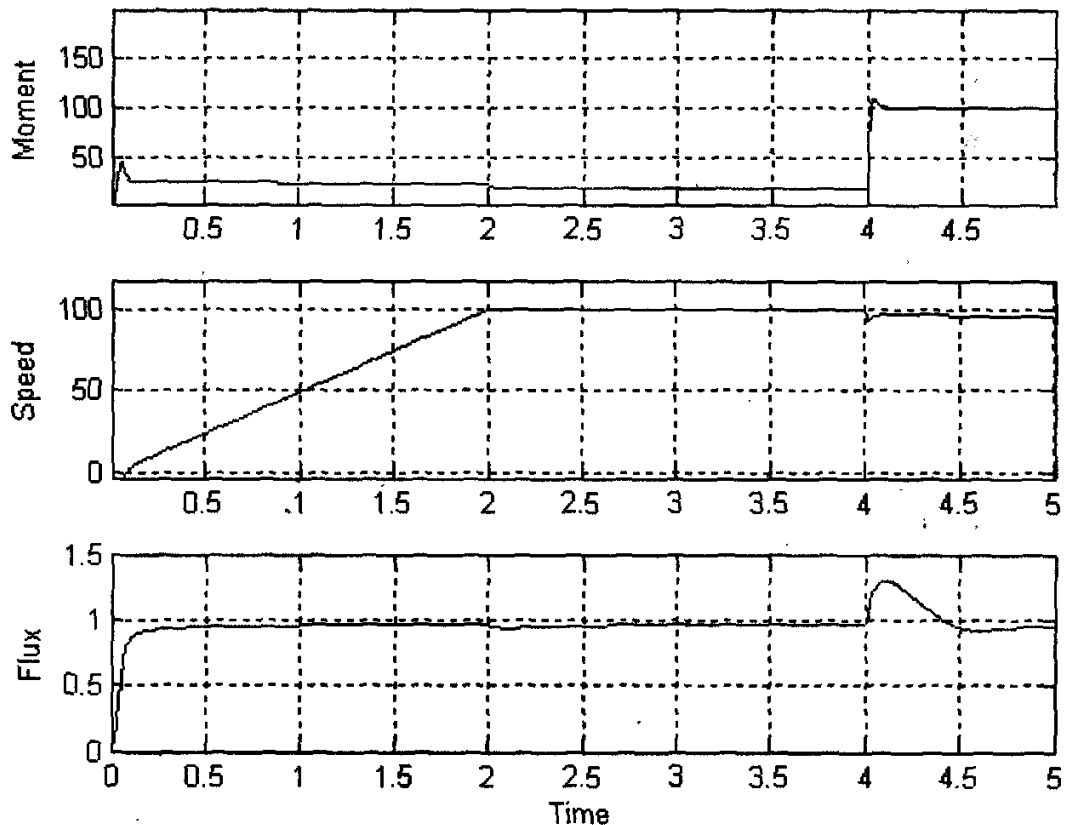


Рис. 8.19. Переходные процессы в замкнутой асинхронной частотно-токовой системе

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.4.6. МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ СИСТЕМ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### ВОПРОСЫ

1. Частотная асинхронная система с векторным управлением.

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Частотная асинхронная система с векторным управлением

Математическое описание и структурная схема АКЗ при его питании от источника напряжения для случая, когда базовым вектором является вектор потокосцепления ротора, приведены выше (уравнения 8.17, 8.18, рис. 8.8). В этом случае, как это видно из структурной схемы (рис. 8.8), АКЗ как объект управления имеет два взаимосвязанных канала. Канал по составляющей  $x$ , определяющий потокосцепление ротора, и канал по составляющей  $y$ , определяющий составляющую тока  $i_{sy}$ . Если организовать управление так, чтобы на выходе канала  $x$  поддерживать постоянный сигнал, то потокосцепление ротора будет постоянным, а сигнал в канале  $y$  будет определять момент. В этом случае структурная схема АКЗ повторяет структурную схему ДПТ. Для такой реализации необходимо в канале  $x$  синтезировать регулятор потокосцепления, на входе которого поддерживать постоянный сигнал, а в канале  $y$  синтезировать регуляторы тока и скорости.

Структурная схема замкнутой частотной системы с векторным управлением показана на рис. 8.20.

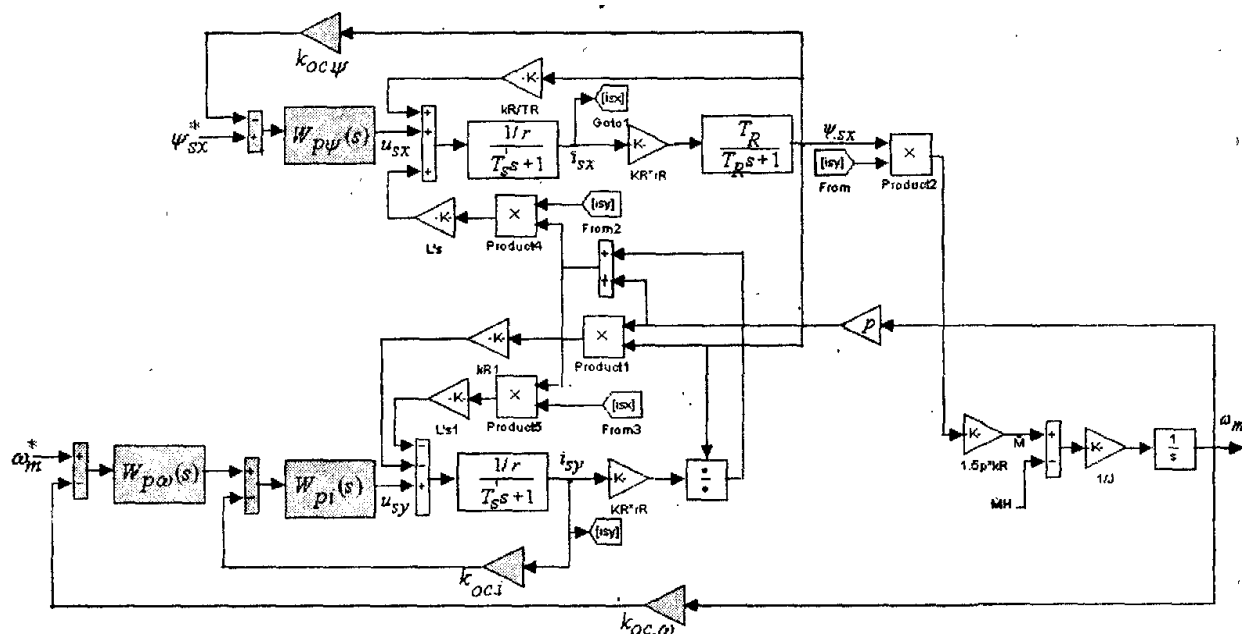


Рис. 8.20. Структурная схема замкнутой асинхронной системы с векторным управлением

В канале регулирования потокосцепления ротора, как правило,  $T_R \gg T_s'$ , поэтому в качестве регулятора потокосцепления целесообразно выбрать

ПИ-регулятор с передаточной функцией  $W_{p\psi}(s) = \frac{k_{p\psi}(T_R s + 1)}{T_R s}$ , тогда для реализации

в этом канале оптимума по модулю коэффициент усиления регулятора рассчитывается из условия:

$$k_{pv} = \frac{r}{2T'_s k_R R_R k_{oc.\psi}} \quad (8.32)$$

Рассчитанный таким образом ПИ-регулятор компенсирует перекрестные связи в канале  $x$ .

Для компенсации влияния перекрестных связей в канале  $y$  следует также выбрать ПИ-регулятор с передаточной функцией  $W_{pi}(s) = \frac{k_{pi}(T'_s s + 1)}{T'_s s}$ .

Тогда передаточная функция замкнутого токового контура в канале  $y$  будет равна:

$$W_i(s) = \frac{1}{k_{oc.i}} \frac{1}{\frac{T'_s r}{k_{pi} k_{oc.i}} s + 1} \approx \frac{1}{k_{oc.i}} \quad \text{при} \quad k_{pi} \gg 1. \quad (8.33)$$

При компенсированных перекрестных связях канал  $y$ , отвечающий за момент, полностью аналогичен системе постоянного тока. Для придания этой системе астатизма по скорости необходимо выбрать ПИ-регулятор скорости с передаточной функцией

$$W_{p\omega}(s) = \frac{k_{p\omega}(T_{p\omega} s + 1)}{T_{p\omega} s}. \quad (8.34)$$

Тогда передаточная функция системы по возмущению будет равна

$$W'(s) = \frac{-k_{oc.i}}{1.5 p k_R k_{oc.\omega} k_{p\omega}} \frac{T_{p\omega} s}{\frac{T_{p\omega} J k_{oc.i}}{k_{oc.\omega} k_{p\omega}} s^2 + T_{p\omega} s + 1} \approx \frac{-k_{oc.i}}{1.5 p k_R k_{oc.\omega} k_{p\omega}} \frac{T_{p\omega} s}{T_{p\omega} s + 1}. \quad (8.35)$$

при  $k_{p\omega} \gg 1$ .

Провал скорости при приложении момента определится из выражения:

$$\Delta\omega_m = \frac{-k_{oc.i}}{1.5 p k_R k_{oc.\omega} k_{p\omega}} \Delta M_H, \quad (8.36)$$

что может быть определяющим в выборе коэффициента усиления регулятора скорости.

Модель асинхронной мехатронной системы вместе с регуляторами скорости и потока, рассчитанными в соответствии с вышеизложенным, представлена на рис. 8.21 (*файл Drive\_Vectr\_Fx\_U*). Здесь же для сравнения помещена модель эквивалентной системы постоянного тока.

На рис. 8.22 показаны результаты моделирования системы «в малом». Переходные процессы в системе «в большом» приведены на рис. 8.23. Сравнение результатов асинхронной системы с векторным управлением и эквивалентной системы постоянного тока показывает их полную идентичность при малых и больших сигналах управления.

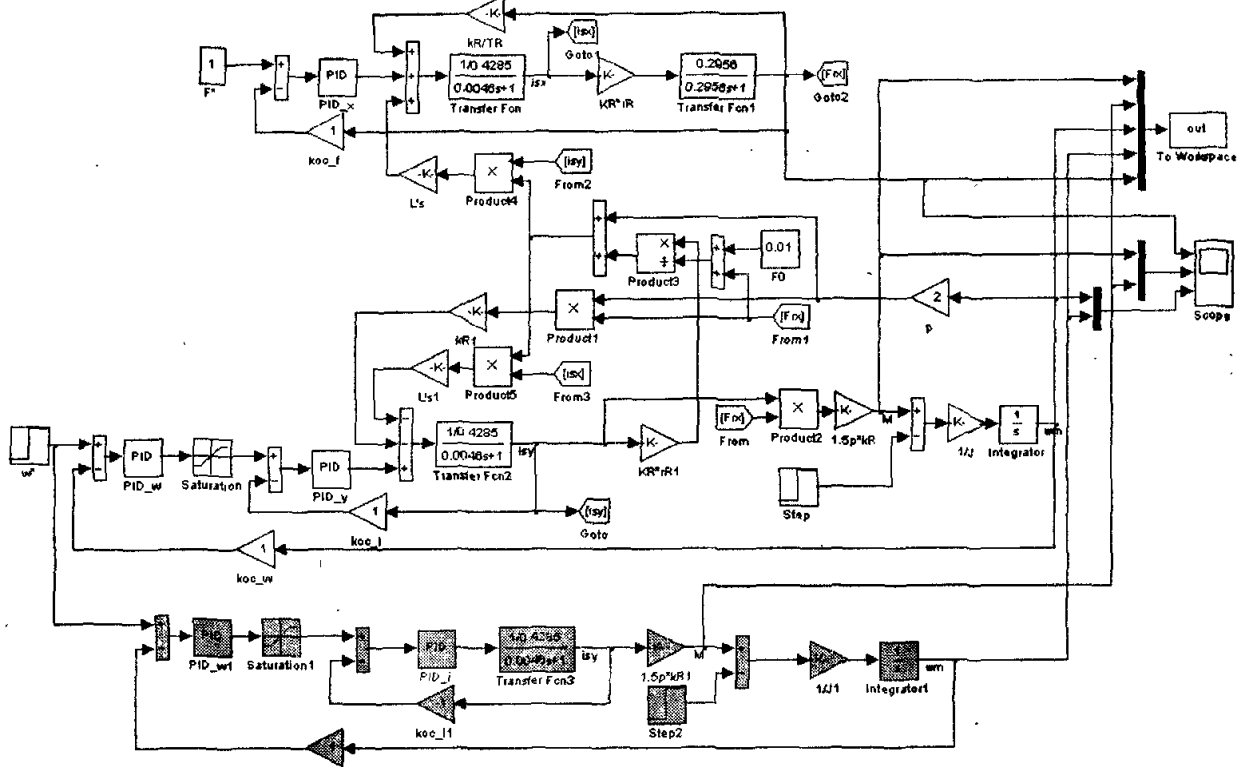


Рис. 8.21. Модели асинхронной векторной системы и эквивалентной системы постоянного тока

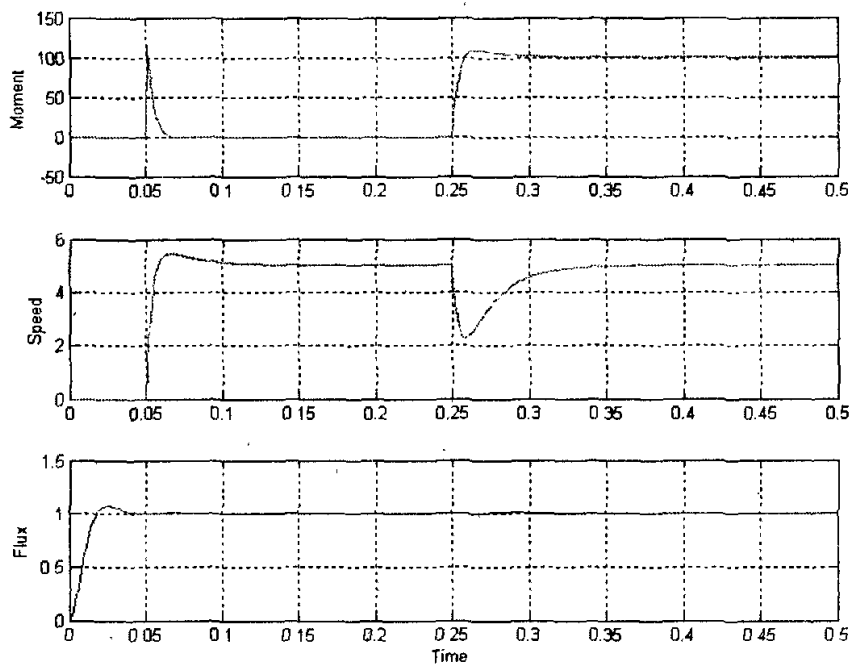


Рис. 8.22. Переходные процессы «в малом» в замкнутой асинхронной системе с векторным управлением

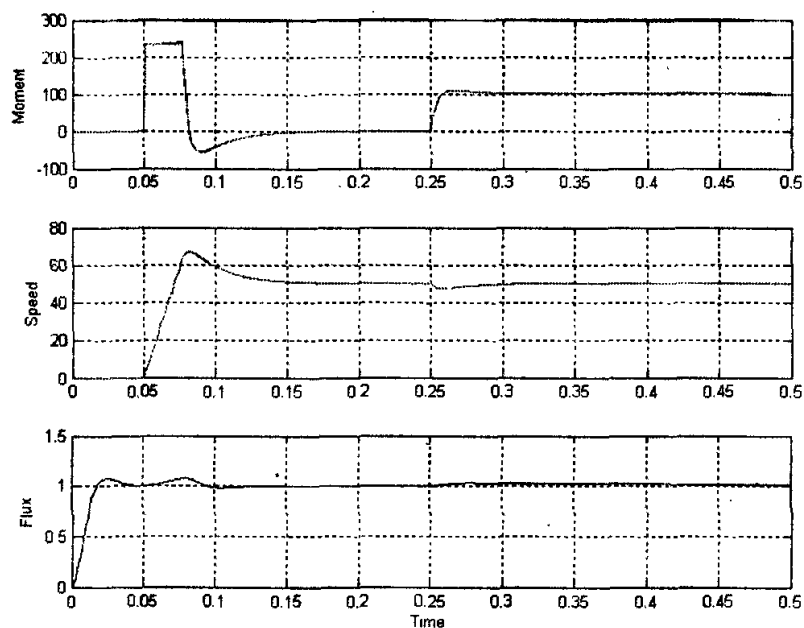


Рис. 8.23. Переходные процессы «в большом» в замкнутой асинхронной системе с векторным управлением

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.4.7. МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ СИСТЕМ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

### ВОПРОСЫ

1. Частотно-токовая асинхронная система с векторным управлением.

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

### 1. Частотно-токовая асинхронная система с векторным управлением

Реализация режима источника тока в автономном инверторе осуществляется, как это было описано выше, введением релейных элементов, на вход которых подается разность управляющего сигнала и сигнала с датчика реального тока двигателя. Структурная схема замкнутой частотно-токовой системы с векторным управлением, которая управляется от инвертора тока с выходной частотой, определенной равенством (8.18), показана на рис. 8.24. Следует подчеркнуть, что выходная частота инвертора формируется в зависимости от значения переменных состояния системы  $i_{sy}, pU, \psi_{Rx}$ .

В системе имеются два канала, один определяет поток в машине, другой — момент. Синтез регуляторов при построении подчиненной системы в каждом канале осуществим в соответствии с положениями, изложенными ранее. В канале потока выбран П-регулятор с коэффициентом усиления  $k_{\psi x} = 700$ , в канале скорости синтезирован ПИ-регулятор с параметрами  $k_{\Pi\omega} = 10$ ,  $k_{I\omega} = 400$ .

Коэффициенты передач регуляторов выбираем так, чтобы постоянная времени в канале управления потоком была бы, по крайней мере, на порядок меньше постоянной времени в канале управления скоростью. Модель электропривода вместе с регуляторами скорости и потока, а также с ограничениями, представлена на рис. 8.25. (файл *Drive\_Vectr\_Fx\_1*).

Здесь же для сравнения использована модель эквивалентной системы постоянного тока.

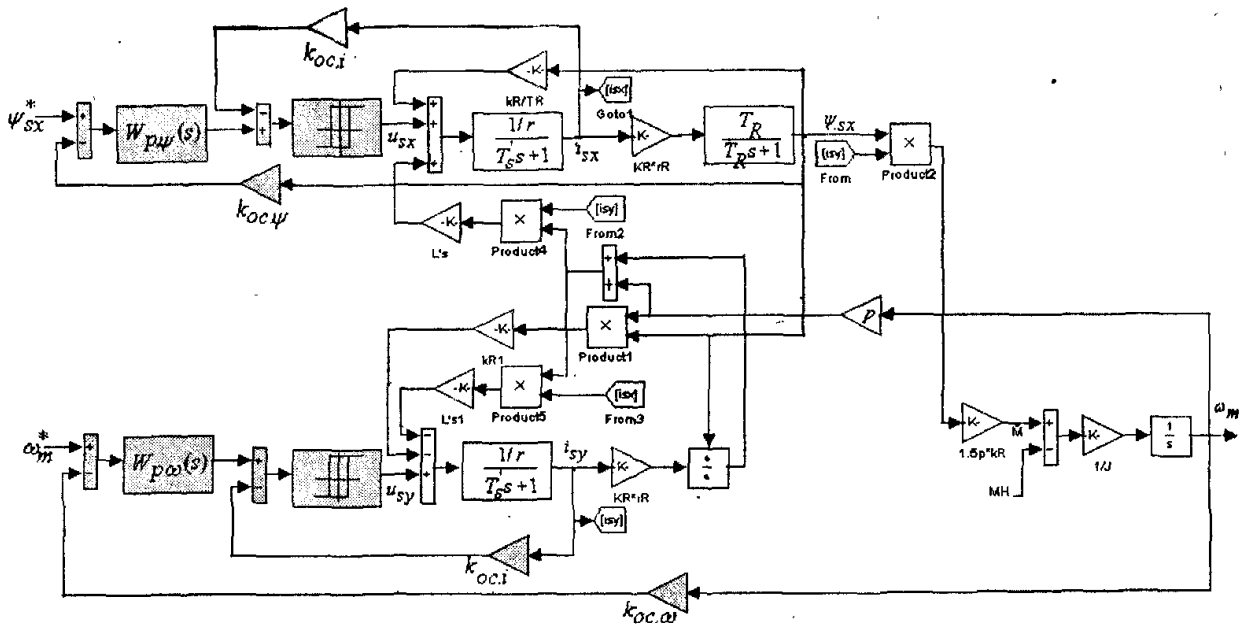


Рис. 8.24. Структурная схема замкнутой асинхронной частотно-токовой системы с векторным управлением

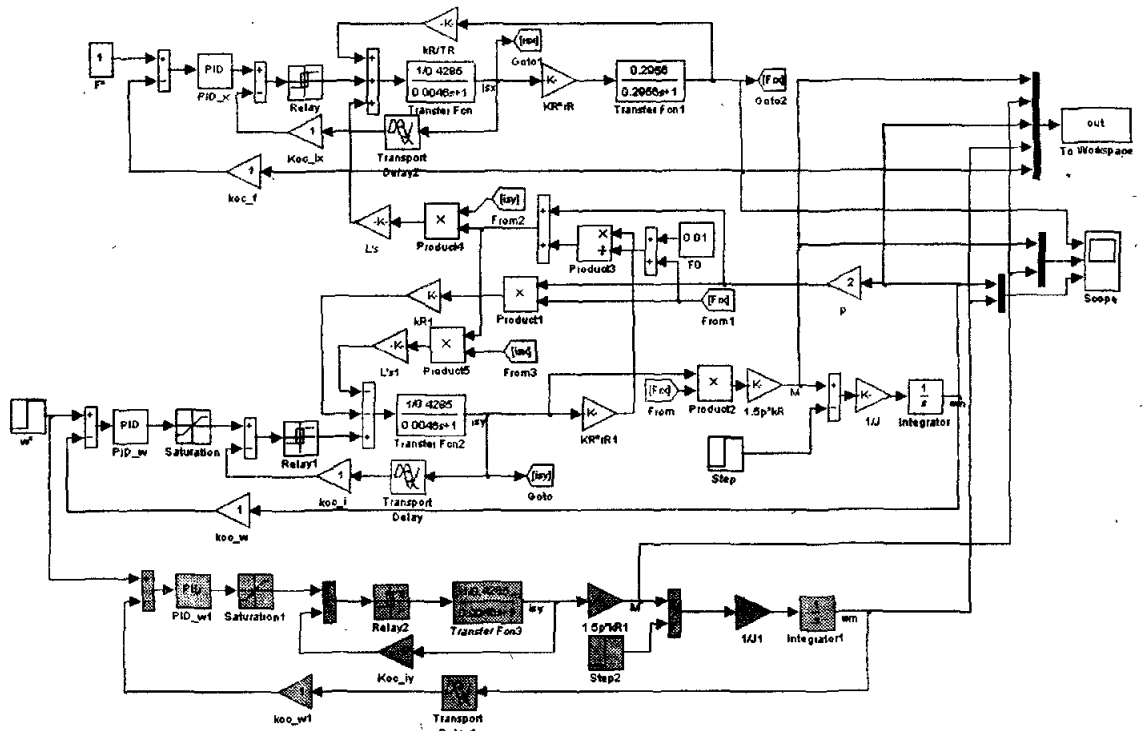


рис. 8.25. Модели асинхронной системы с частотно-токовым векторным управлением и эквивалентной системой постоянного тока

На рис. 8.26. показаны результаты моделирования системы «в малом» по моменту, скорости и потоку. Переходные процессы в системе «в большом» приведены на рис. 8.27. Достаточно простая структура замкнутого асинхронного электропривода получается вследствие того, что изначально в математическое описание заложены все необходимые преобразования, а именно:

- преобразование системы координат;
- ориентация системы координат по оси потокосцепления ротора;
- идеальность источника тока, питающего машину.

Математическое описание, структурные схемы и модели, рассмотренные выше, соответствует описанию по «гладкой» составляющей и не учитывает импульсного характера напряжения на выходе инвертора.

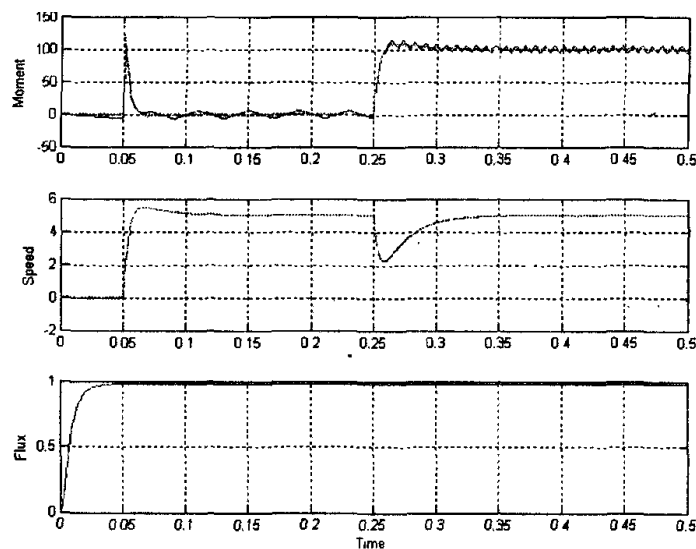


Рис. 8.26. Переходные процессы «в малом» в замкнутой асинхронной частотно-токовой системе

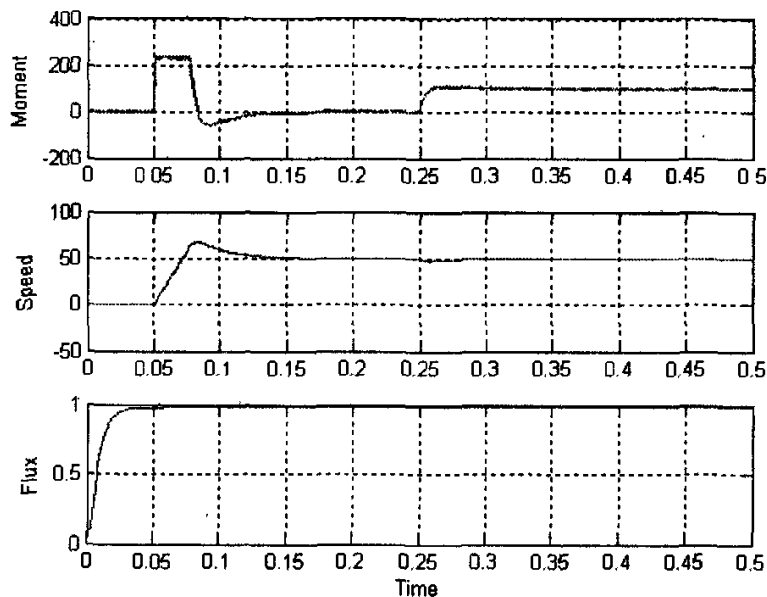


Рис. 8.27. Переходные процессы «в большом» в замкнутой асинхронной частотно-токовой системе с векторным управлением

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.4.8. ВИРТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ И СТЕНДЫ АСИНХРОННОЙ СИСТЕМЫ

### ВОПРОСЫ

1. Виртуальная частотно-токовая асинхронная система с векторным управлением.
2. Электромагнитные процессы в замкнутой асинхронной системе.
3. Имитационные лабораторные стенды асинхронных систем в пакете Sim Power System.

### ЛИТЕРАТУРА

Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368.

#### **1. Виртуальная частотно-токовая асинхронная система с векторным управлением**

Рассмотрим модель, в которой функционально реализован «токовый коридор» при использовании инвертора напряжения, а выходная частота инвертора определяется из выражения (8.18). Модель такой системы приведена на рис. 8.28. (файл *Virt\_Drive\_Fr\_1*). В данной модели реализована вращающаяся система координат, ориентированная по потокосцеплению ротора. Регуляторы в канале потокосцепления и скорости имеют те же параметры, как и в системе рис. 8.24.

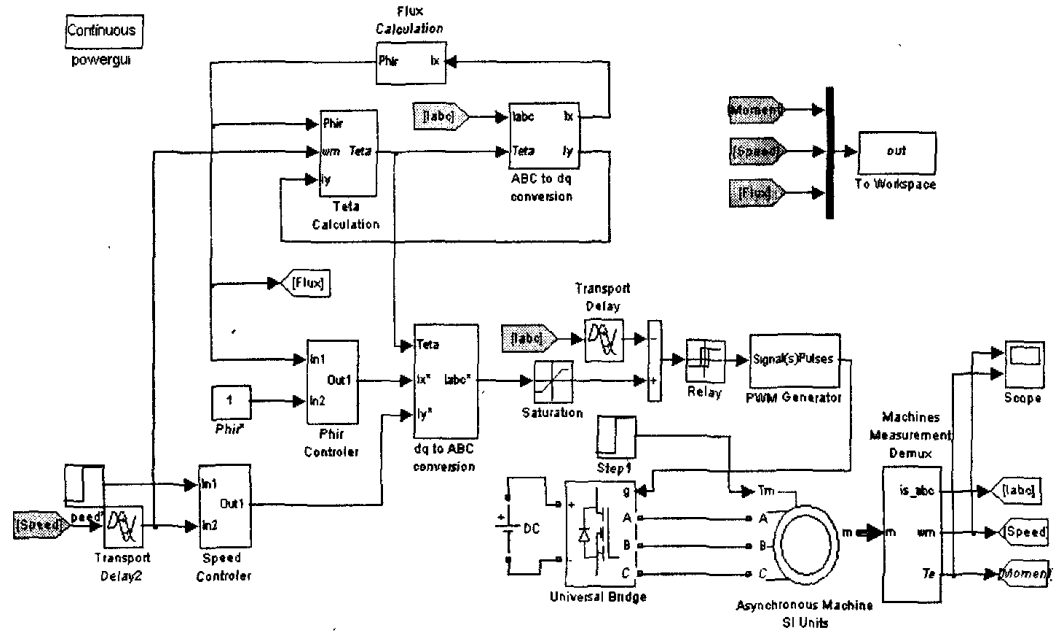


Рис. 8.28. Виртуальная частотно-токовая асинхронная система с векторным управлением

«Токовый коридор» реализован с использованием релейного элемента Relay на входе блока управления (PWM Generator) инвертором и отрицательной обратной связи по току.

В реальных системах потокосцепление ротора определяется с использованием датчиков Холла, либо вычисляется в соответствии с уравнением 8.19 по выражению

$$\psi_{Rx} = \frac{k_R r_R \bar{T}_R}{1 + \bar{T}_R s} i_{Sx} \quad (8.37)$$

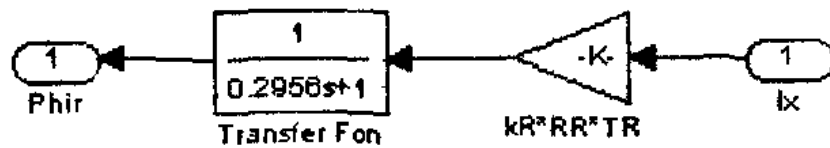
В этом выражении значение тока  $i_{sx}$  определяется на основании реального сигнала с датчика тока.

Модель (рис. 8.28) практически повторяет модель из библиотеки Powerdemo

Модель содержит:

- виртуальный асинхронный двигатель;
- трехфазный автономный инвертор на IGBT транзисторах (блок Universal Bridge);
- блоки ABC-XY и XY-ABC, (рис. 8.29) осуществляющие преобразование неподвижной трехфазной системы координат во вращающуюся двухфазную и вращающуюся двухфазную в неподвижную трехфазную в соответствии с принципами, объясненными выше;
- блок определения угла поворота системы координат (блок Theta Calculation рис. 8.30). Этот блок определяет выходную частоту инвертора в соответствии с выражением (8.18), т. к. только в этом случае оси координат вращающейся системы будут сориентированы заданным образом (уравнение 8.18);
- блок вычисления потокосцепления ротора в соответствии с уравнением 8.37 (Flux Calculator, рис. 8.31);
- блок задания потокосцепления (блок Phir\*) и регулятор тока по оси x (блок Phir Controler);
- блок задания скорости (Speed\*) и регулятор скорости (Speed Controler).

Переходные процессы по скорости, моменту и потокосцеплению показаны на рис. 8.32, 8.33. Они достаточно хорошо совпадают с результатами, полученными на математической модели (рис. 8.26, 8.27).



$$\text{Phir} = kR \cdot RR \cdot TR \cdot ix / (1 + TR \cdot s)$$

$$Tr = Lr / Rr = 0.2956 \text{ s}$$

$$RR = 0.2205 \text{ ohms}$$

Рис. 8.31. Блок вычисления потокосцепления ротора

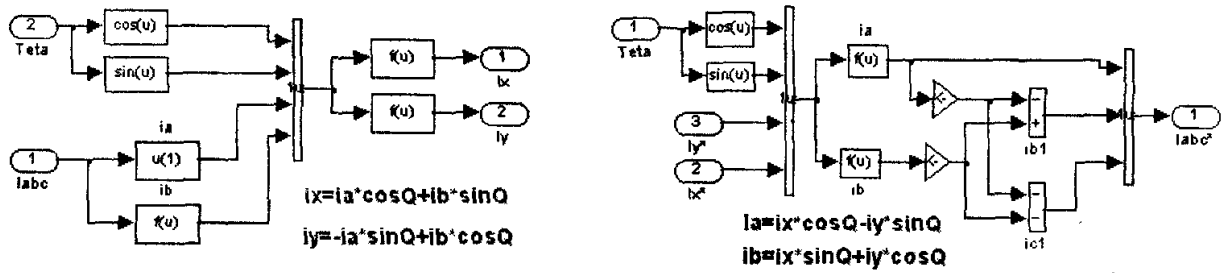
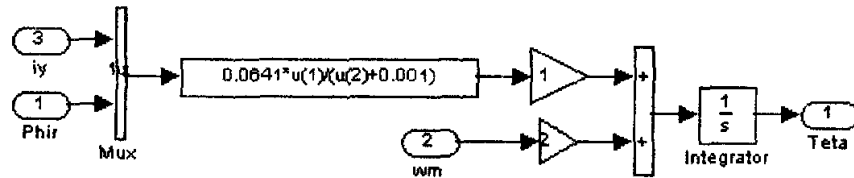


Рис. 8.29. Блок преобразований



$Teta = \text{Electrical angle} = \text{integ} (wr + wm)$

$wr = \text{Rotor frequency (rad/s)} = KR \cdot RR \cdot iy / Phir$

$wm = \text{Rotor mechanical speed (rad/s)}$

$Rr = 0.2205 \text{ ohms}$

$Tr = Lr / Rr = 0.2956 \text{ s}$

Рис. 8.30. Блок вычисления угла поворота системы координат

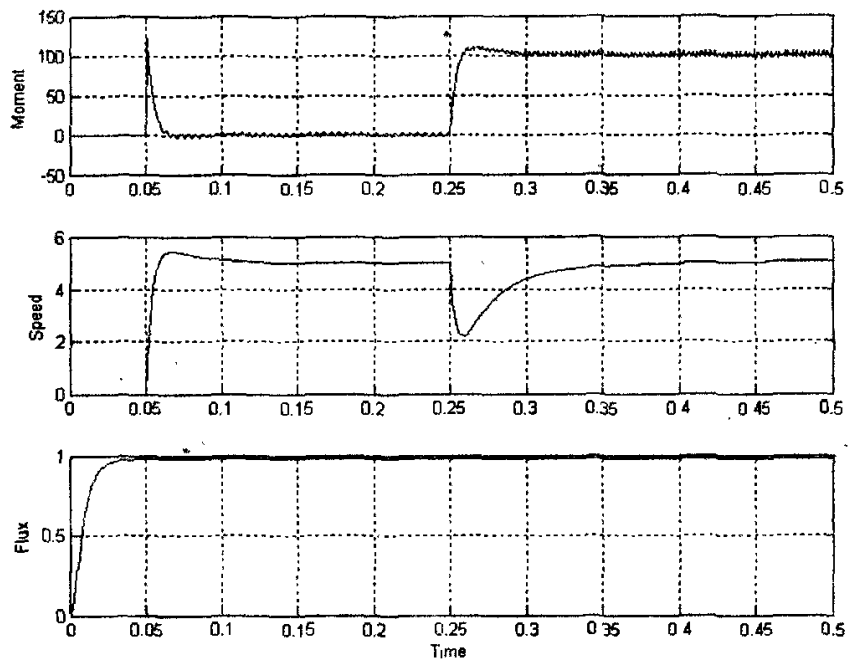


Рис. 8.32. Переходные процессы «в малом» в виртуальном асинхронном электроприводе

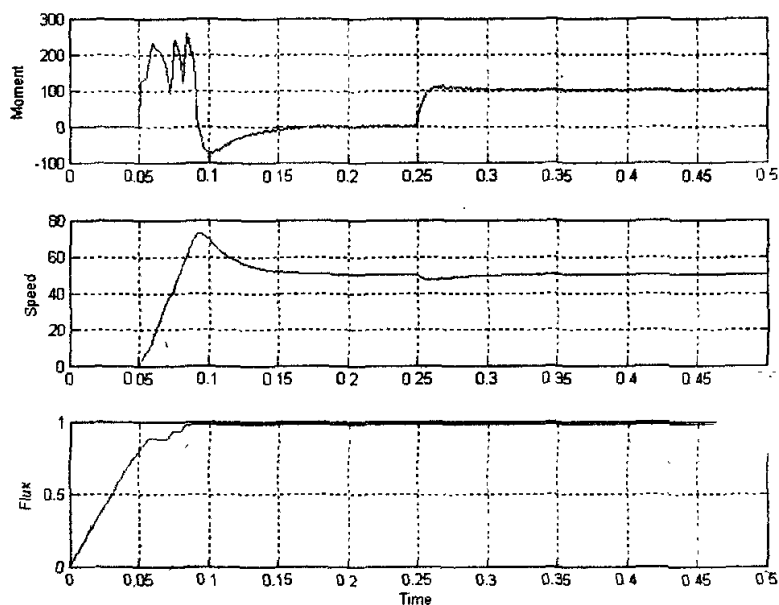


Рис. 8.33. Переходные процессы «в большом» в виртуальном асинхронном электроприводе

### 8.6. Электромагнитные процессы в замкнутой асинхронной системе

Электромагнитные процессы в замкнутой асинхронной системе, определяющие его энергетические характеристики, исследуются в установившемся режиме и без учета высокочастотных пульсаций тока, вызванных импульсным характером напряжения на выходе инвертора (анализ по гладкой составляющей).

В этом случае электромагнитные переменные зависят от закона управления и не зависят от метода реализации этого закона (частотного или векторного). Рассмотрим расчет этих характеристик для закона с поддержанием постоянного потокосцепления ротора. Анализ удобнее осуществлять во вращающейся системе координат, поскольку все электромагнитные переменные состояния постоянны, а их производные равны нулю.

Математическое описание АКЗ в установившемся режиме находится из уравнения (8.17) при

$$i_{Sx} = I_{Sx} = \text{const}, \quad i_{Sy} = I_{Sy} = \text{const}, \quad \varphi_{Rx} = \Psi_{Rx} = \text{const},$$

$$\Psi_{Ry} = 0, \quad u_{Sx} = U_{Sx} = \text{const}, \quad u_{Sy} = U_{Sy} = \text{const}$$

$$U_{Sx} = rI_{Sx} - \omega_K L'_S I_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \Psi_{Rx},$$

$$U_{Sy} = rI_{Sy} + \omega_K L'_S I_{Sx} + k_R p \omega_m \Psi_{Rx} \quad (8.38)$$

$$0 = -k_R R_R I_{Sx} + \frac{1}{T_R} \Psi_{Rx},$$

$$0 = -k_R R_R I_{Sy} + (\omega_K - p \omega_m) \Psi_{Rx} \quad (8.39)$$

Из двух последних уравнений находятся значения токов в осях  $x$ ,  $y$ .

$$I_{Sx} = \frac{\Psi_{Rx}}{k_R R_R T_R}, \quad I_{Sy} = (\omega_K - p \omega_m) \frac{\Psi_{Rx}}{k_R R_R}. \quad (8.40)$$

Проекция напряжения на статоре находятся из уравнений (8.38)  
Максимальное напряжение на статоре

$$U_m = \sqrt{U_{Sx}^2 + U_{Sy}^2} \quad (8.41)$$

Выражения для определения остальных электромагнитных характеристик помещены в таблице 8.2

Выражения для проекций токов и напряжений  $I_{sx}$ ,  $I_{sy}$ ,  $U_{sx}$ ,  $U_{sy}$  нетрудно получить и для других законов управления асинхронной машиной. После чего определяют остальные электромагнитные характеристики по выражениям таблицы. Важно

подчеркнуть, что в асинхронных системах закон управления влияет на электромагнитные процессы и тесно связанные с ними энергетические характеристики.

Максимальный ток статора	$I_m$	$\sqrt{I_{Sx}^2 + I_{Sy}^2}$
Фазовый сдвиг между напряжением и током	$\varphi$	$\arctg \frac{U_y}{U_x} - \arctg \frac{I_y}{I_x}$
Средний ток в транзисторе инвертора	$I_{T.ср}$	$\frac{I_m}{2\pi} (1 + \cos \varphi)$
Эффективный ток в транзисторе инвертора	$I_T$	$\frac{I_m}{2} \sqrt{1 - \frac{\varphi}{\pi} + \frac{\sin 2\varphi}{2\pi}}$
Средний ток в диоде инвертора	$I_{D.ср}$	$\frac{I_m}{2\pi} (1 - \cos \varphi)$
Эффективный ток в диоде инвертора	$I_D$	$\frac{I_m}{2} \sqrt{\frac{\varphi}{\pi} - \frac{\sin 2\varphi}{2\pi}}$
Средний ток источника	$I$	$I_m \cos \varphi$

Таблица 8.2

Алгоритм расчета электромагнитных характеристик включает следующую последовательность:

1. задается частота на выходе инвертора  $0 \leq \omega_k \leq \omega_{ном}$ .
2. задается скорость двигателя в диапазоне  $\omega_{т.ном} \leq \omega_m \leq \frac{\omega_k}{p}$ .
3. Для каждого значения абсолютного скольжения  $\alpha = \omega_k - p\omega_m$ .

рассчитываются токи и напряжения по формулам, приведенным выше в таблице. Статические характеристики в асинхронной системе могут быть определены с использованием виртуальных моделей.

### 8.7. Имитационные лабораторные стенды асинхронных систем в пакете Sim Power System

В последней версии пакета Sim Power System добавлена библиотека асинхронных систем, показанная на рис. 8.34.

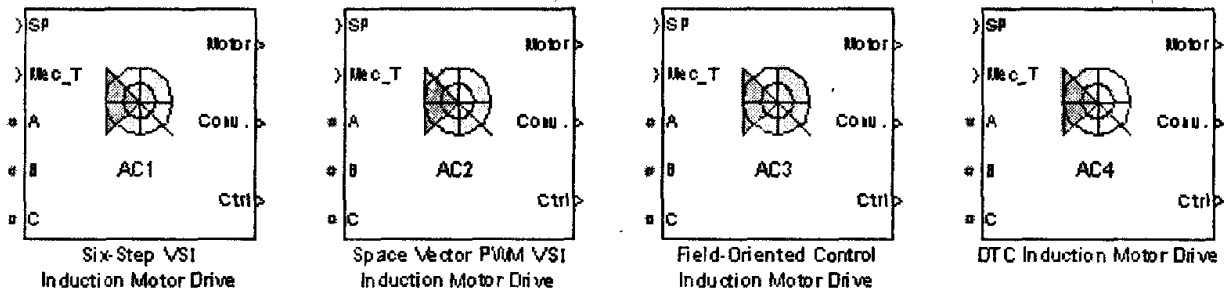


Рис. 8.34. Библиотека лабораторных стендов асинхронных систем

Эта библиотека содержит асинхронную систему с алгоритмом управления инвертором  $\alpha = 180^\circ$  и частотным регулированием (Six-Step VSI Induction Motor Drive), асинхронную систему с частотным регулированием и векторным алгоритмом управления инвертором (Space Vector PWM VSI Motor Drive) асинхронную систему с векторным управлением и базовым вектором потокосцепления ротора (Field-Oriented Control Induction Motor Drive) и асинхронную систему с прямым управлением моментом (DTC Induction Motor Drive).

*Разомкнутая асинхронная система с алгоритмом управления инвертором  $\alpha = 180^\circ$ .*

Простейшей из перечисленных систем является разомкнутая система с алгоритмом управления инвертором  $\alpha = 180^\circ$  и поддержанием  $\frac{U}{f} = const$ . Этот способ управления трехфазным инвертором подробно описан в п. 5.9.3 гл. 5.

Асинхронная система, реализованная на базе такого инвертора описана в п. 8.3 гл. 8.

Функциональная схема системы представлена на рисунке 8.35.

Система содержит:

- трехфазный мостовой управляемый выпрямитель (УВ) (Three-phase full converter);
- систему управления УВ, содержащую регулятор постоянного напряжения питания инвертора (DC bus voltage regulator) и блок генерирования импульсов управления УВ (Bridge firing unit);
- цепь сброса энергии торможения исполнительной асинхронной машины (Braking chopper);
- трехфазный инвертор (Three-phase inverter);
- систему управления инвертором (Six step generator);
- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (Induction motor).

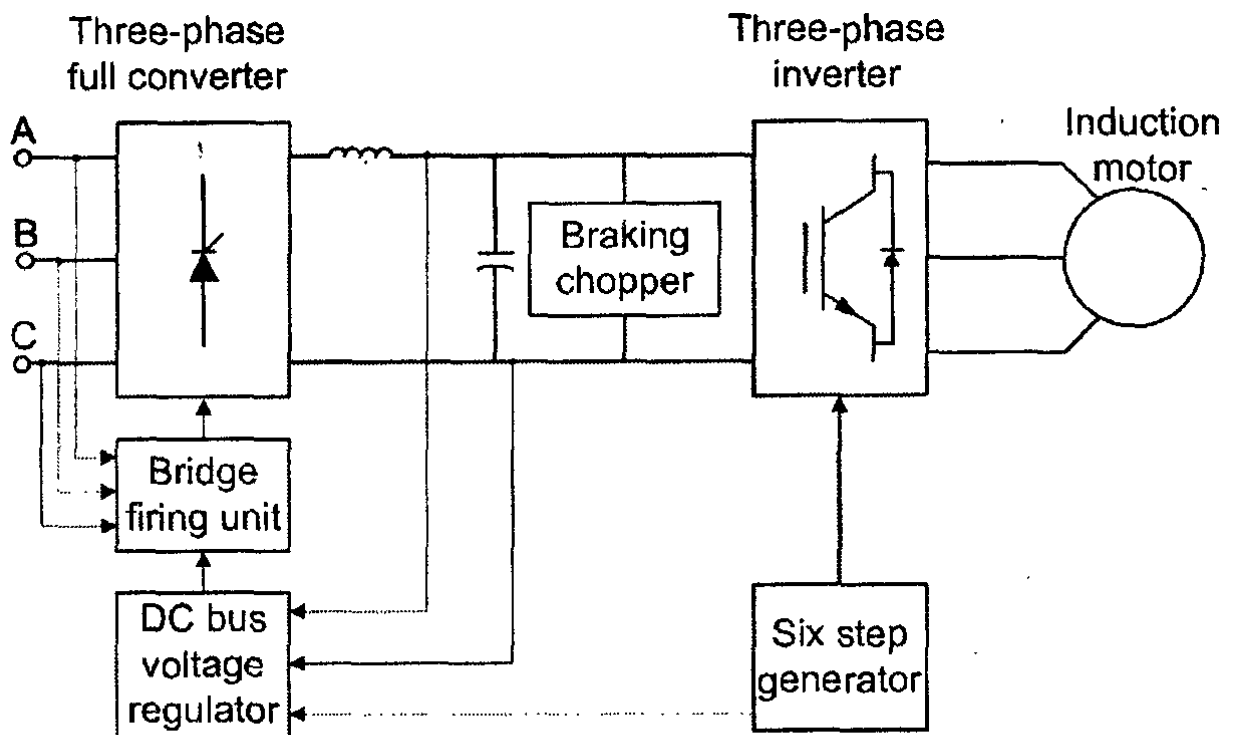


Рис. 8.35. Функциональная схема системы с частотным регулированием

Окно настройки параметров, которое является панелью имитационного лабораторного стенда, разработанного с использованием инструментального средства GUI — графического интерфейса пользователя, показано на рис. 8.36.

На этой панели имеется три основные вкладки *Asynchronous Machine*, *Converters and DC bus*, *Controller*, позволяющие задать параметры основных блоков системы. Вид панели при нажатой вкладке *Asynchronous Machine* представлен на рисунке 8.36. В этом случае в окнах панели задаются следующие параметры машины:

- система отсчета, в которой осуществляется представление измеренных величин (Reference frame);
- номинальная полная мощность (Power VA), номинальное действующее фазное напряжение (Voltage V), номинальная частота (Frequency Hz) в поле Nominal values;
- сопротивление и индуктивность рассеяния статора (Resistance (Ohm), Leakage inductance (H)) в поле Equivalent circuit values;
- Mutual inductance (H) — взаимная индукция в поле Equivalent circuit values;
- сопротивление и индуктивность рассеяния ротора (Resistance (Ohm), Leakage inductance (H)) в поле Equivalent circuit values;
- начальные токи статора и их фазы в поле Initial current;
- момент инерции ротора вместе с приведенной нагрузкой (Inertia  $\text{kgm}^2$ ), коэффициент вязкого трения (Viscous friction coefficient Nms), число пар полюсов (Pole pairs) в поле Mechanical parameters;
- начальное скольжение (Sleep) и начальный угол поворота ротора (Angle deg) в поле Initial values;

Параметры машины можно загрузить из внешнего файла (Load) или сохранить во внешнем файле (Save).

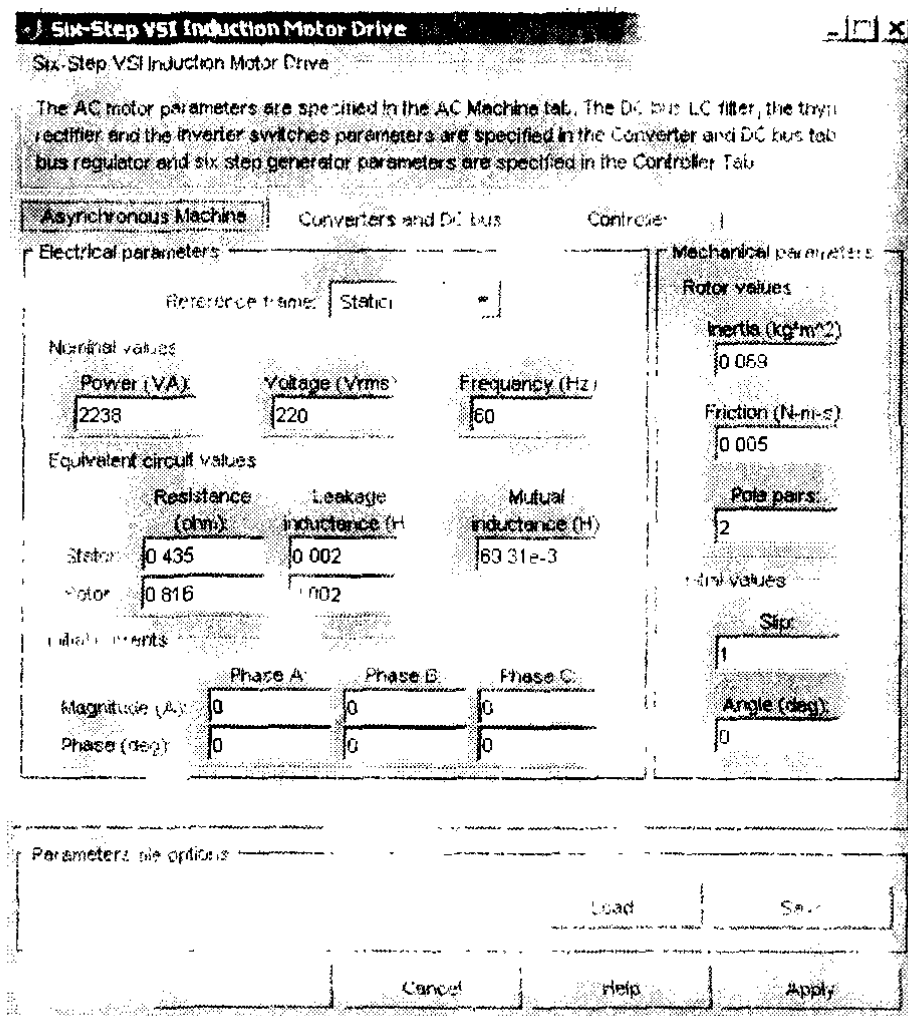


Рис. 8.36. Панель для ввода параметров асинхронной машины

На вкладке Converter and DC Bus (рис. 8.37) задаются параметры управляемого выпрямителя в поле Rectifier, параметры фильтра в поле DC Bus, цепи сброса энергии в поле Braking chopper и инвертора в поле Inverter.

Поле Rectifier содержит поле параметров демпфирующих цепей (Snubbers) и тиристоров (Thyristors)УВ.

Поле DC Bus содержит параметры фильтра — Inductance (H) и Capacitance (F).

В поле Braking chopper задаются параметры гасящего сопротивления — Resistance (Ohm) и частоты переключения транзистора цепи сброса — Chopper frequency (Hz).

В поле Inverter вводятся параметры инвертора:

- Тип полупроводникового прибора — Device type, здесь из выпадающего списка можно выбрать тип прибора.

- Сопротивление транзистора в открытом состоянии — On-state resistance (Ohm).

- Прямое падение напряжения на транзисторе и обратном диоде — Forward voltage V.

- Динамические характеристики транзистора при выключении — Turn-off characteristics.

- Сопротивление и емкость демпфирующей цепи — Resistance(Ohm), Capacitance (F) в поле Snubbers.

На вкладке Controller (рис. 8.38) задаются параметры регуляторов напряжения в звене постоянного тока в поле (DC bus control) и частоты в поле (Six step generator).

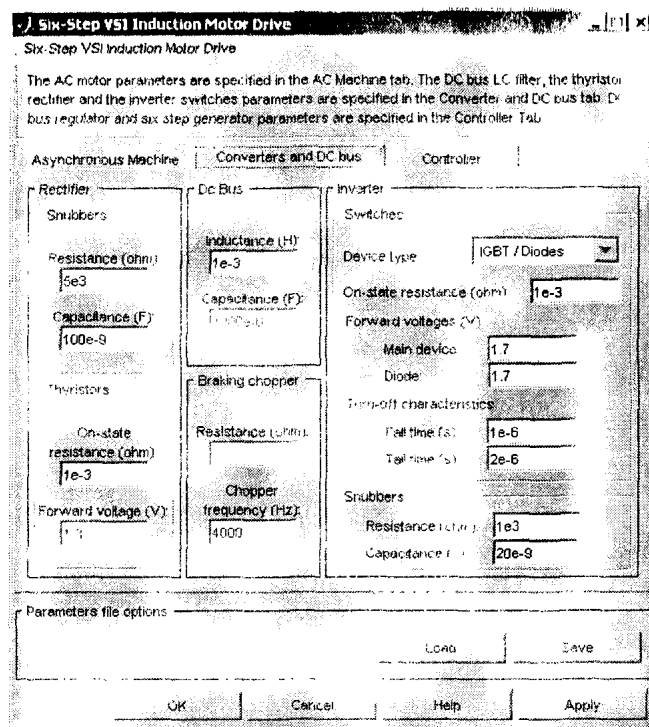


Рис. 8.37. Панель для ввода параметров управляемого выпрямителя, цепи сброса энергии и инвертора.

В поле DC bus control задаются:

- Частота среза фильтра датчика напряжения в цепи обратной связи — Voltage sensor cutoff frequency (Hz).

- Частота питающей сети — Network frequency (Hz DC).

- Отклонения напряжения от заданного в минус (bus negative deviation V) и плюс (DC bus positive deviation V).

- Параметры ПИ-регулятора — в полях PI regulator.

- Ограничение напряжения в звене постоянного тока — Bus voltage limit (V).

Вкладка Schematics позволяет просмотреть структуру регуляторов. На рис. 8.39 показана структура регулятора напряжения в звене постоянного тока.

В поле Six step generator (рис. 8.38) задаются:

- Acceleration (rpm/s) — ограничение ускорения, Deceleration (rpm/s) — ограничение замедления в поле Speed ramps.
- Минимальная и максимальная частота на выходе инвертора в поле Output frequency limit (Hz).
- Отношение напряжение/частота при регулировании — Volt/Hertz ratio.
- Временная задержка нарастания частоты — Zero speed crossing time (s).

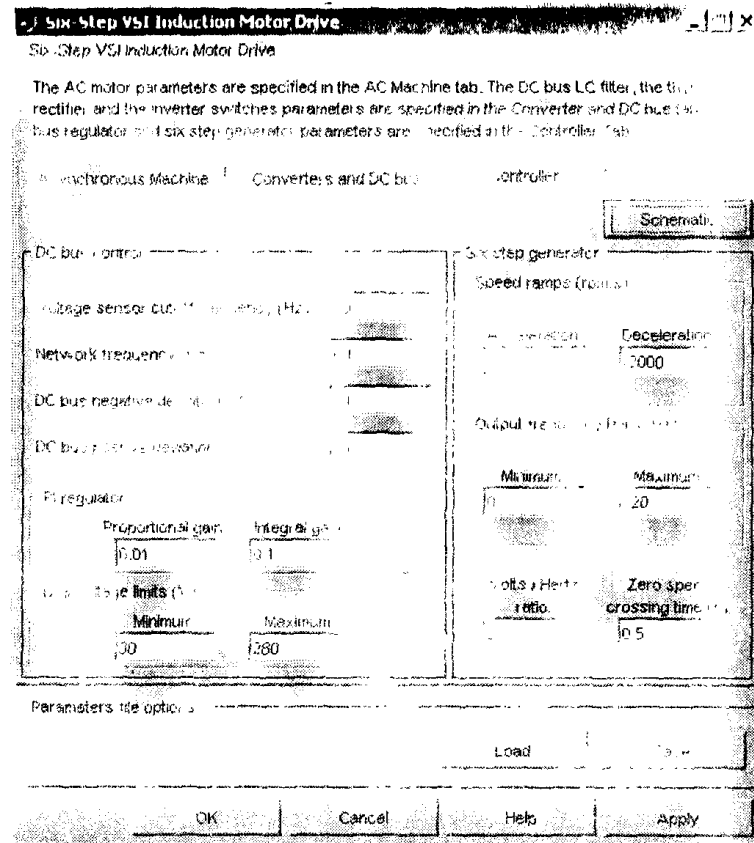


Рис. 8.38. Панель для ввода параметров системы управления цепи сброса и инвертора

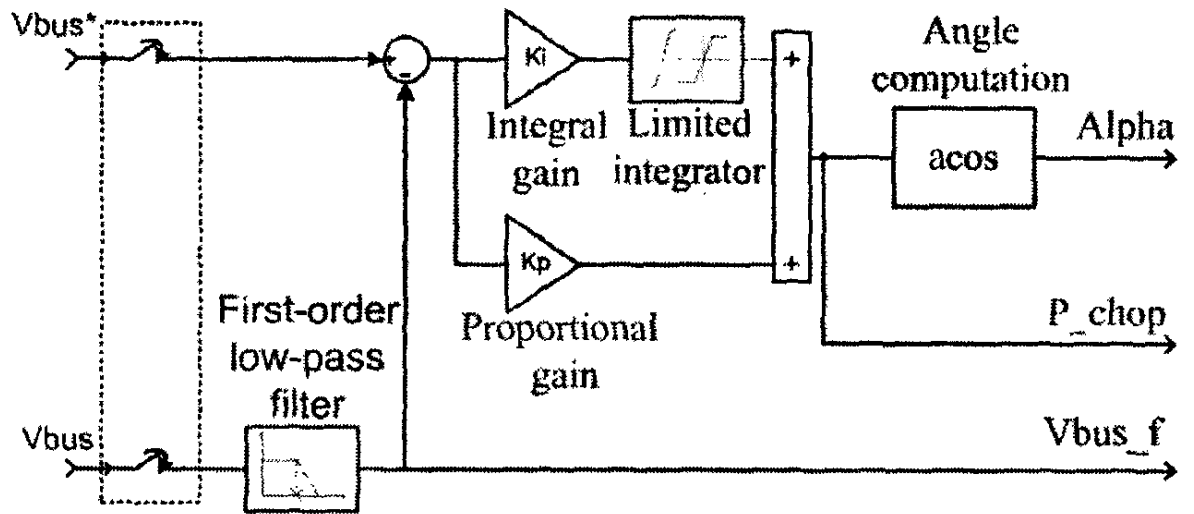


Рис. 8.39. Структура регулятора напряжения в звене постоянного тока

На рис. 8.39,8.40 показаны структурные схемы регуляторов напряжения в звене постоянного тока и инвертора.

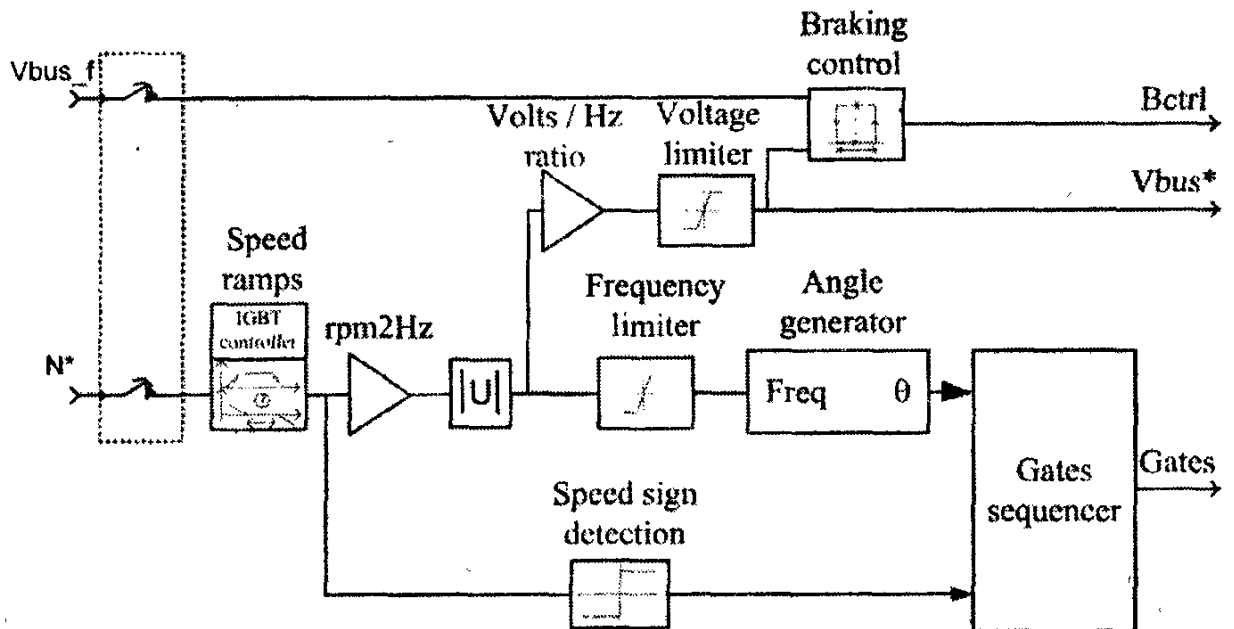


Рис. 8.40. Структурная схема регулятора инвертора

*Асинхронная система с частотным регулированием и векторным алгоритмом управления инвертором.*

Функциональная схема асинхронной системы с частотным регулированием и векторным алгоритмом управления инвертором (Space Vector PWM VSI Motor Drive) показана на рис. 8.41.

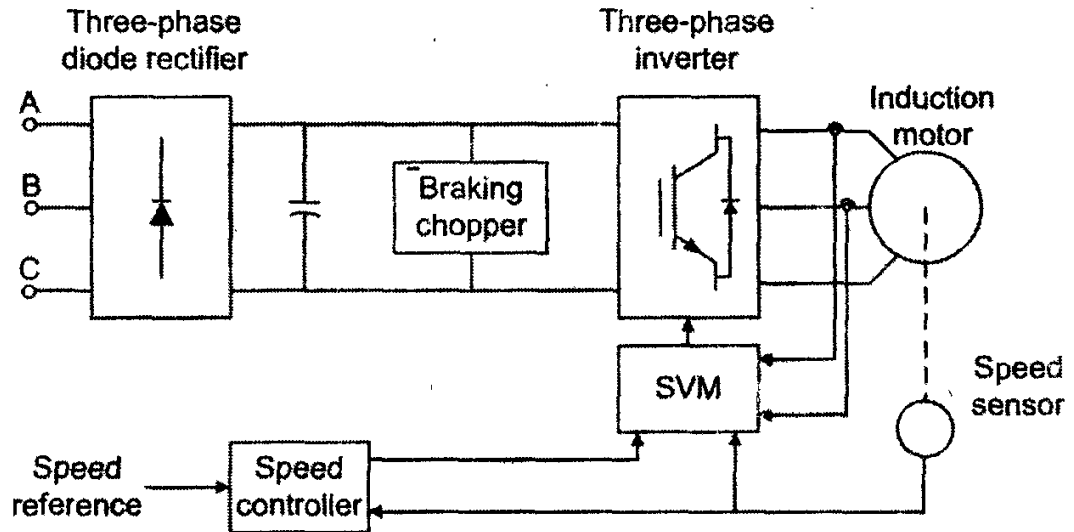


Рис. 8.41. Функциональная схема асинхронной системы с частотным регулированием и векторным алгоритмом управления инвертором

Система содержит:

- трехфазный мостовой выпрямитель (Three-phase diode rectifier) с емкостным фильтром;
- цепь сброса энергии торможения исполнительной асинхронной машины (Braking chopper);
- трехфазный инвертор (Three-phase inverter);
- систему векторного управления инвертором (space vector modulator (SVM));
- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (Induction motor);
- регулятор скорости — Speed controller;
- датчик скорости — Speed sensor.

Панель имитационного лабораторного стенда, разработанного с использованием инструментального средства GUI, практически повторяет стенд, рассмотренный выше. Отличается здесь лишь панель настройки регуляторов, показанная на рис. 8.42.

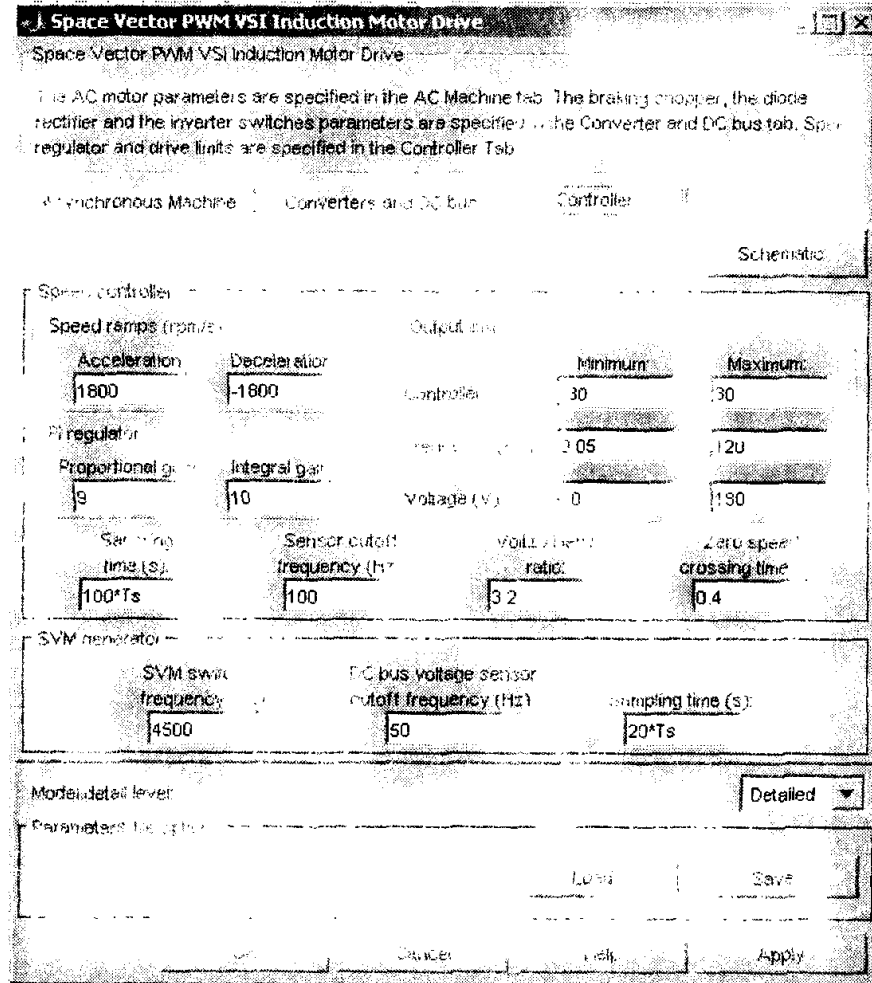


Рис. 8.42. Панель настройки регуляторов асинхронной системы с частотным регулированием и векторным алгоритмом управления инвертором

В поле **Speed controller** задаются:

- Максимальное ускорение и замедление в поле **Speed ramps (rpm/s)**.
- Параметры ПИ регулятора скорости в поле **PI regulator**.
- Период дискретизации контроллера — **Sampling time (s)**.
- Частота среза фильтра в цепи обратной связи — **Sensor cutoff frequency (Hz)**.
- Отношение напряжение/частота при регулировании — **Volt/Hertz ratio**.
- Временная задержка нарастания частоты — **Zero speed crossing time (s)**.
- Ограничения на выходные параметры в поле **Output limits**.

В поле **SVM generator** задаются:

- Несущая частота инвертора — **SVM switching frequency (Hz)**.
- Частота среза фильтра в канале обратной связи по напряжению в звене постоянного тока — **DC bus voltage sensor cutoff frequency (Hz)**.
- Период дискретизации в SVM контроллере **Sampling time (s)**.

Структурные схемы регуляторов показаны на рис. 8.43. Здесь в регуляторе положения пространственного вектора (SVM-Space Vector Modulation) определяется сектор нахождения пространственного вектора, внутри которого происходит переключение только двух транзисторов одного плеча инвертора. Схематически процедура выбора сектора нахождения пространственного вектора представлена затемненными блоками.

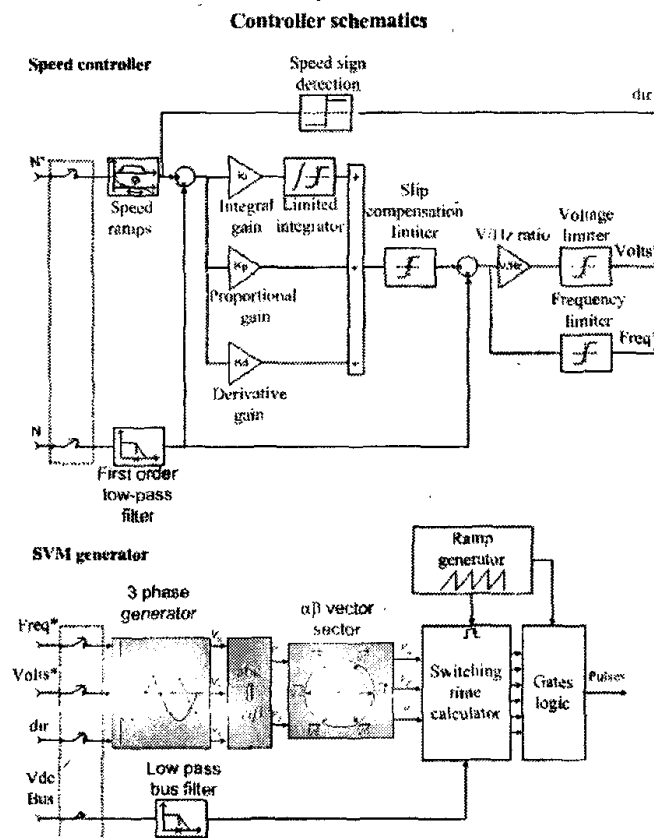


Рис. 8.43. Структурные схемы регуляторов асинхронной системы с частотным регулированием и векторным алгоритмом управления инвертором

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.5.2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

### **ВОПРОСЫ**

1. Математическое описание, структурные схемы и модели вентильного двигателя во вращающейся системе координат с безынерционным каналом ДПР-ПК.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

**1. Математическое описание, структурные схемы и модели вентильного двигателя во вращающейся системе координат с безынерционным каналом ДПР-ПК**

Для упрощения математического описания ВД используется система координат  $d - q$ , жестко связанная с ротором, при этом ось  $d$  совмещается с направлением магнитного поля ротора.

В этом случае операторные уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в вентильном двигателе имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U_d &= R(T_d s + 1)i_d - \omega L_q i_q, \\
 U_q &= R(T_q s + 1)i_q + \omega L_d i_d + \Phi_0 \omega, \\
 M &= p \frac{m}{2} (\Psi_0 i_q + (L_d - L_q) i_d i_q), \\
 s \omega_m &= \frac{1}{J} (M - M_H), \\
 s \theta_m &= \omega_m, \quad \omega = p \omega_m.
 \end{aligned} \tag{9.7}$$

В уравнениях (9.7)  $U_d, U_q, i_d, i_q$  — проекции напряжения и тока статора на оси,

$$T_d = \frac{L_d}{R}, \quad T_q = \frac{L_q}{R}, \quad L_d, L_q,$$

где постоянные времени и индуктивность обмотки статора по продольной и поперечной осям,  $R$  — 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.

Структурная схема ВД, составленная по уравнениям (9.7), приведена на рис.9.8.

Напряжения  $U_d, U_q$  можно задавать независимо друг от друга, а можно их значения увязать с начальной установкой датчика положения ротора  $\theta_0$ , как это показано в пунктирной рамке на рис. 9.8. В этом случае напряжения  $U_d, U_q$  определяются выражениями:

$$\begin{aligned}
 U_d &= u_1 K_{cp} \cos \theta_0 = U_1 \cos \theta_0, \\
 U_q &= u_1 K_{cp} \sin \theta_0 = U_1 \sin \theta_0.
 \end{aligned} \tag{9.8}$$

В любом случае в реверсивных системах реализуются соотношения  $U_d = 0$   
 $U_q = U_1$ .

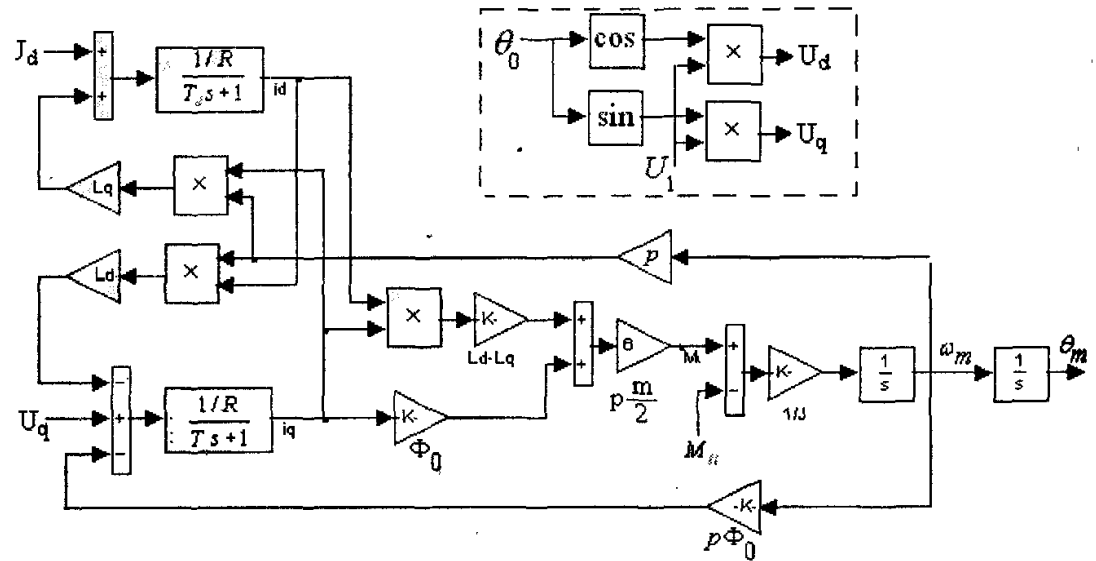


Рис. 9.8 Структурная схема ВД

Структуру ВД с независимым заданием  $U_d, U_q$  в дальнейшем будем называть *двухканальной*, структуру ВД, где напряжения  $U_d, U_q$  зависят от начальной установки ДПР в дальнейшем будем называть *одноканальной*.

Модель ВД во вращающейся системе координат показана на рис. 9.9 (файл *VD\_Mod\_dq*).

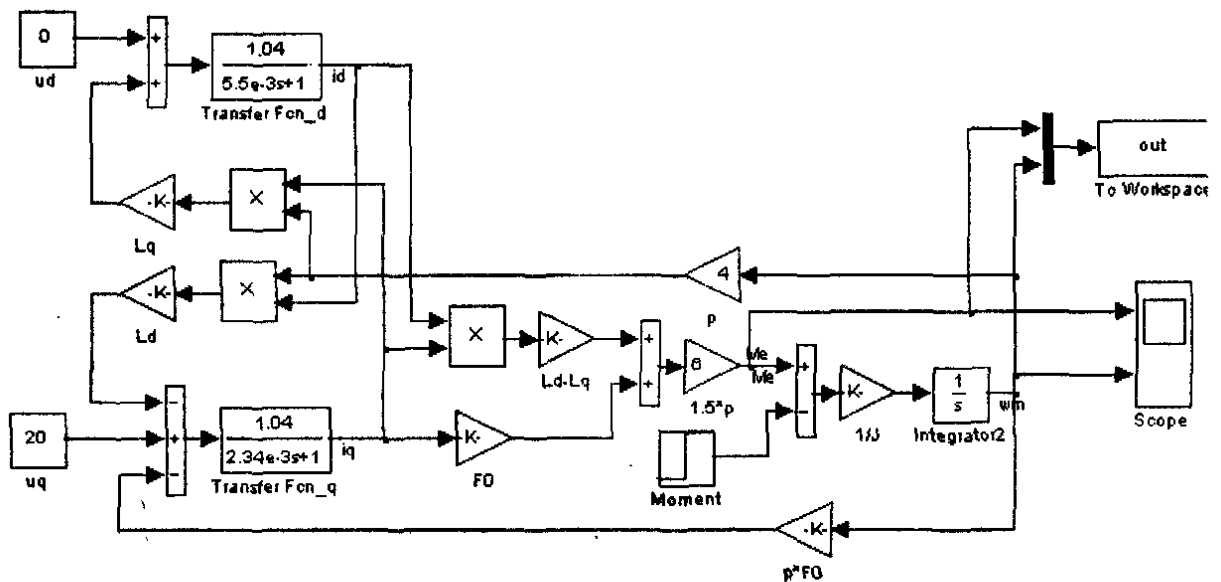


Рис. 9.9 Модель ВД во вращающейся системе координат

Переходные процессы в модели (рис. 9.9) полностью идентичны, представленным на рис. 9.5, 9.6.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.5.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЯЗЕЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

### ВОПРОСЫ

1. Анализ влияния перекрестных связей в ВД.
2. Статические характеристики ВД при питании от источника напряжения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. Анализ влияния перекрестных связей в ВД

Из структурной схемы ВД видно, что он отличается от двигателя постоянного тока наличием перекрестных связей по переменным состояниям  $i_d, i_q$  в уравнениях равновесия ЭДС на обмотках и добавочным слагаемым момента в уравнении равновесия моментов на валу ВД. Этот момент возникает вследствие наличия в роторе явно выраженных полюсов и называется реактивным моментом синхронной машины.

Количественное влияние перекрестных связей на динамические характеристики вентильного двигателя можно исследовать на модели, представленной на рис. 9.10 (*файл VD\_DPT\_Mod\_dq*), где реализованы две модели:

1. Модель ВД с перекрестными связями (верхняя модель).
2. Модель ВД без перекрестных связей (нижняя модель), которая в точности повторяет модель ДПТ.

Переходные процессы по управлению и возмущению для двух значений напряжения на ВД 20В и 200В представлены рис. 9.11 и рис. 9.12 (*файл VD\_DPT\_Mod\_dq.m*).

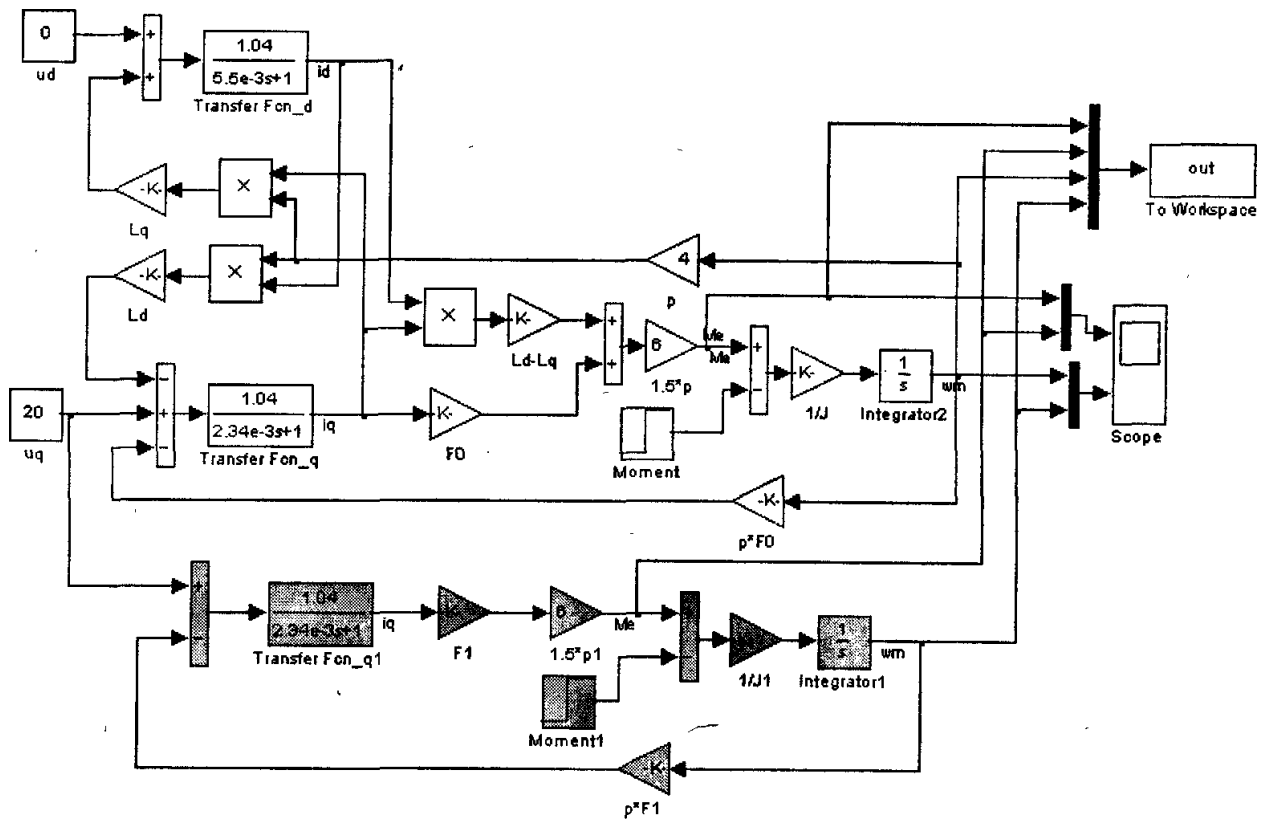


Рис. 9.10. Модель ВД во вращающейся системе координат и эквивалентная модель ДПТ

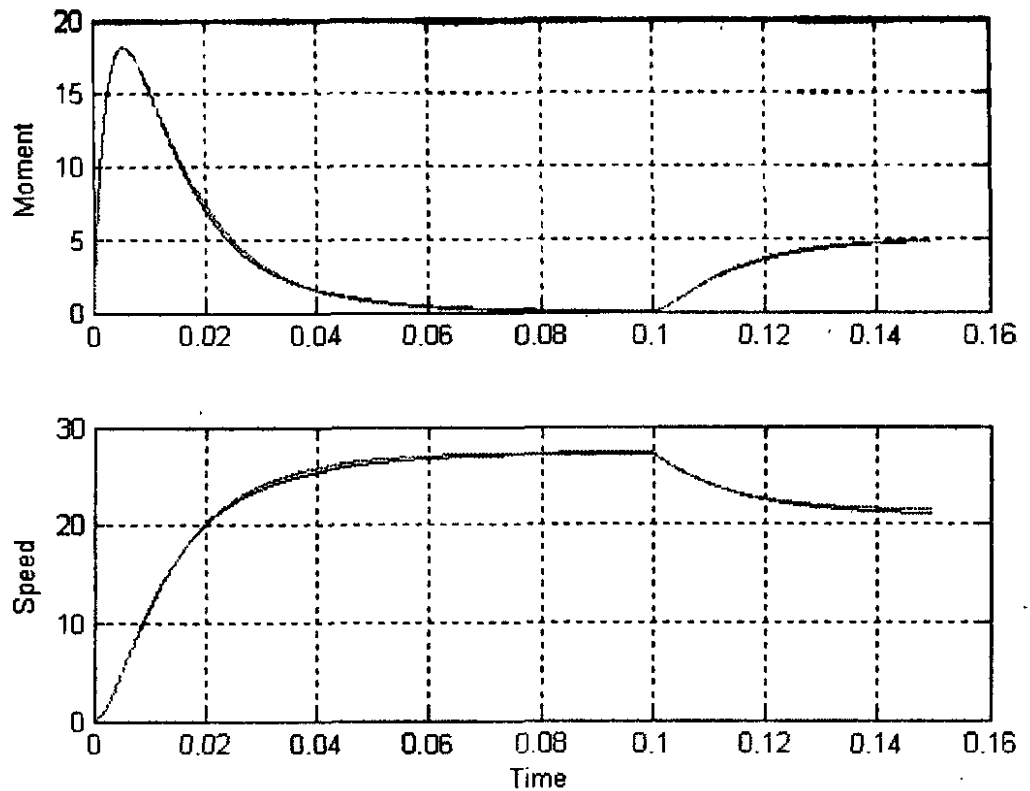


Рис. 9.11. Переходные процессы в ВД и эквивалентным ДПТ при  $U_1=20В$

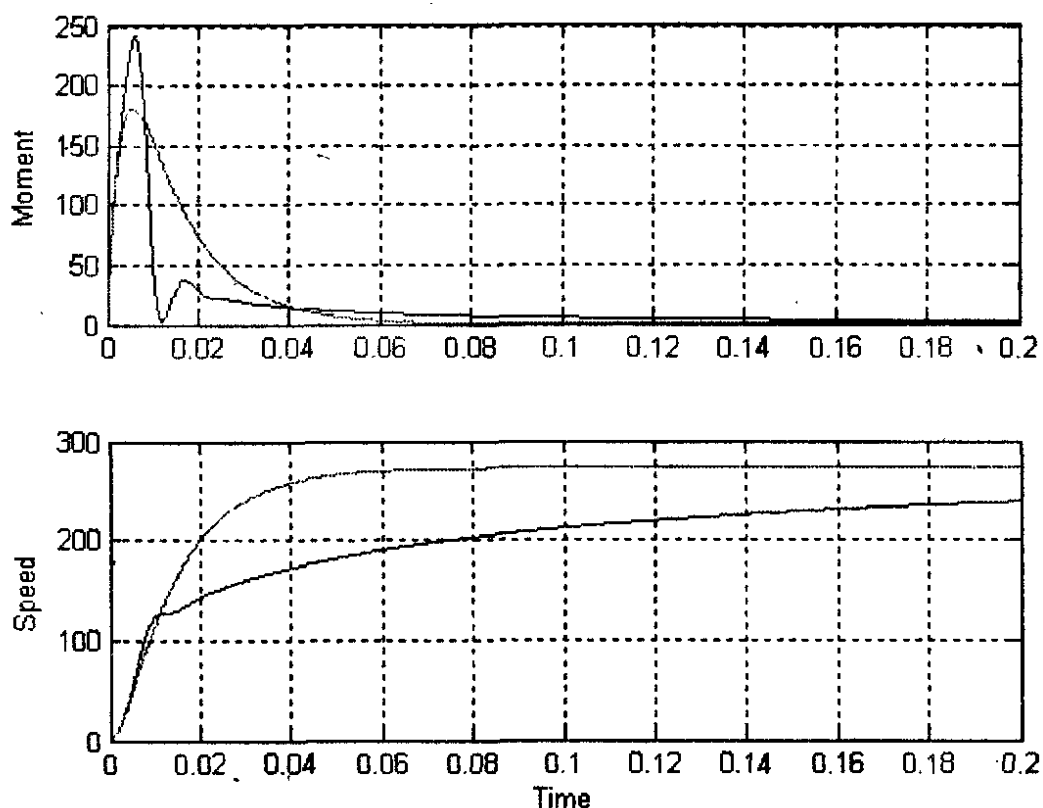


Рис. 9.12 Переходные процессы в ВД и эквивалентным ДПТ при  $U_1=200\text{В}$

Влияние перекрестных связей при больших сигналах проявляется в «затягивании» переходного процесса по скорости при скачке управляющего сигнала. Перекрестные связи при нулевом значении напряжения  $U_d$  вызывают появление тока продольной составляющей  $i_d$ , что можно проследить на векторной диаграмме (рис. 9.13).

Ток продольной составляющей влияет на суммарный магнитный поток, что сказывается в реакции на скачок управляющего сигнала.

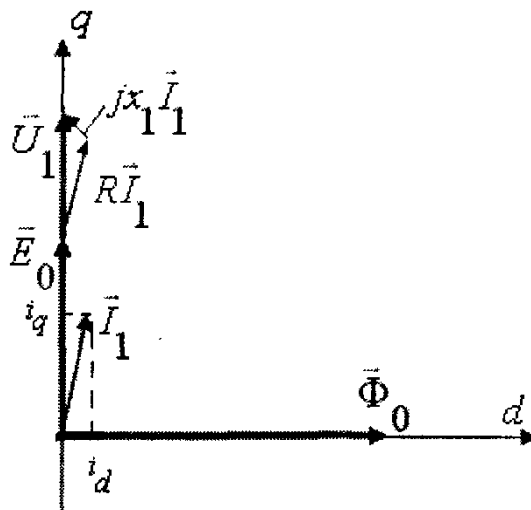


Рис. 9.13. Векторная диаграмма ВД

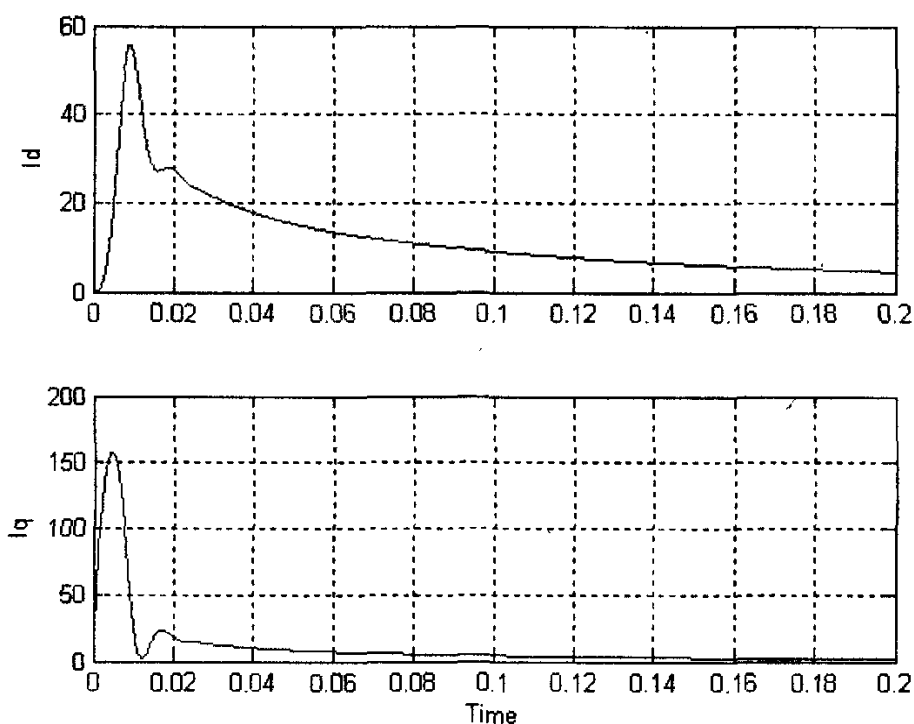


Рис. 9.14 Переходные процессы в ВД по току продольной и поперечной составляющей при  $U_1=200V$

На рис. 9.14 показан переходной процесс токов по продольной и поперечной составляющим для последнего опыта, что полностью подтверждает влияние продольной составляющей на переходные процессы по скорости и моменту ВД.

### 9.5. Статические характеристики ВД при питании от источника напряжения

В установившемся режиме момент и ток потребления двигателя определяются из системы (9.7).

$$M = \frac{m}{2} p \Phi_0 \frac{U_1 - \omega \Phi_0}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)} + \frac{m}{2} p (T_d - T_q) \frac{\omega T_q (U_1 - \omega \Phi_0)^2}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)^2} \quad (9.9)$$

$$I_1 = \frac{U_1 - \omega \Phi_0}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)} \sqrt{1 + (\omega T_q)^2} \quad (9.10)$$

Для неявнополюсного двигателя  $T_d = T_q = T$  и из уравнений 9.9, 9.10 легко получить уравнения момента и тока потребления.

$$M = \frac{m}{2} p \Phi_0 \frac{U_1 - \omega \Phi_0}{R(1 + \omega^2 T^2)} \quad (9.11) \quad I_1 = \frac{U_1 - \omega \Phi_0}{R(1 + \omega^2 T^2)} \sqrt{1 + (\omega T)^2} \quad (9.12)$$

Характеристики ВД, построенные по уравнениям 9.9, 9.10 (файл *Char\_Mech.m*), показаны на рис. 9.15. для максимального напряжения и различных соотношений постоянных времени по продольной и поперечной осям.

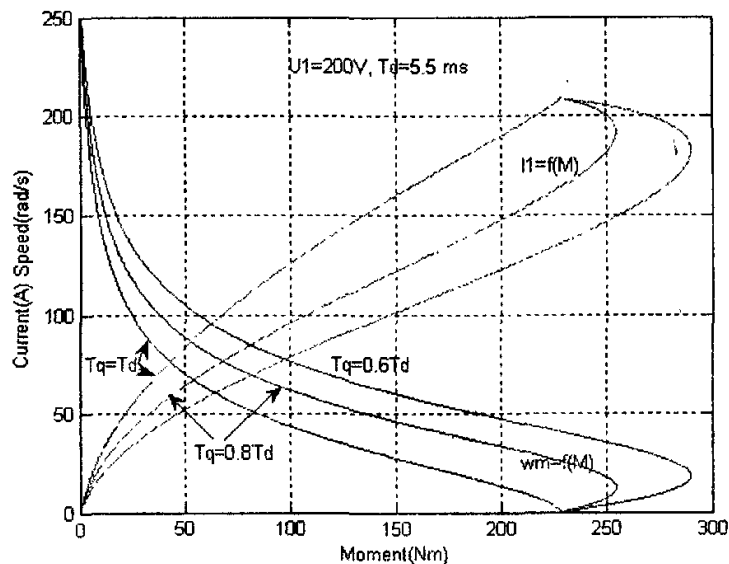


Рис. 9.15. Механические и электромагнитные характеристики ВД

При малых моментах наблюдается рост скорости, механическая характеристика двигателя в этой области аналогична характеристике ДПТ с последовательным возбуждением. В случае явно полюсного ротора  $T_d > T_q$  существенную роль при малых скоростях и больших моментах (режим, близкий к короткому замыканию) играет реактивная составляющая момента. Интересно отметить, что реактивный момент приводит к появлению неустойчивой области работы ВД.

Токи продольной и поперечной составляющей в установившемся режиме определяются из уравнений:

$$I_d = \frac{\omega T_d (U_1 - \omega \Phi_0)}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)}, \quad I_q = \frac{U_1 - \omega \Phi_0}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)} \quad (9.13)$$

На рис. 9.16 показаны их зависимости от момента (*файл Char\_ElMech. m*).

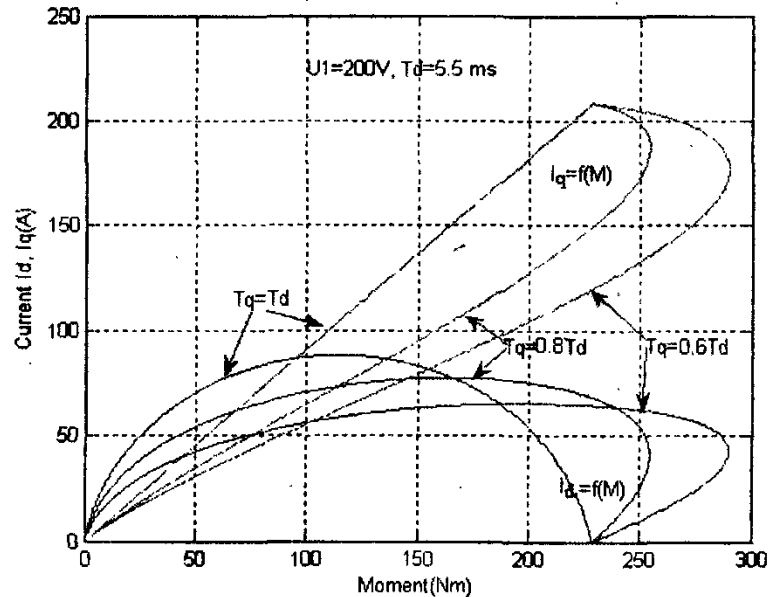


Рис. 9.16. Зависимость токов продольной и поперечной составляющих от момента ВД

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.5.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КООРДИНАТ

### ВОПРОСЫ

1. Моделирование датчика положения ротора и преобразователя координат, выполненные на вращающихся трансформаторах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. Моделирование датчика положения ротора и преобразователя координат, выполненные на вращающихся трансформаторах

В качестве датчика положения ротора и преобразователя координат (ДПР-ПК) в системах управления с ВД часто используется вращающийся трансформатор (ВТ), число полюсов которого согласовано с числом полюсов ВД [5]. Вращающийся трансформатор может быть использован как в режиме амплитудной модуляции, так и в режиме фазовой модуляции.

При использовании амплитудной модуляции в ВТ возможны два способа построения преобразователя координат (ПК). В первом случае (рис. 9.17) на обмотку возбуждения ВТ поступает амплитудно-модулированный сигнал с выхода модулятора. Модулирующим сигналом модулятора является входной сигнал, а несущим сигналом — высокочастотный сигнал с генератора. К синусной и косинусной обмоткам ВТ подключены демодуляторы, на выходе которых использованы фильтры, выделяющие модулирующий сигнал. При таком построении в реверсивных системах начальный угол установки ВТ должен быть выбран равным  $\theta_0 = 90 \text{ эл. град.}$  тогда входной сигнал модулятора  $u_1$  определяет значение составляющей напряжения  $u_q$  вращающейся системы координат. Такой способ построения, как это отмечено выше, называется одноканальным.

При использовании второго способа на обмотку возбуждения ВТ поступает немодулированный сигнал с генератора несущей частоты (рис. 9.18), демодуляторы и фильтры генерируют систему вращающихся координат. Преобразование сигналов  $u_d, u_q$  из вращающихся координат в неподвижные  $u_\alpha, u_\beta$  осуществляется в преобразователе  $d, q \Rightarrow \alpha, \beta$  в соответствии с уравнениями

$$\begin{aligned} u_\alpha &= u_d \cos \theta - u_q \sin \theta, \\ u_\beta &= u_d \sin \theta + u_q \cos \theta. \end{aligned} \quad (9.14)$$

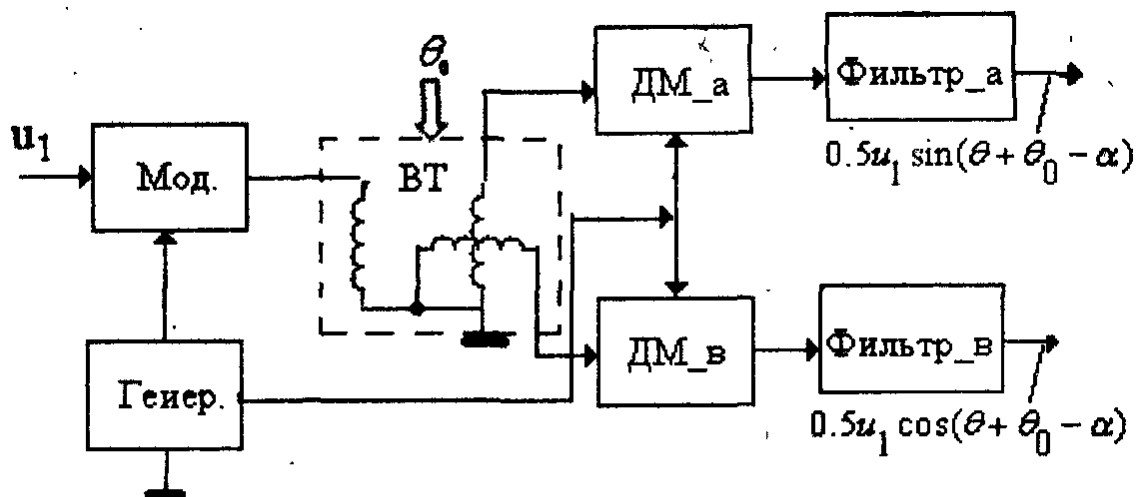


Рис. 9.17. Одноканальная система ДПР-ПК с амплитудной модуляцией

При таком (двухканальном) построении начальный угол установки датчика положения ротора следует задать нулевым, а ориентацию напряжения на статоре относительно поля ротора во вращающейся системе координат осуществить соответствующим заданием величин  $u_d, u_q$ .

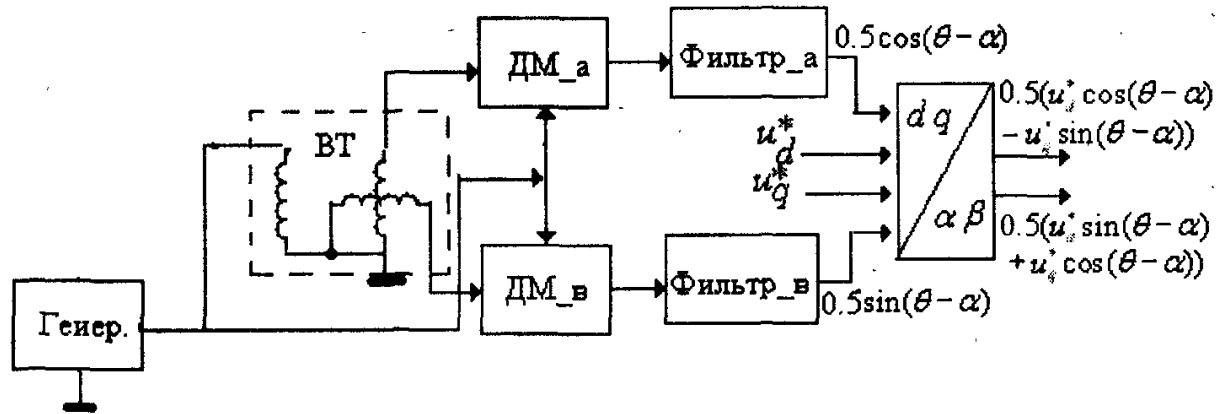


Рис. 9.18. Двухканальная система ДПР-ПК с амплитудной модуляцией

При использовании фазовой модуляции в ВТ возможны также два способа построения преобразователя координат (ПК). Первый, одноканальный вариант с фазовой модуляцией показан на рис. 9.19. В этой схеме генератор несущей частоты вырабатывает два сдвинутых по фазе на  $90 \text{ эл. град.}$  синусоидальных сигнала несущей частоты, которые поступают на синусную и косинусную обмотки ВТ и одновременно на фазовые детекторы (ФД). С обмотки возбуждения ВТ сигнал несущей частоты и сигнал управления поступают на умножитель, который выполняет роль фазовращателя. Фазовые детекторы и фильтры выделяют напряжения  $u_\alpha$   $u_\beta$  неподвижной системы координат.

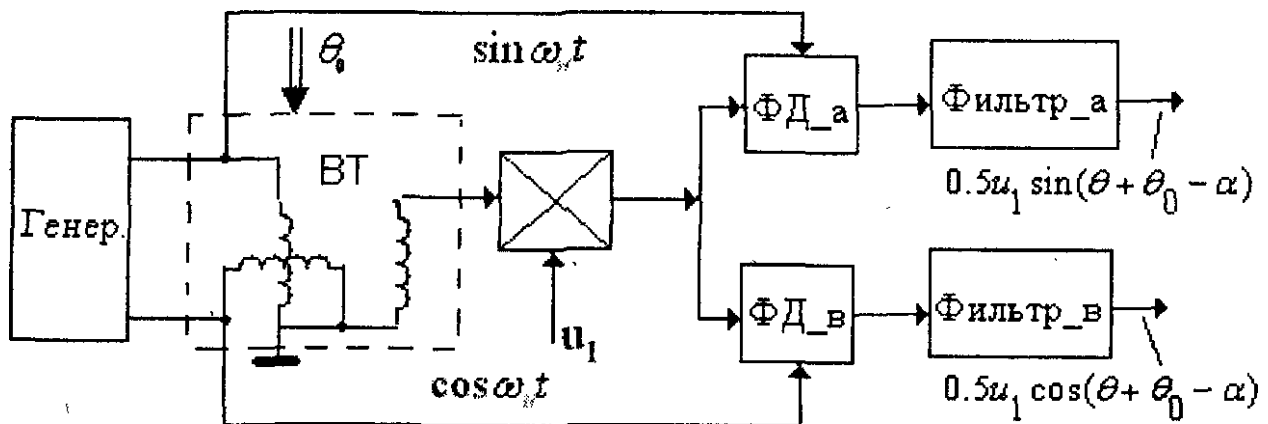


Рис. 9.19. Одноканальная система ДПР-ПК с фазовой модуляцией

При использовании второго двухканального способа с обмотки возбуждения ВТ немодулированный сигнал поступает непосредственно на фазовые детекторы (рис. 9.20), ФД и фильтры генерируют систему вращающихся координат. Преобразование сигналов  $u_d$ ,  $u_q$  из вращающихся координат в неподвижные  $u_\alpha$   $u_\beta$  осуществляется в преобразователе  $d, q \Rightarrow \alpha, \beta$  в соответствии с уравнениями (9.14).

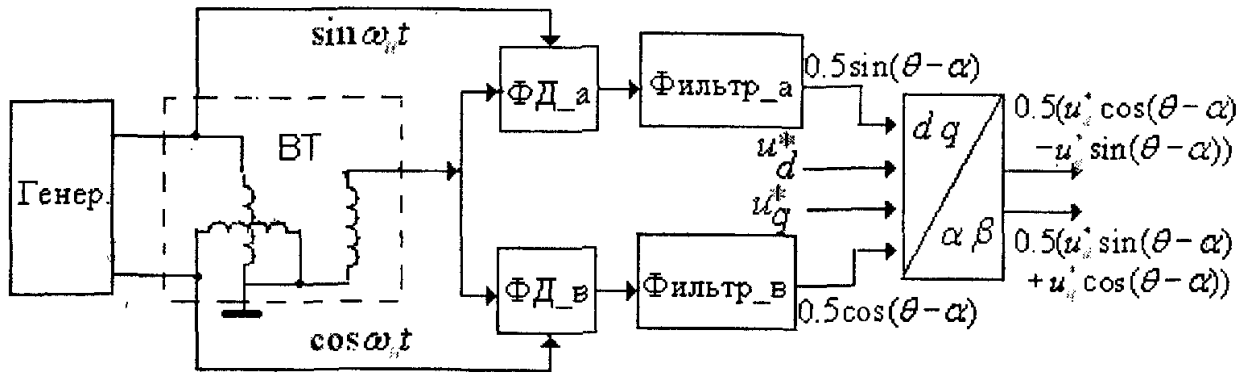


Рис. 9.20. Двухканальная система ДПР-ПК с фазовой модуляцией

При таком построении, также как и в случае амплитудной модуляции, начальный угол установки датчика положения ротора необходимо задать нулевым, а ориентацию напряжения на статоре относительно поля ротора во вращающейся системе координат осуществить соответствующим заданием величин  $u_d^*$ ,  $u_q^*$ .

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.5.5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ИНЕРЦИОННЫМ КАНАЛОМ

### ВОПРОСЫ

1. Математическое описание, структурные схемы и модели вентильного двигателя с инерционным каналом ДПР-ПК-АИ.
2. Статические характеристики ВД с инерционным каналом ДПР-ПК-АИ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. Математическое описание, структурные схемы и модели вентильного двигателя с инерционным каналом ДПР-ПК-АИ

Во всех рассмотренных реализациях ДПР и ПК на ВТ присутствуют балансные модуляторы, демодуляторы и НЧ-фильтры. В любом варианте эти блоки влияют на амплитуду и фазу сигнала управления и при синтезе регуляторов их параметры необходимо учитывать.

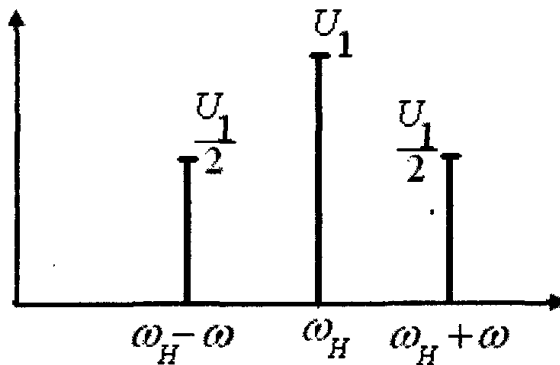


Рис. 9.21. Спектр сигнала на выходе балансного модулятора

Спектр сигнала на выходе балансного модулятора показан на рис. 9.21. Информация о входном сигнале, который изменяется с частотой  $\omega$ , заложена в боковых частотах. Амплитуда этих частот равна половине амплитуды основной, несущей частоты ( $\omega_H$ ). Это означает, что коэффициент передачи тракта ДПР-ПК по амплитуде равен  $K=0,5$ .

Частотные характеристики фильтра в основном сказываются на фазовой характеристике тракта ДПР-ПК.

Чаще всего в качестве фильтра используется апериодическое звено, частотная характеристика которого определяется уравнением:

$$W_{\phi}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega T_{\phi}} = \frac{\exp(-j\alpha_{\phi})}{\sqrt{1 + (\omega T_{\phi})^2}}, \quad (9.15)$$

где  $\alpha_{\phi} = \arctg(\omega T_{\phi}) \approx \omega T_{\phi} = p\omega_m T_{\phi}$ .

Автономный инвертор, как это следует из предыдущего, может также быть представлен апериодическим звеном, частотная характеристика которого описывается уравнением

$$W_{cp}(j\omega) = \frac{K_{cp}}{1 + j\omega T_{cp}} = \frac{K_{cp} \exp(-j\alpha_{cp})}{\sqrt{1 + (\omega T_{cp})^2}}, \quad (9.16)$$

где  $\alpha_{cp} = \arctg(\omega T_{cp}) \approx \omega T_{cp} = p\omega_m T_{cp}$ .

Суммарный фазовый сдвиг  $\alpha = \alpha_{\phi} + \alpha_{cp}$  в канале ДПР-ПК-АИ приводит к смещению вектора напряжения на статоре относительно оси  $q$  в сторону отставания. При этом возрастает продольная составляющая тока якоря и соответственно суммарный магнитный поток. Рост потока вызывает падение скорости. Эти процессы прослеживаются на векторной диаграмме (рис. 9.22).

Одноканальная модель ВД, реализованная в соответствии с функциональной схемой (рис. 9.17), показана на рис. 9.23 (файл *VD\_Mod\_VT*), в которой блок *VD\_ab* представляет собой ВД в неподвижной системе координат, модель которого рассмотрена выше (рис. 9.4).

Динамические процессы с рассмотренной реализацией ДПР-ПК исследованы на модели при напряжении на обмотках  $U_1 = 200 В$ . т. к. именно при большом напряжении в наибольшей степени проявляются нелинейные свойства ВД. Эти процессы показаны на рис. 9.24.

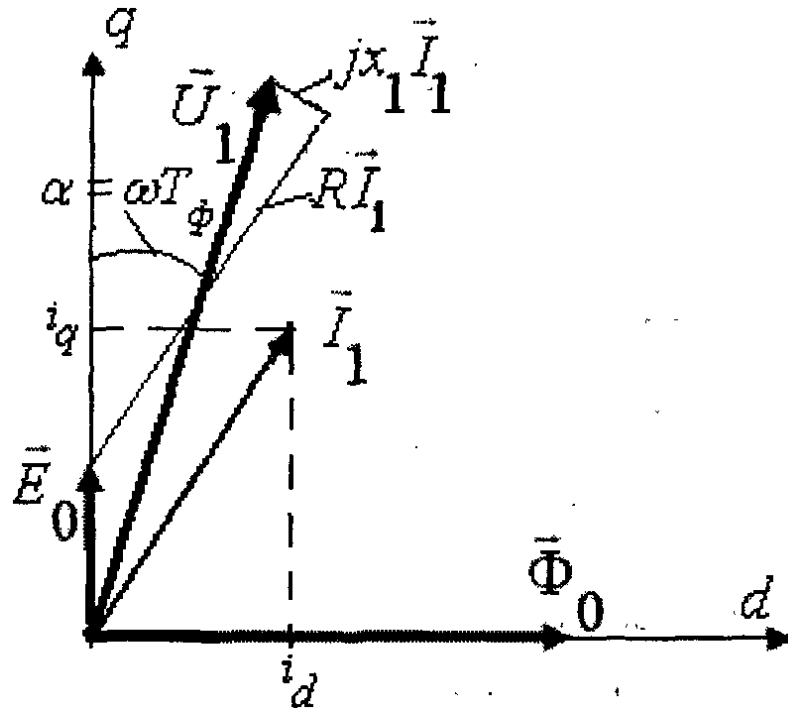


Рис. 9.22. Векторная диаграмма ВД с инерционным каналом ДПР-ПК

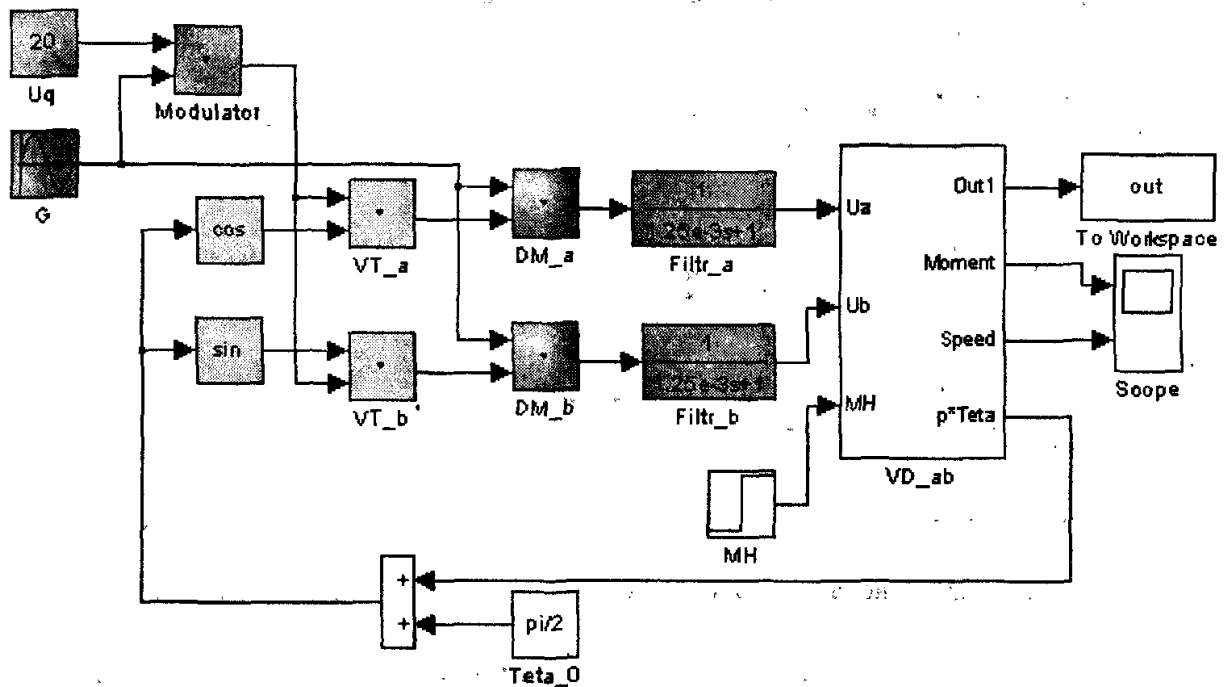


Рис. 9.23. Модель одноканальной структуры ВД в неподвижной системе координат

Если сравнить эти процессы с аналогичными (рис. 9.6) для ВД с безынерционным каналом ДПР-ПК-АИ, то можно заметить, что за счет увеличения сдвига фазы напряжения  $\bar{U}_1$  и соответственно тока  $\bar{I}_1$  относительно оси  $q$  увеличивается поток и снижается скорость вентильного двигателя.

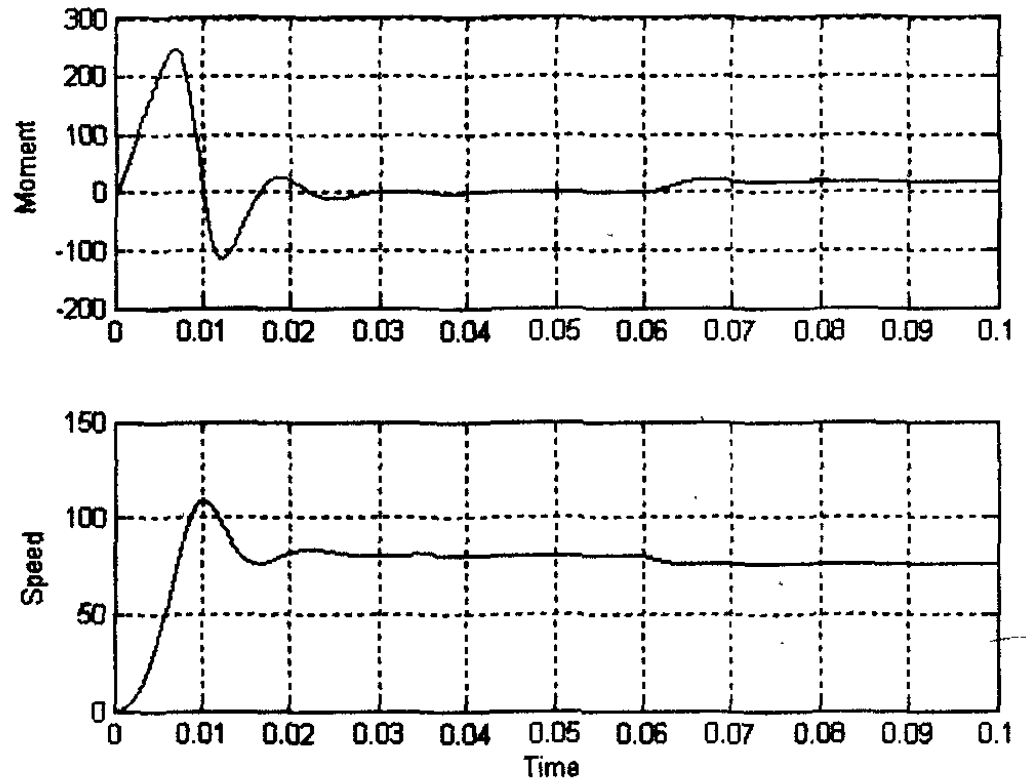


Рис. 9.24. Переходные процессы в модели с одноканальной структурой

Одноканальная структура ВД с инерционным каналом ДПР-ПК-АИ во вращающейся системе координат, соответствующая структурам (рис. 9.17, рис. 9.19), показана на рис. 9.25.

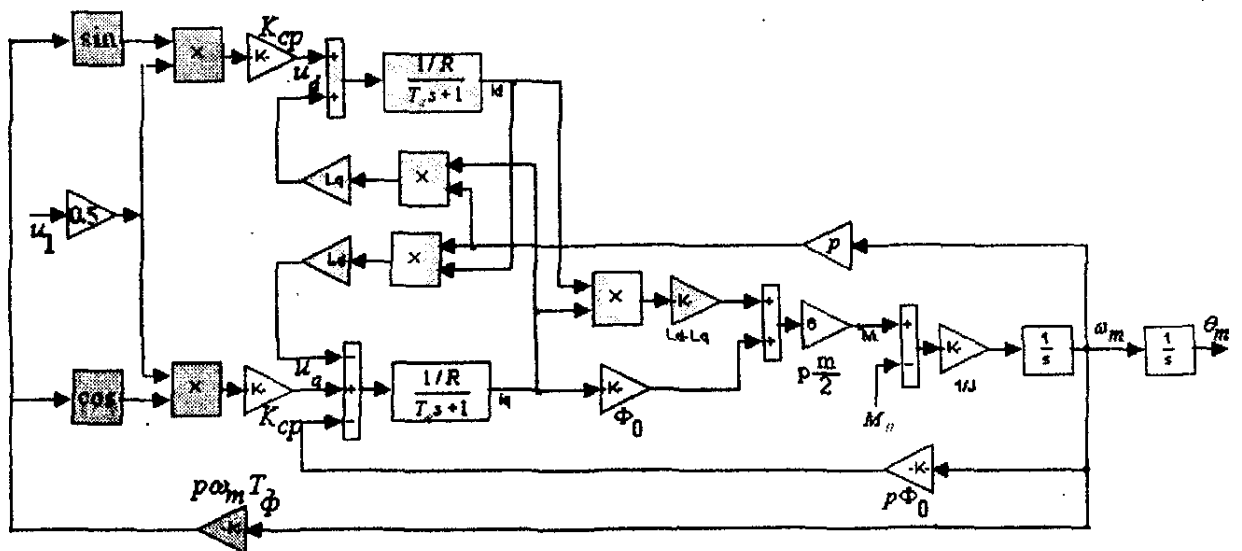


Рис. 9.25. Одноканальная структура ВД во вращающейся системе координат

Напряжения  $U_d$  и  $U_q$  в этой структуре определяются из уравнений (9.17)

$$u_d = 0.5u_1 K_{cp} \cos(\theta_0 - \alpha) = U_1 \cos(\theta_0 - \alpha),$$

$$u_q = 0.5u_1 K_{cp} \sin(\theta_0 - \alpha) = U_1 \sin(\theta_0 - \alpha).$$

В реверсивных системах датчик положения ротора выставляется так, чтобы  $\theta_0 = 90^\circ$ , тогда

$$u_d = U_1 \sin \alpha = U_1 \sin \omega T_\phi, \quad u_q = U_1 \cos \alpha = U_1 \cos \omega T_\phi. \quad (9.18)$$

Одноканальная модель ВД показана на рис. 9.26 (файл *VD\_Mod\_VT\_dq1*). В блоке Subsystem1 вычисляются  $u_d$ ,  $u_q$  по уравнениям (9.18).

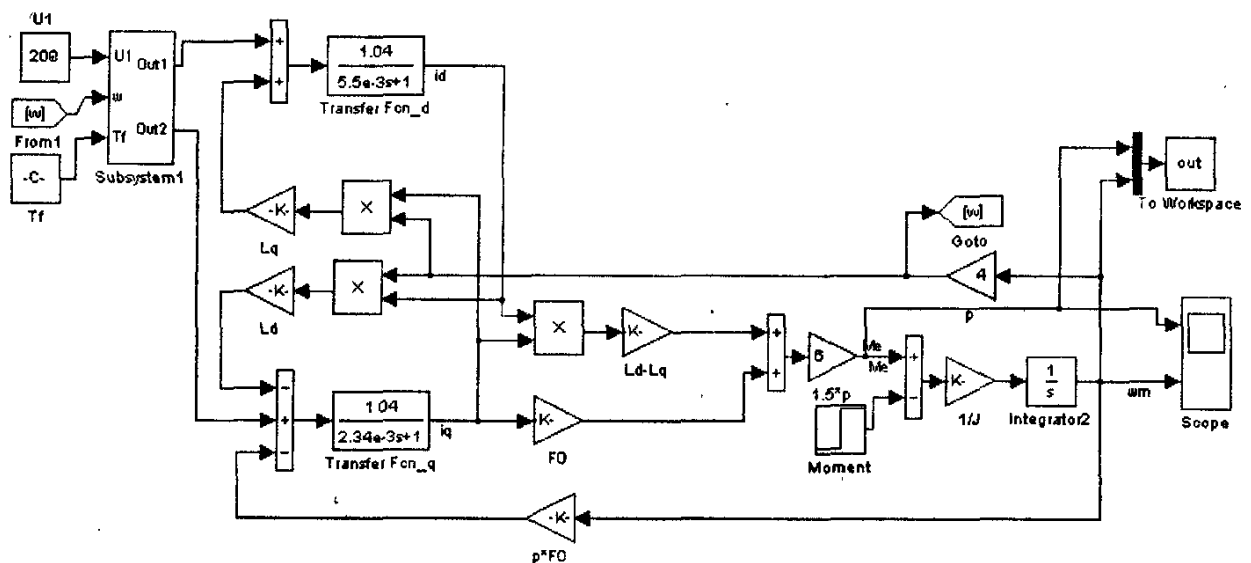


Рис. 9.26. Модель одноканальной структуры ВД во вращающейся системе координат

Двухканальная модель ВД, соответствующая структурам (рис. 9.18, рис. 9.20), показана на рис. 9.27 (файл *VD\_Mod\_VT\_dq2*). В блоке Subsystem1 напряжений  $U_d$  и  $U_q$  вычисляются по уравнениям

$$u_d = 0.5u_d^* K_{cp} \cos \alpha + 0.5u_q^* K_{cp} \sin \alpha = U_d^* \cos \alpha + U_q^* \sin \alpha$$

$$u_q = -0.5u_d^* K_{cp} \sin \alpha + 0.5u_q^* K_{cp} \cos \alpha = -U_d^* \sin \alpha + U_q^* \cos \alpha \quad (9.19)$$

Переходные процессы в ВД для рассмотренных структур совершенно аналогичны и при максимальном напряжении  $U_1 = 200V$  показаны на рис. 9.28. Эти процессы полностью повторяют процессы, полученные выше для модели ВД в неподвижной системе координат (рис. 9.24).

Таким образом, запаздывание в канале ДПР-ПК-АИ приводит к появлению нелинейности по управлению, т. к. напряжения на обмотках двигателя изменяются с изменением скорости. В структурах рис. 9.17, рис. 9.19 эти нелинейности компенсировать не удастся. В структурах, показанных на рис. 9.18, рис. 9.20 они могут быть компенсированы по управлению путем введения определенных обратных связей. Эти вопросы будут рассмотрены далее при синтезе замкнутых систем с вентильным двигателем.

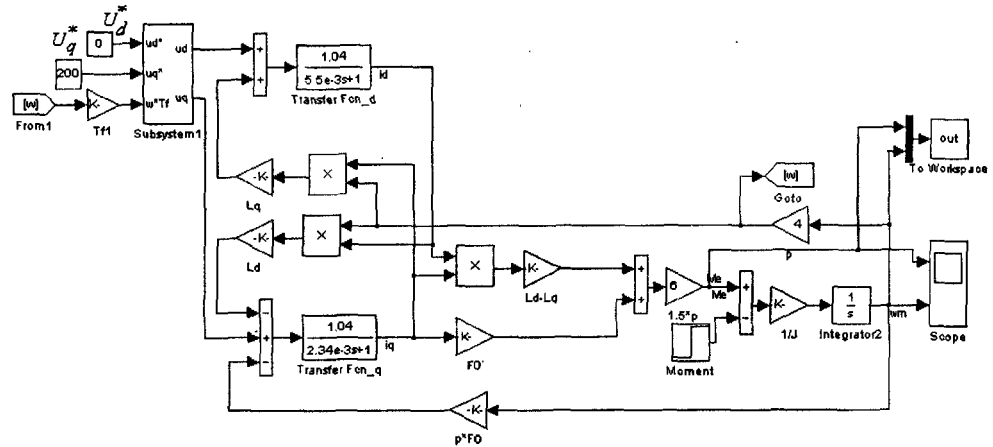


Рис. 9.27. Модель двухканальной структуры ВД во вращающейся системе координат

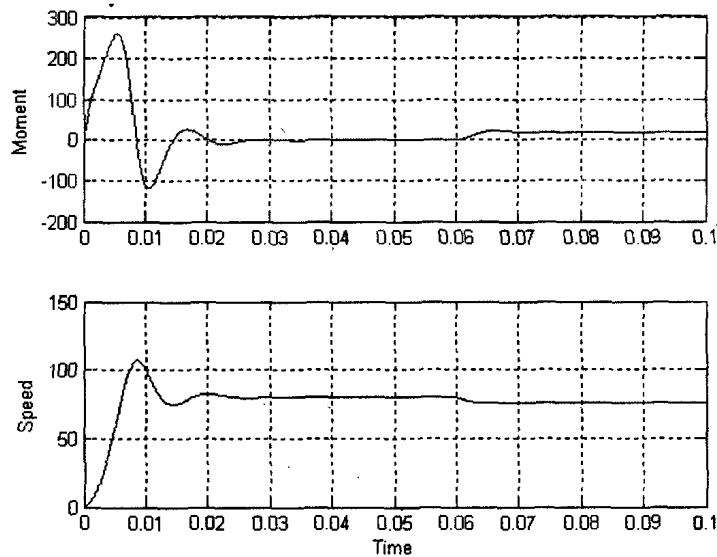


Рис. 9.28. Переходные процессы в двухканальной модели ВД

### 9.8. Статические характеристики ВД с инерционным каналом ДПР-ПК-АИ

В установившемся режиме электромагнитные и электромеханические процессы в вентильном двигателе описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} U_1 \sin \alpha &= RI_d - \omega L_q I_q, \\ U_1 \cos \alpha &= RI_q + \omega L_d I_d + \omega \Phi_0, \\ M_e &= p \frac{m}{2} (\Phi_0 I_q + (L_d - L_q) I_d I_q). \end{aligned} \quad (9.20)$$

Откуда можно найти выражение для электромеханических и электромагнитных характеристик ВД.

Выражение для момента имеет вид:

$$\begin{aligned} M &= \frac{m}{2} p \Psi_0 \frac{U_1 \cos \alpha - \omega \Phi_0 - \omega T_d \cdot U_1 \sin \alpha}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)} + \frac{m}{2} p \frac{(T_d - T_q)}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)^2} \times \\ &\times [\omega T_q (U_1 \cos \alpha - \omega \Phi_0)^2 - \omega T_d (U_1 \sin \alpha)^2] + \\ &+ U_1 \sin \alpha (U_1 \cos \alpha - \omega \Phi_0) (1 - \omega^2 T_d T_q) \end{aligned} \quad (9.21)$$

Ток, потребляемый двигателем:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)} \times \sqrt{(1 + \omega^2 T_q^2)(U_1 \cos \alpha - \omega \Phi_0)^2 +} \\ &+ (1 + \omega^2 T_d^2)(U_1 \sin \alpha)^2 + 2\omega(T_d - T_q)U_1 \sin \alpha (U_1 \cos \alpha - \omega \Phi_0)} \end{aligned} \quad (9.22)$$

По уравнениям 9.21, 9.22 на рис. 9.29 построены механические и электромагнитные характеристики ВД (*файл Char\_Mech1*), из которых видно, что увеличение постоянной времени фильтра приводит к снижению скорости и возрастанию тока якоря. При этом рост тока происходит в основном за счет роста продольной составляющей.

Токи продольной и поперечной составляющих находятся из уравнений:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{U_1 \sin \alpha + \omega T_d (U_1 \cos \alpha - \omega \Phi_0)}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)}, \\ I_q &= \frac{U_1 \cos \alpha - \omega \Phi_0 - \omega T_d U_1 \sin \alpha}{R(1 + \omega^2 T_d T_q)}. \end{aligned} \quad (9.23)$$

Зависимости этих токов от момента, рассчитанные по уравнению (9.23) (*файл Char\_El\_Mech1*), показаны на рис. 9.30.

Таким образом, при использовании вращающегося трансформатора в качестве датчика положения ротора динамические и статические характеристики вентильного двигателя существенно изменяются при изменении инерционности в канале ДПР-ПК-АИ. Это свойство ВД необходимо учитывать как при проектировании регуляторов в замкнутой системе, так и при проектировании силового полупроводникового преобразователя.

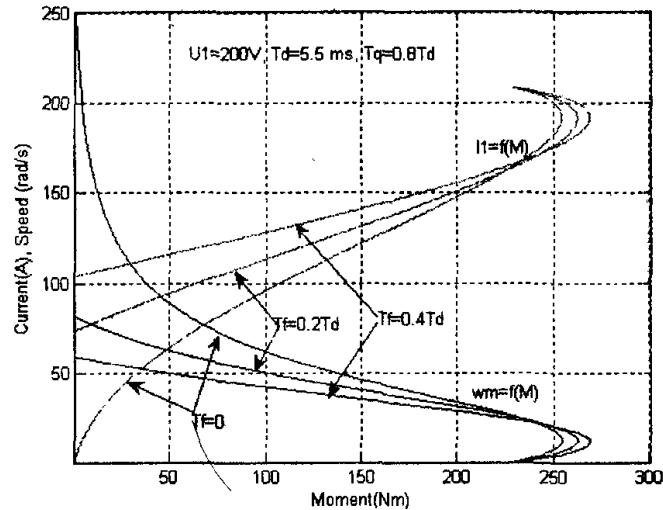


Рис. 9.29. Механические и электромагнитные характеристики ВД с инерционным каналом ДПР-ПК

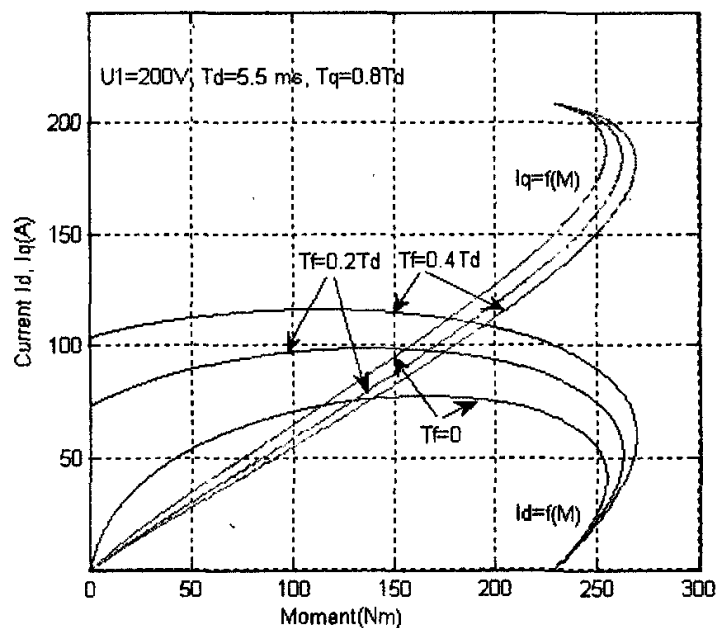


Рис. 9.30. Зависимости токов продольной и поперечной составляющих от момента в ВД с инерционным каналом ДПР-ПК

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.5.6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

### ВОПРОСЫ

1. Исследование виртуальной модели ВД с безынерционным каналом ДПР-ПК и инвертором с синусоидальной ШИМ.
2. Исследование виртуальной модели ВД с инерционным каналом ДПР-ПК и инвертором с синусоидальной ШИМ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. Исследование виртуальной модели ВД с безынерционным каналом ДПР-ПК и инвертором с синусоидальной ШИМ

Виртуальная модель для исследования ВД показана на рис. 9.31 (файл *VD\_Virt\_Inv\_abc*). Модель содержит трехфазную магнитоэлектрическую синхронную машину (Permanent Magnet Synchronous Machine), управляемую от трехфазного инвертора (Universal Bridge), блок управления инвертором (PWM Generator) и преобразователь координат dq-abc (блоки Fcn, Fcn1, Fcn2), в котором реализуются зависимости:

$$\begin{aligned}
 u_A^* &= u_d^* \cos \theta + u_q^* \sin \theta, \\
 u_B^* &= u_d^* \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + u_q^* \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right), \\
 u_C^* &= u_d^* \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + u_q^* \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right).
 \end{aligned} \tag{9.24}$$

В блоке Universal Bridge реализуется усиление входных сигналов в соответствии с уравнениями:

$$u_{A'} = K_{cp} u_A^*, \quad u_{B'} = K_{cp} u_B^*, \quad u_{C'} = K_{cp} u_C^* \tag{9.25}$$

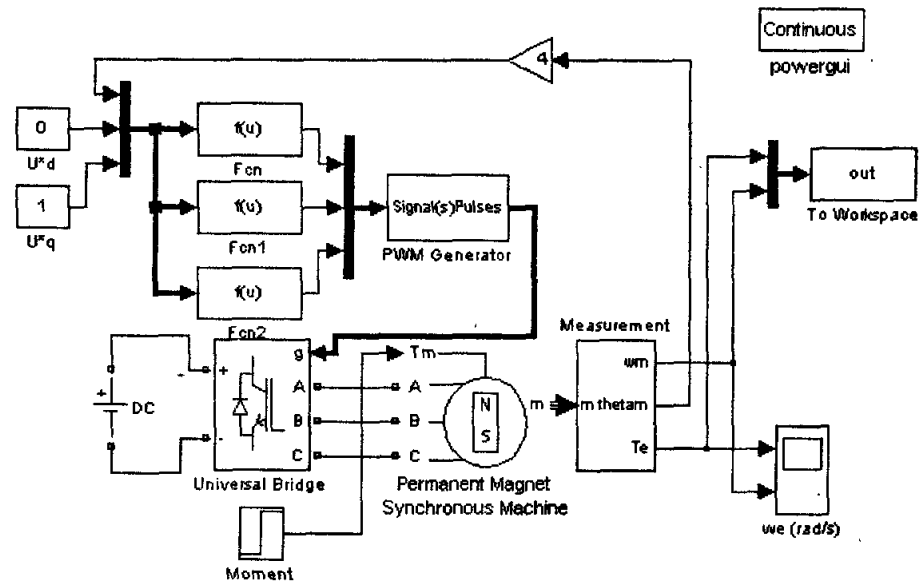


Рис. 9.31. Виртуальная модель ВД с безынерционным каналом ДПР-ПК

Переходные процессы в ВД при амплитудном значении первой гармоники фазного напряжения равным  $U_1=20$  В и  $U_1=200$  В показаны на рис. 9.32, 9.33.

Процессы виртуальной модели повторяют процессы, полученные на структурных моделях (см. рис. 9.5, 9.6, 9.11, 9.12) с безынерционным каналом ДПР-ПК-АИ. Это свидетельствует о том, что запаздывание, вносимое АИ, не сказывается на динамических процессах в ВД.

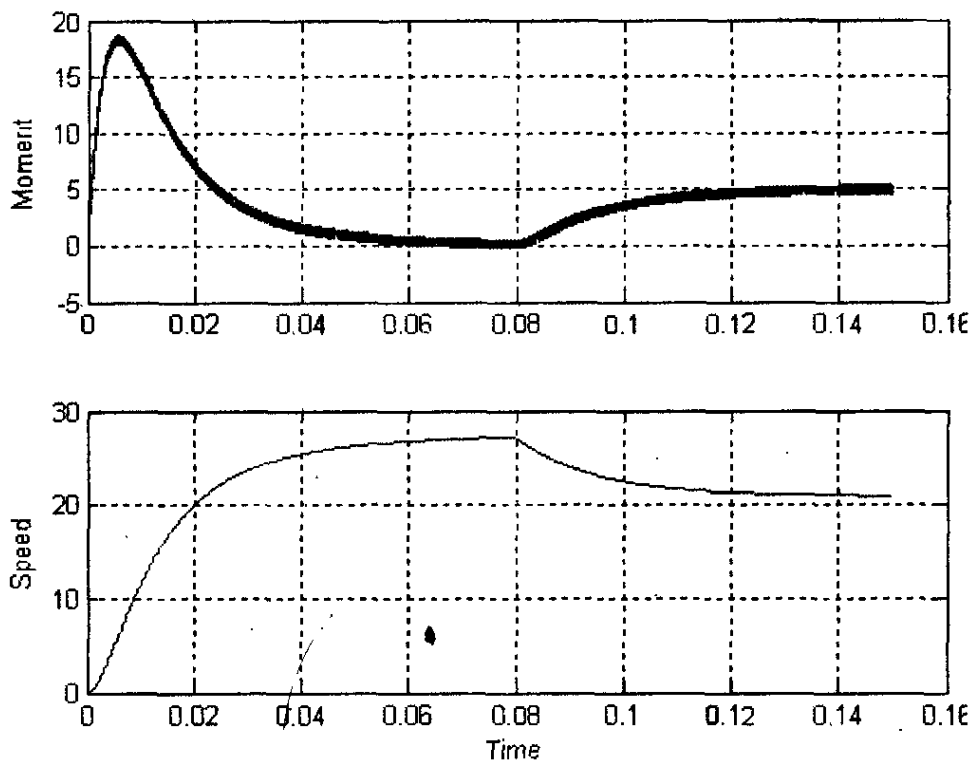


Рис. 9.32. Переходные процессы в виртуальной модели ВД при  $U_1=20$  В

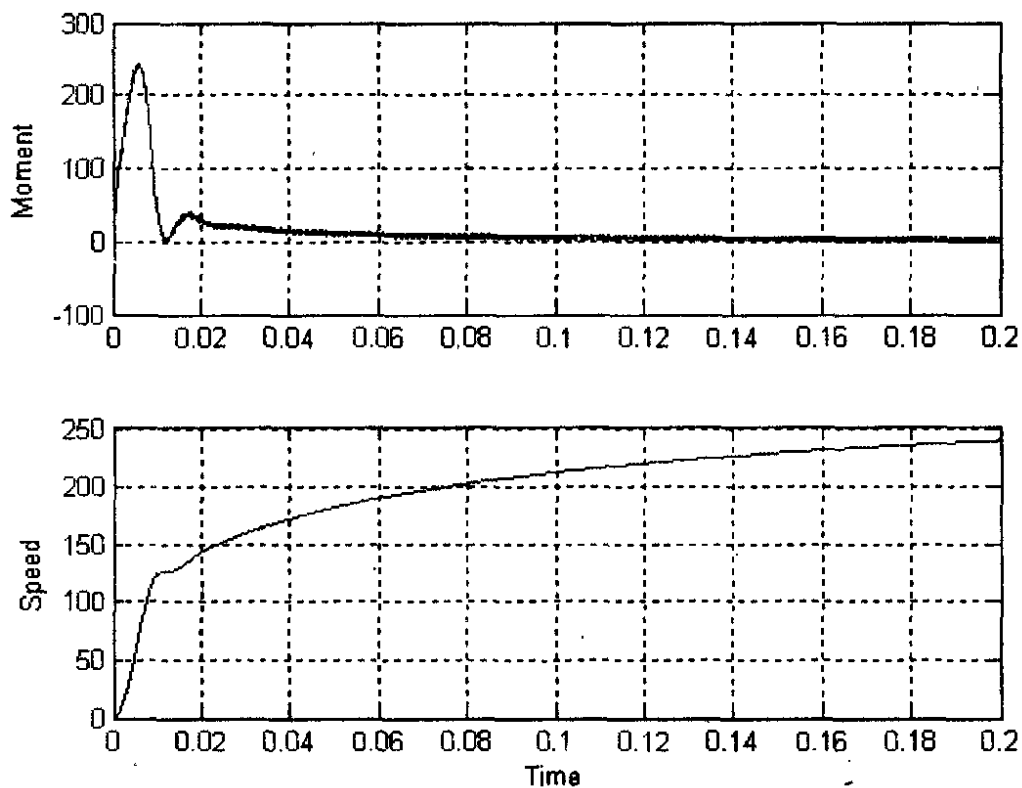


Рис. 9.33. Переходные процессы в виртуальной модели ВД при  $U_1=200$  В

Виртуальная модель ВД представляет собой своего рода лабораторный стенд, на котором осуществим исследование не только динамических характеристик ВД, но и статических, электромагнитных, энергетических и спектральных характеристик.

В качестве статических рассмотрим механические ( $\omega_m = f(M_H), u_1 = const$ ), характеристики ВД.

В качестве электромагнитных рассмотрим зависимости тока в цепи питания инвертора и тока потребления двигателем от скорости вращения ( $I_{dc}, I_1 = f(\omega_m)$ ).

В качестве энергетических рассмотрим зависимости мощности в цепи питания инвертора, полной и активной мощности на выходе инвертора от мощности на валу двигателя ( $P_{dc}, P_1, S_1 = f(P_m)$ ).

Из спектральных характеристик рассмотрим спектры напряжения и тока на выходе инвертора.

Модель для исследования всех перечисленных характеристик показана на рис. 9.34 (файл *VD\_Virt\_Inv\_Measur*).

Исследование установившихся режимов в модели реализовано путем формирования линейно нарастающего момента на валу ВД (блок МН) после окончания переходного процесса. Для этого в течение 0,2 с момент на валу равен нулю.

За это время заканчивается переходной процесс и скорость ВД достигает значения скорости холостого хода. В течение последующих 0,2 с момент плавно нарастает от нуля до 100 Нм. Результаты моделирования в этом промежутке времени записываются в рабочее пространство Matlab блоком To Workspace с последующим расчетом всех перечисленных характеристик (файл *VD\_Virt\_Inv\_Measur.m*).

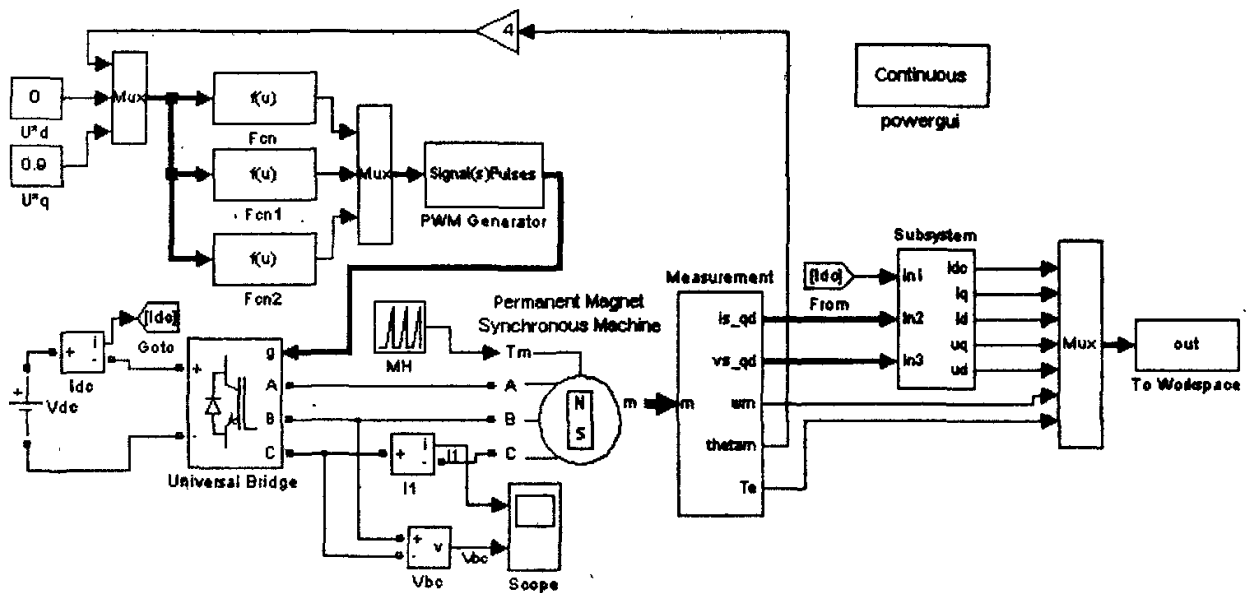


Рис. 9.34. Модель для исследования статических характеристик ВД

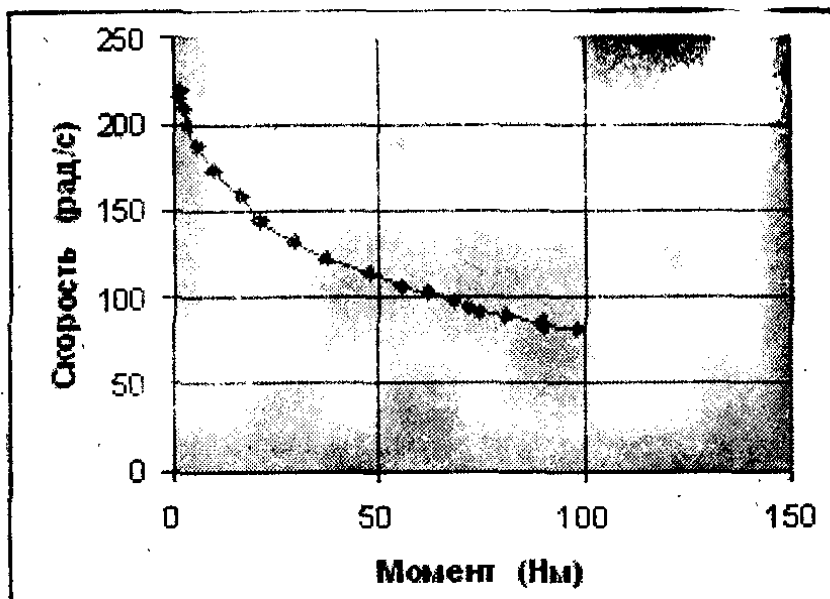


Рис. 9.35 Механическая характеристика ВД

Спектральные характеристики напряжения и тока на выходе инвертора снимаются в установившемся режиме при постоянном моменте нагрузки на валу В/Д с использованием блоков Scope и Powergui. На рис. 9.37 показано выходное линейное напряжение инвертора и его спектр, а на рис. 9.38 — ток на выходе инвертора и его спектр.

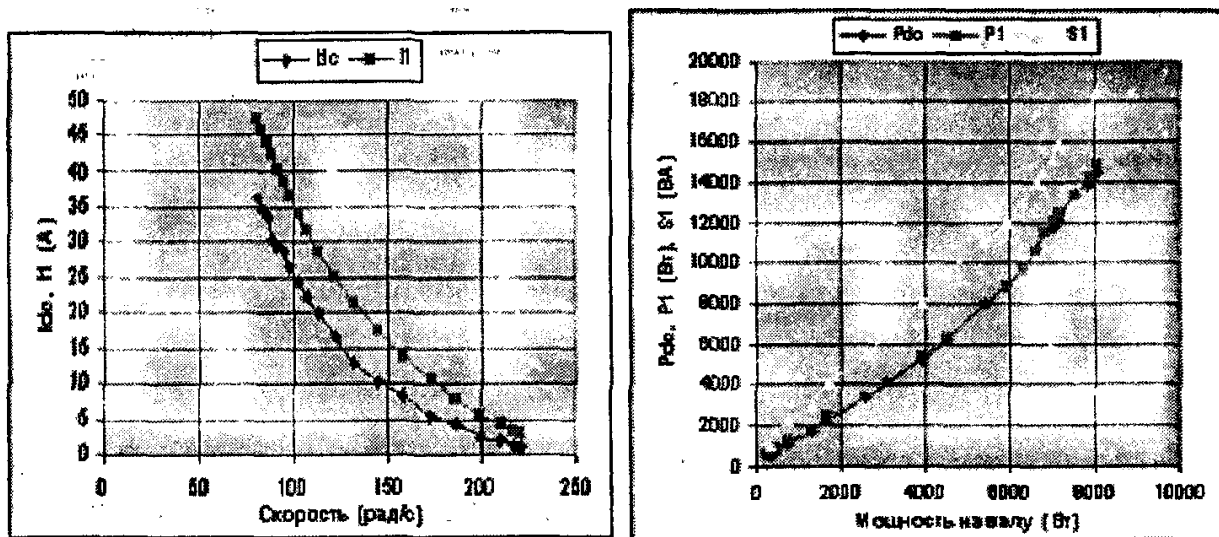


Рис. 9.36. Электромагнитные и энергетические характеристики ВД

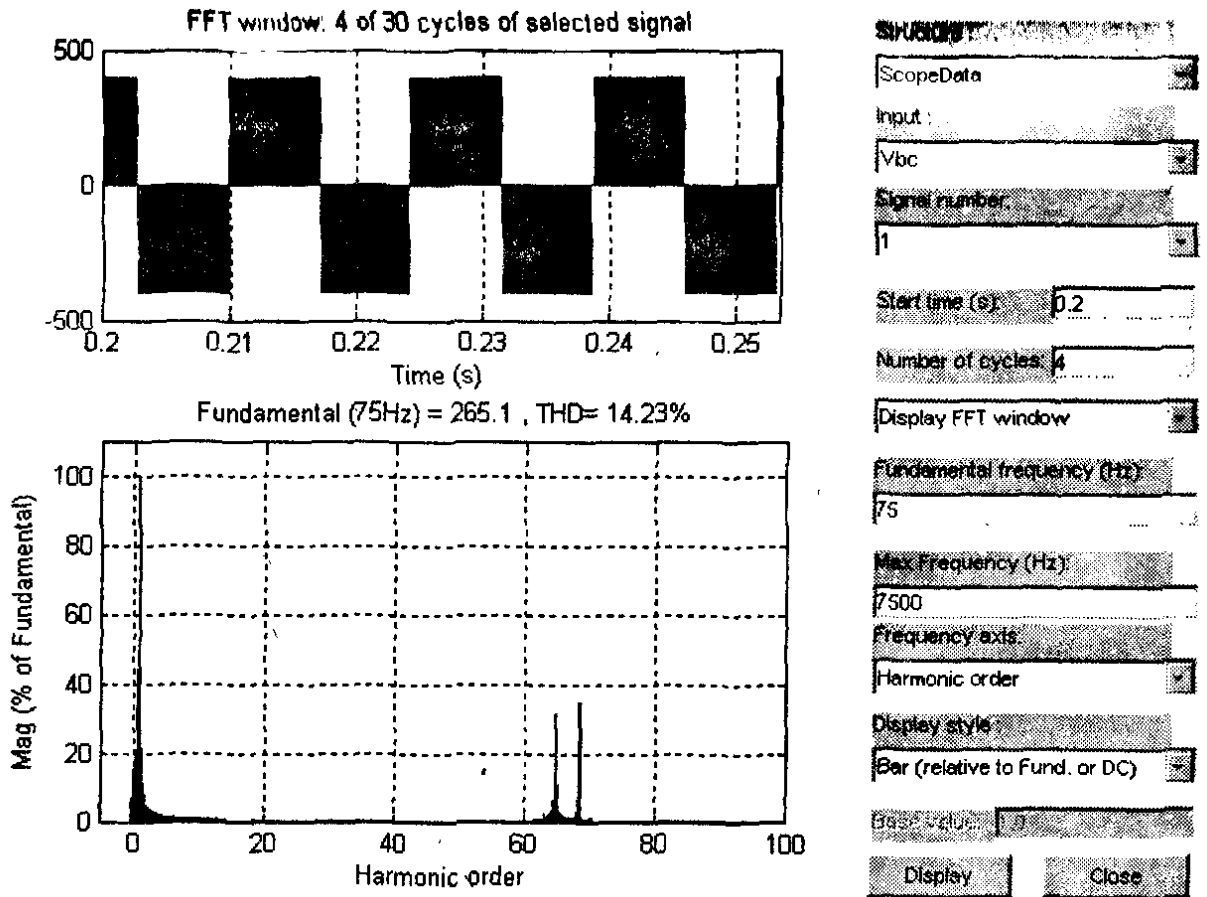


Рис. 9.37. Форма и спектр линейного напряжения питания ВД

### 9.10. Исследование виртуальной модели ВД с инерционным каналом ДПР-ПК и инвертором с синусоидальной ШИМ

Виртуальная модель ВД с инерционным каналом ДПР-ПК и инвертором с синусоидальной ШИМ и одноканальной структурой показана на рис. 9.39 (файл *VD\_Virt\_VT\_Inv\_Measur*). Здесь в блоке Subsystem1 вычисляются  $u_d$ ,  $u_q$  по уравнениям

$$u_d = u_1 \sin \alpha = u_1 \sin \omega T_\phi, \quad u_q = u_1 \cos \alpha = u_1 \cos \omega T_\phi. \quad (9.26)$$

Исследование модели и построение основных характеристик осуществляется аналогично рассмотренным выше. Динамические процессы виртуальной модели повторяют процессы, полученные на структурных моделях (см. рис. 9.24).

Инерционность в канале ДПР-ПК существенно влияет на механические характеристики (сравнить рис. 9.35 и рис. 9.40) и на энергетические характеристики (сравнить рис. 9.36 и рис. 9.41). Из сравнения энергетических характеристик можно видеть, что КПД и коэффициент мощности в ВД с инерционным каналом ДПР-ПК приблизительно в 1,5 раза меньше.

Исключить влияние перекрестных связей и запаздывания в канале ДПР-ПК на динамические, механические, электромагнитные и энергетические характеристики ВД возможно на пути построения замкнутых по току систем регулирования. Поэтому в дальнейшем рассматриваются замкнутые системы, в которых в обязательном порядке присутствуют токовые контуры.

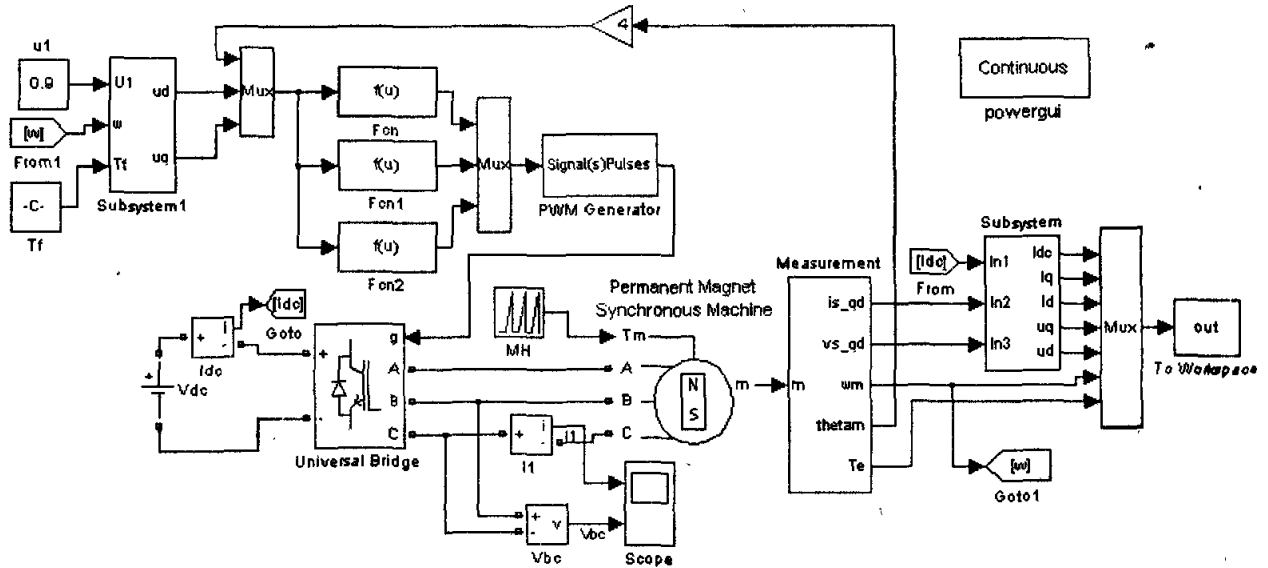


Рис. 9.39. Виртуальная модель ВД с инерционным каналом ДПР-ПК

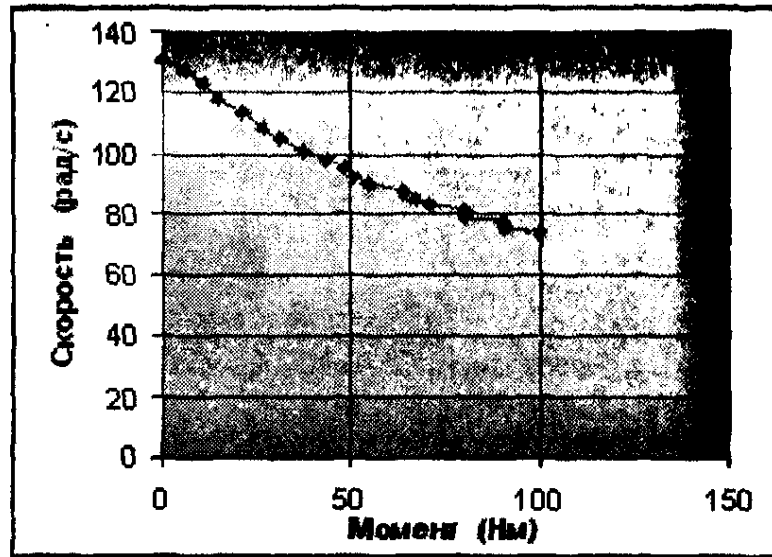


Рис. 9.40. Механическая характеристика ВД с инерционным каналом ДПР-ПК

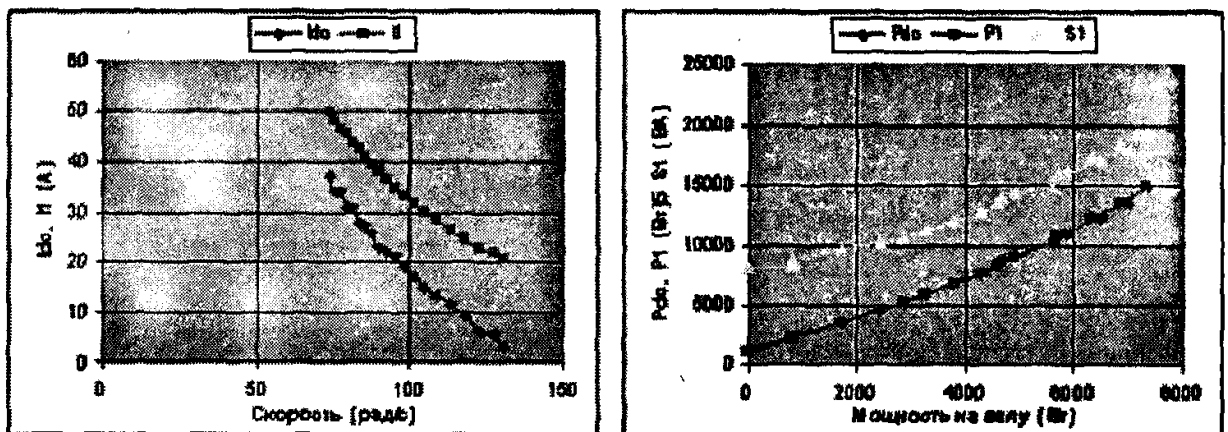


Рис. 9.41. Электромагнитные и энергетические характеристики ВД с инерционным каналом ДПР-ПК

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.5.7. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМЕ С ВД

### ВОПРОСЫ

1. Синтез регуляторов в двухконтурной скоростной системе с вентильным двигателем во вращающейся системе координат с безынерционным каналом ДПР-ПК.
2. Синтез регуляторов в двухконтурной скоростной системе с вентильным двигателем с инерционным каналом ДПР-ПК.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. Синтез регуляторов в двухконтурной скоростной системе с вентильным двигателем во вращающейся системе координат с безынерционным каналом ДПР-ПК.

Функциональная схема двухконтурной скоростной системы показана на рис. 9.42

Контур тока в такой системе может быть реализован двояким способом. В первом случае контур тока реализуется в неподвижной системе координат. В этом варианте регулятор тока может быть только релейного типа. Во втором случае контур тока реализуется во вращающейся системе координат (пунктир на рис. 9.42). В этом случае регулятор тока может быть как релейным, так и линейным. При безынерционном канале ДПР-ПК и использовании релейного регулятора тока синтез регулятора скорости не зависит от места включения регулятора тока. Напомним, что в зависимости от способа формирования сигналов управления  $u_d$ ,  $u_q$  рассматриваются одноканальные и двухканальные структуры.

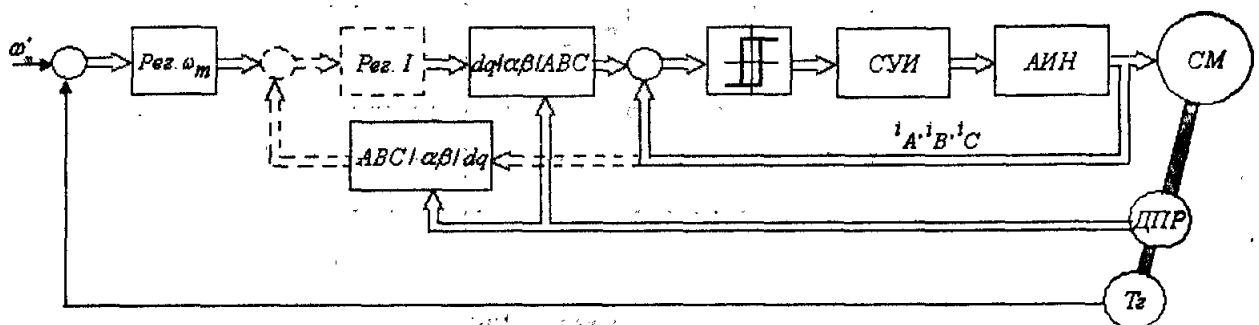


Рис. 9.42. Структура синхронной скоростной системы с инерционным каналом ДПР-ПК

**Пример 9.1.** Рассмотрим пример построения скоростной системы с релейными регуляторами в контуре тока.

В этом случае контур тока можно считать безынерционным, а силовой регулятор – источником тока. Тогда передаточная функция объекта регулирования без учета перекрестных связей будет представлена интегрирующим звеном (см. рис. 9.8).

$$W_o(s) = \frac{mp\Phi_0}{2Js}, \quad (9.27)$$

а передаточная функция разомкнутой системы будет равна

$$W_{\text{раз}}(s) = \frac{mp\Phi_0}{2Js} W_p(s) k_{oc.\omega} \quad (9.28)$$

При пропорциональном регуляторе скорости с коэффициентом усиления  $k_p$  и коэффициентом обратной связи  $k_{oc.\omega}$  передаточная функция замкнутой по скорости системы будет аperiодической с постоянной времени  $T_\omega = \frac{2J}{mp\Phi_0 k_p k_{oc.\omega}}$ .

Модель системы (файл *VD\_Mod\_drive\_Hist\_dq*), в которой учтены перекрестные связи в ВД и модель без учета перекрестных связей, которая аналогична двигателю постоянного тока, реализованы параллельно (рис. 9.43). Результаты моделирования системы с ВД и эквивалентной системы постоянного тока полностью совпадают. Переходные процессы «в малом» показаны на рис. 9.44. Построение переходных процессов реализовано в файле (*VD\_Mod\_drive\_Hist\_dq.m*).

Из сравнения результатов моделирования видно, что в замкнутой системе при наличии токовых контуров вентильная машина может быть представлена структурой, соответствующей структуре двигателя постоянного тока. При этом синтез скоростных и следящих систем с ВД подобен синтезу в системах постоянного тока, рассмотренном в гл. 7.

Переходные процессы «в большом» показаны на рис. 9.45.

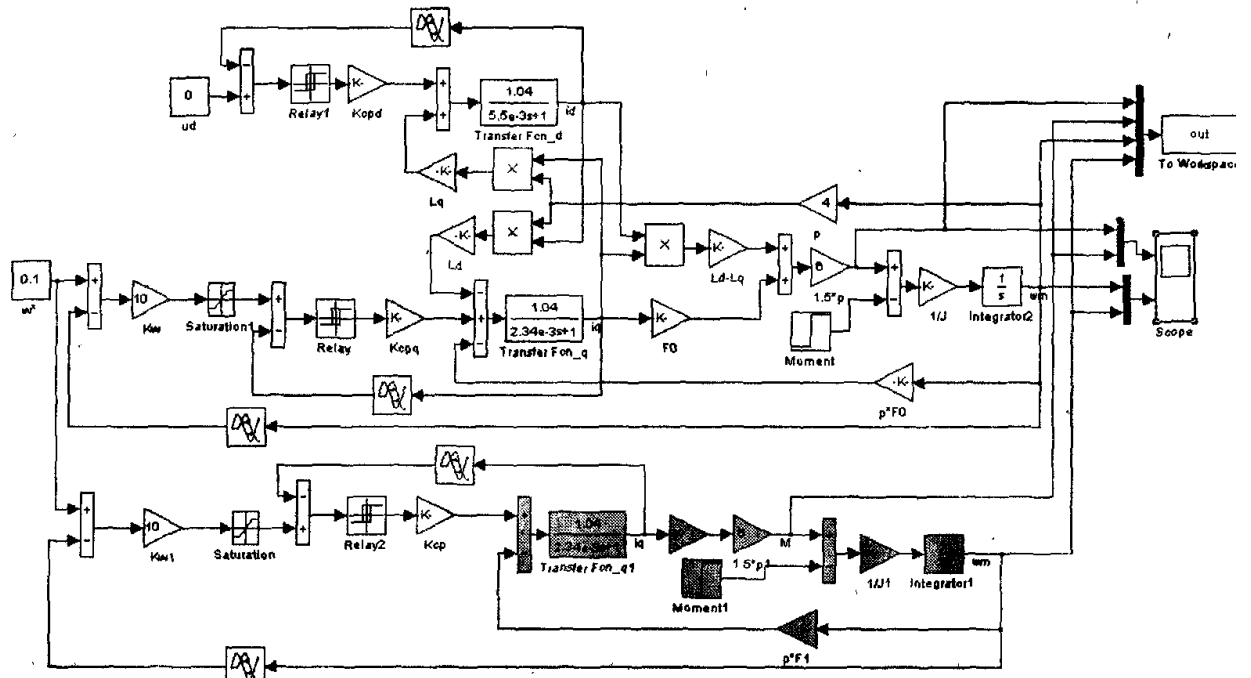


Рис. 9.43. Модели одноконтурной скоростной системы с ВД и эквивалентной системы с ДПТ

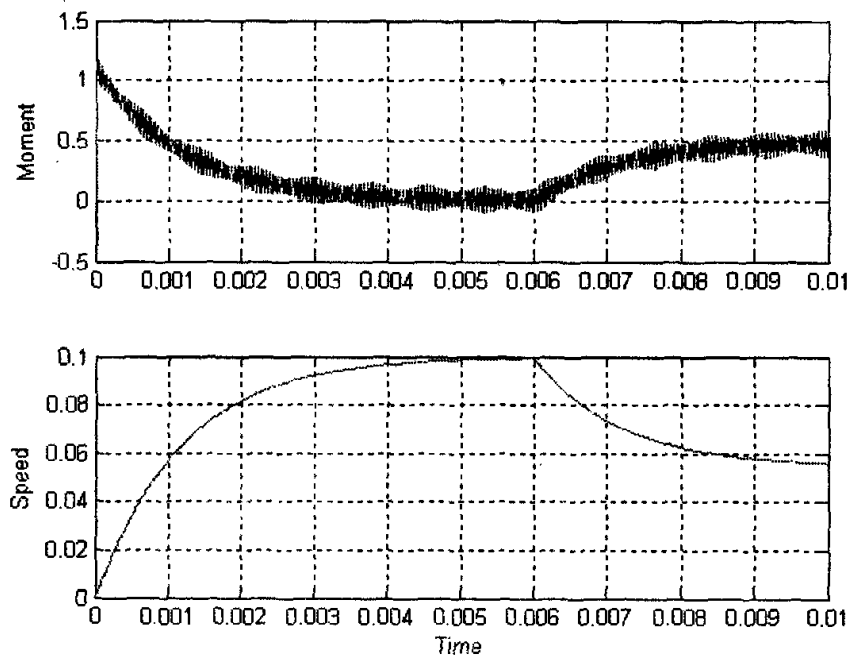


Рис. 9.44. Переходные процессы «в малом» в модели одноконтурной скоростной системы с ВД

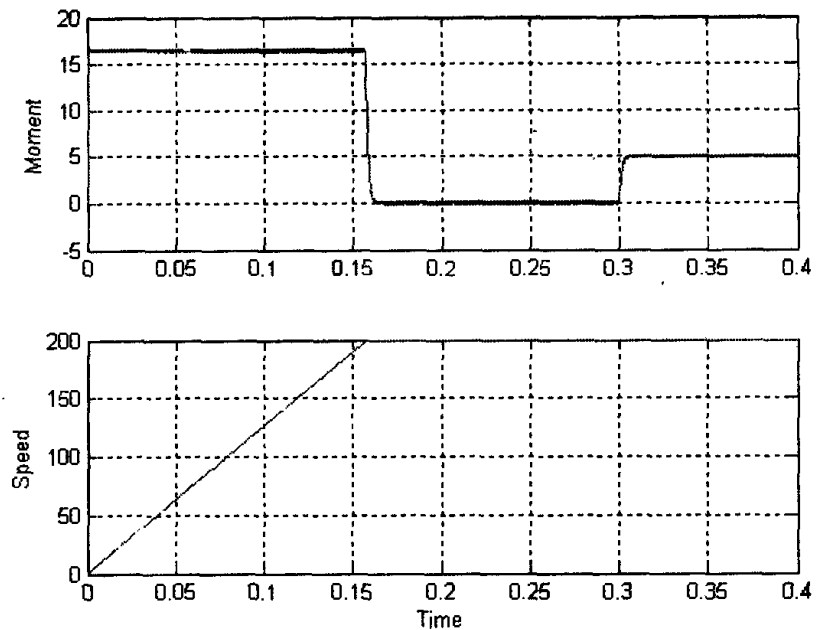


Рис. 9.45. Переходные процессы «в большом» в модели одноконтурной скоростной системы с ВД

Для придания системе астатизма по возмущению следует синтезировать ПИ-регулятор скорости, рассчитав его параметры аналогично примеру 7.3 (гл. 7).

*Пример 9.2.* Рассмотрим пример синтеза регуляторов тока и скорости в скоростной системе с автономным инвертором, который представим звеном с запаздыванием на период коммутации  $T_{cp}=0,0002$  с ( $f=5000$  Гц) и коэффициентом усиления  $k_{cp}=200$ .

Когда в ВД использован синхронный двигатель с явно выраженными полюсами, то постоянные времени  $T_d$ ,  $T_q$  в каналах различны. Поэтому параметры регуляторов тока в каналах будут также различаться. Для выбранного ВД (табл. 9.1) электромагнитные постоянные времени  $T_d$ ,  $T_q$  значительно превышают постоянную времени силового регулятора и его можно считать безынерционным. Поскольку канал  $q$  «отвечает» за момент, то регулятор скорости включен в этот канал. Структурная схема замкнутой системы приведена на рис. 9.46. Синтез регуляторов в этой структуре осуществим без учета перекрестных связей между каналами.

Если в качестве токового регулятора использовать пропорциональный регулятор, то замкнутый токовый контур опишется апериодическим звеном с передаточной функцией.

$$\text{Для канала } d \quad W_s(s) = \frac{1}{k_{oc.d}} \frac{1}{T_d' s + 1}, \text{ где } T_d' = \frac{T_d R}{k_{pd} k_{cp} k_{oc.d}} \quad (9.29)$$

$$\text{Для канала } q \quad W_s(s) = \frac{1}{k_{oc.q}} \frac{1}{T_q' s + 1}, \text{ где } T_q' = \frac{T_q R}{k_{pq} k_{cp} k_{oc.q}} \quad (9.30)$$

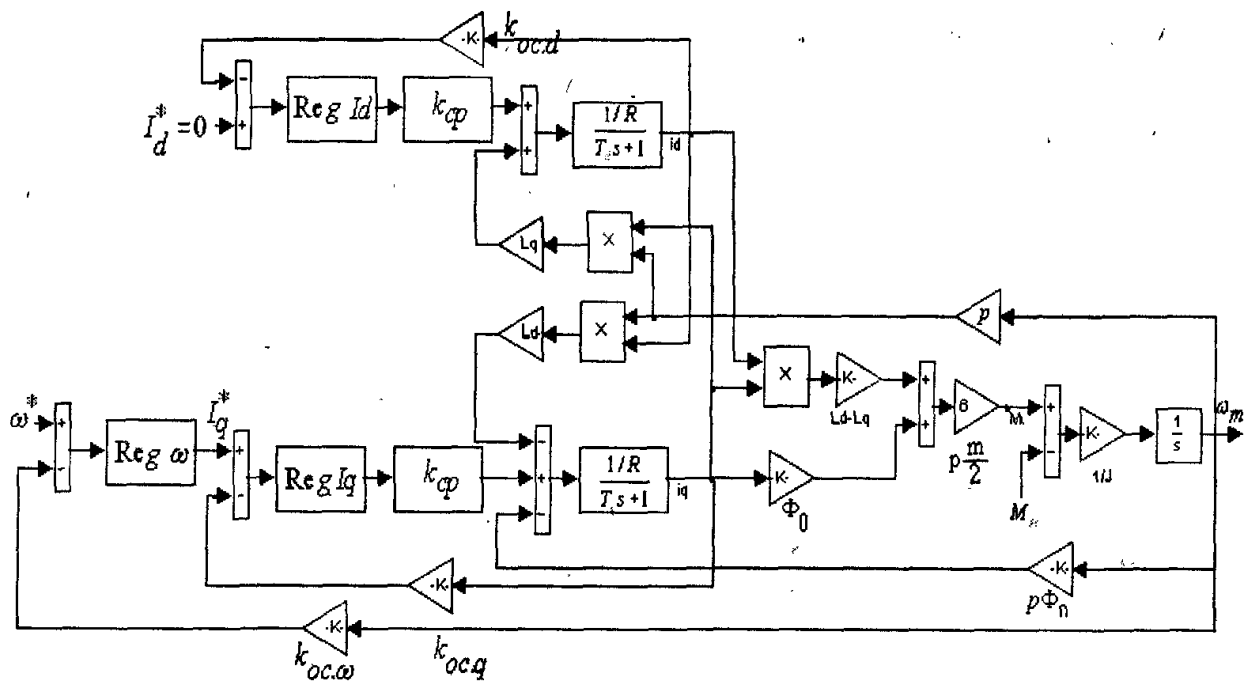


Рис. 9.46. Структурная схема замкнутой двухконтурной скоростной системы с ВД

Если в канале скорости выбрать пропорциональный регулятор с коэффициентом усиления

$$k_{p.\omega} = \frac{J \cdot k_{oc.q}}{mp\Phi_0 T_q' k_{oc.\omega}}, \quad (9.31)$$

то скоростная система будет настроена на оптимум по модулю, а передаточная функция замкнутой скоростной системы будет равна

$$W_\omega(s) = \frac{1}{k_{oc.\omega}} \frac{1}{2T_q' s^2 + 2T_q' s + 1}. \quad (9.32)$$

На рис. 9.47 приведена модель (файл *VD\_Mod\_drive\_dq*) с выбранными и рассчитанными в соответствии с уравнениями (2.29), (2.30), (2.31) параметрами

$$k_{pq} = k_{oc.d} = k_{oc.q} = k_{oc.\omega} = 1, k_{pd} = 2,34, k_{cp} = 200, k_\omega = 493.$$

Здесь же помещена эквивалентная модель постоянного тока с теми же самыми регуляторами. Переходные процессы в этих двух системах совершенно одинаковые, они представлены на рис. 9.48, рис. 9.49.

Для придания системе астатизма по возмущению (моменту) необходимо в регулятор скорости добавить интегральную составляющую.



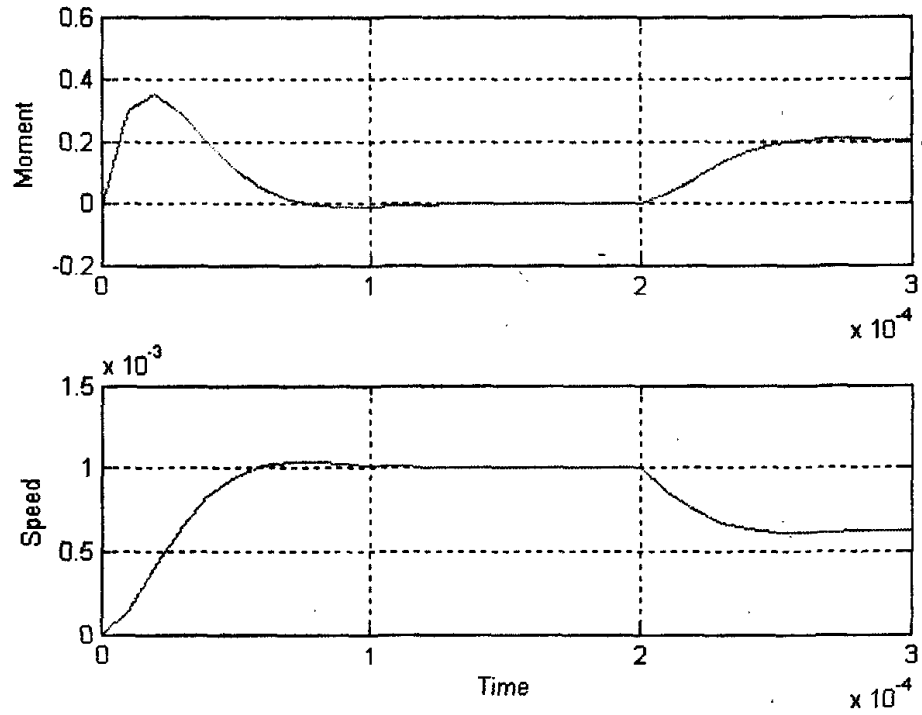


Рис. 9.48. Переходные процессы «в малом» в модели двухконтурной скоростной системы с ВД

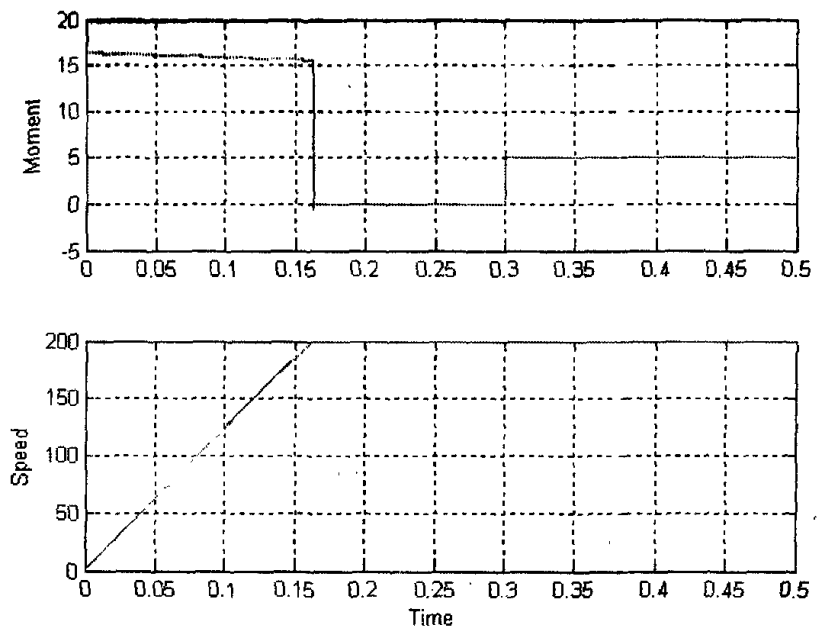


Рис. 9.49. Переходные процессы «в большом» в модели двухконтурной скоростной системы с ВД

### 9.12. Синтез регуляторов в двухконтурной скоростной системе с вентильным двигателем с инерционным каналом ДПР-ПК

*Пример 9.3.* Рассмотрим двухканальную систему управления ВД с релейными регуляторами тока, реализованными в неподвижной системе координат.

Модель этой системы показана на рис. 9.50 (файл *VD\_Mod\_VT\_drive\_Hist\_ab2*).

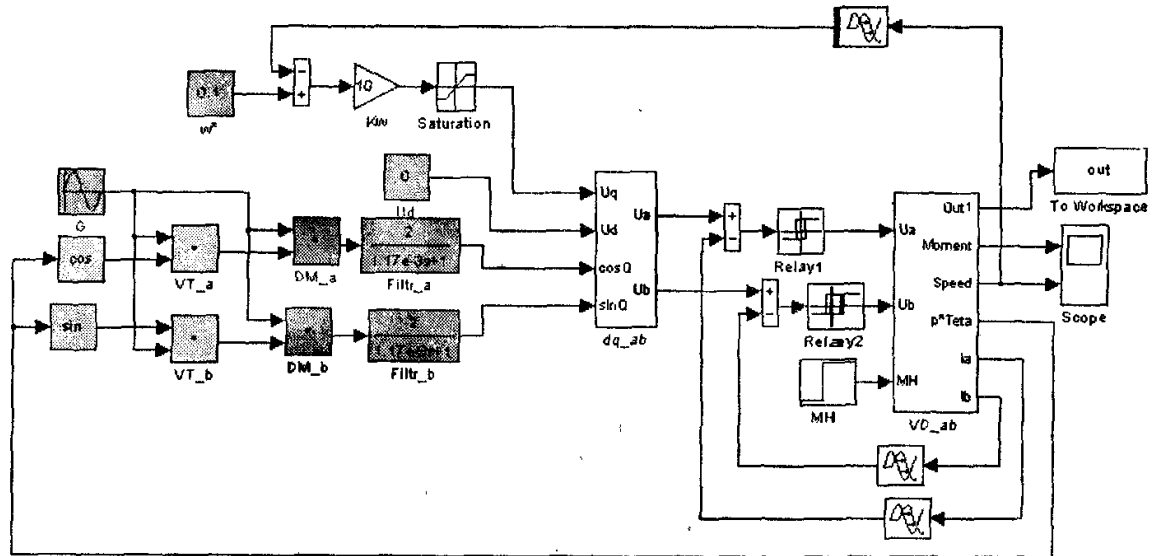


Рис. 9.50. Модель двухканальной системы управления ВД с релейными регуляторами тока в неподвижной системе координат

Здесь блок *VD\_ab* представляет собой модель ВД в неподвижной системе координат. Регулятор скорости (блок *Kw*) рассчитан так же как в примере 9.1. Коэффициент передачи фильтра принят равным 2 для компенсации уменьшения напряжения управления в модуляторе.

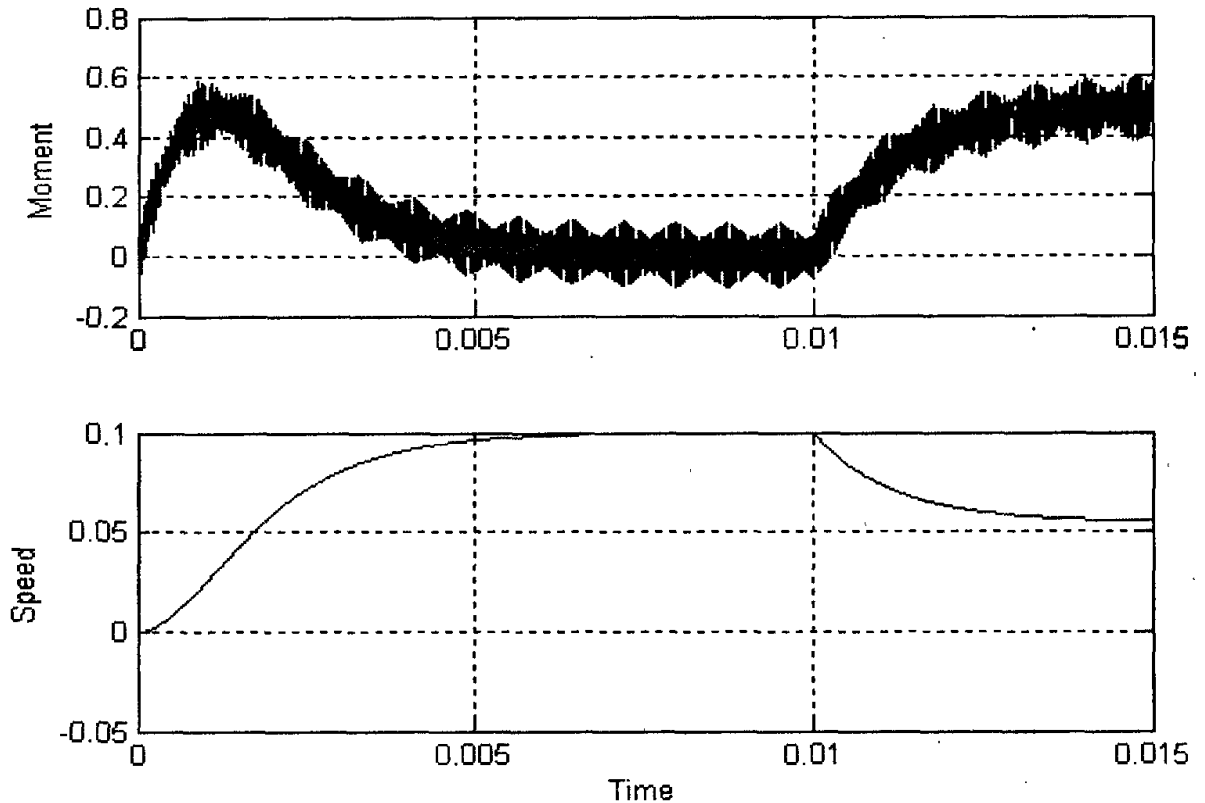


Рис. 9.51. Переходные процессы в модели двухканальной системы управления ВД с релейными регуляторами тока в неподвижной системе координат

Переходной процесс в системе «в малом» по управлению и возмущению показан на рис. 9.51. Сравнение динамических свойств системы с аналогичными (рис. 9.44) показывают, что в данном случае переходной процесс по управлению несколько затянут, а динамический момент уменьшился в два раза.

*Пример 9.4.* Рассмотрим двухканальную систему управления ВД с релейными регуляторами тока, реализованными во вращающейся системе координат.

Модель этой системы показана на рис. 9.52 (*файл VD\_Mod\_VT\_drive\_Hist\_dq2*). Здесь блок VD\_dq представляет собой модель ВД во вращающейся системе координат. Регулятор скорости (блок Kw) рассчитан так же как в примере 9.1.

В данном случае переходные процессы в системе полностью повторяют процессы в системе с безынерционным каналом ДПР\_ПК, представленные на рис. 9.44, рис. 9.45. Такие свойства системы с инерционным каналом ДПР\_ПК можно объяснить тем, что инерционный канал находится внутри релейного токового контура.

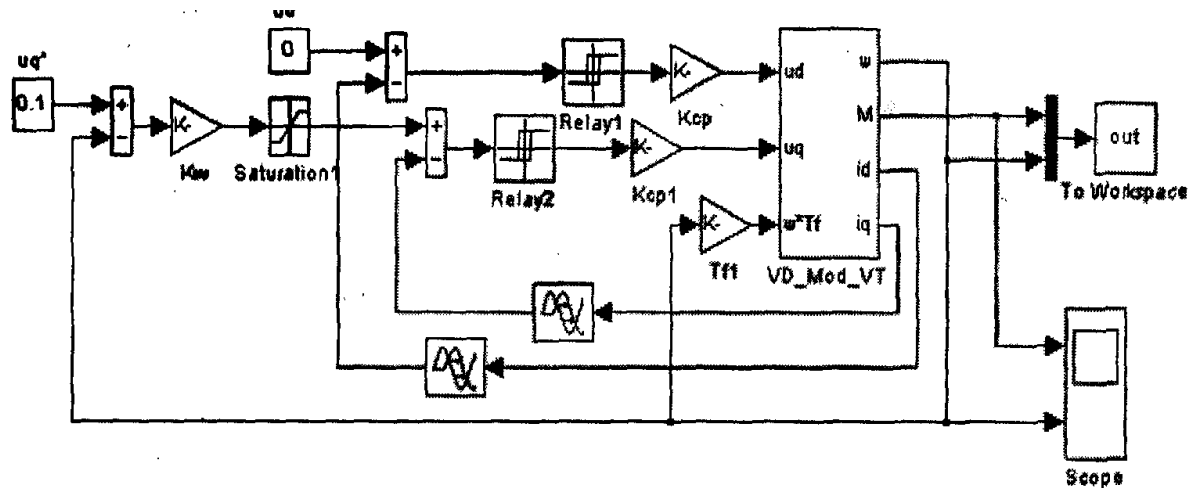


Рис. 9.52. Модель двухканальной системы с релейными регуляторами тока, реализованными во вращающейся системе координат

*Пример 9.5.* Рассмотрим двухканальную систему управления ВД с линейными регуляторами тока, реализованными во вращающейся системе координат.

Модель этой системы показана на рис. 9.53 (файл *VD\_Mod\_VT\_drive\_dq2*). Здесь блок *VD\_Mod\_dq* представляет собой модель ВД во вращающейся системе координат.

Регуляторы тока и регулятор скорости в системе выбраны такими же, как в примере 9.2. Переходные процессы в системе полностью повторяют процессы в системе с безынерционным каналом ДПР\_ПК, представленные на рис. 9.48, рис. 9.49.

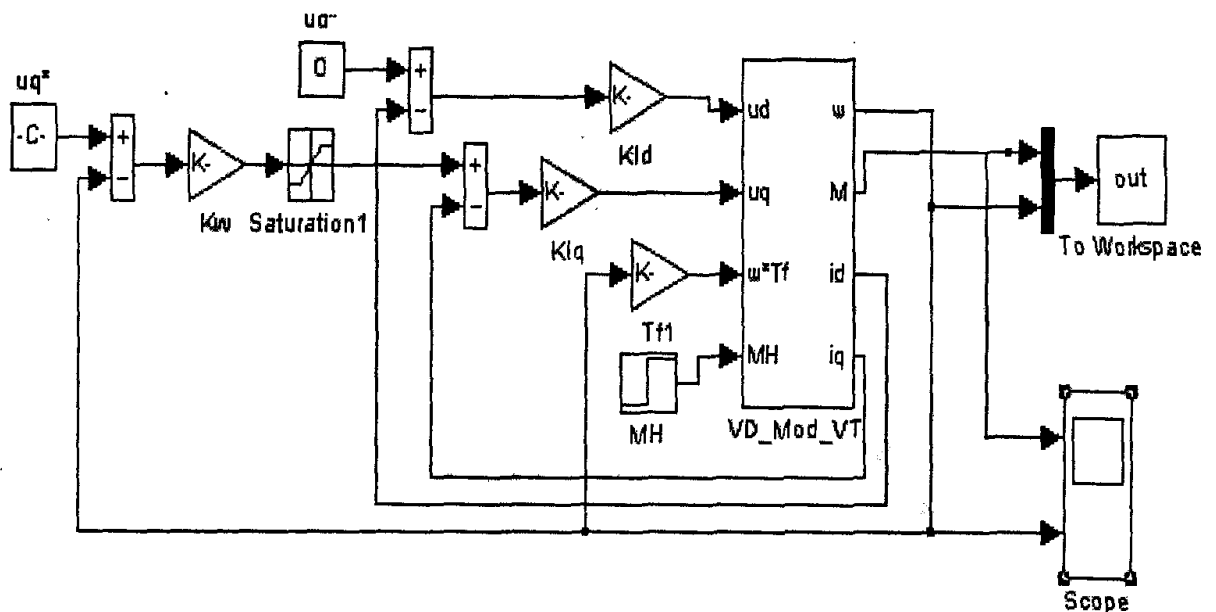


Рис. 9.53. Модель двухканальной системы с линейными регуляторами тока во вращающейся системе координат

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ТЕМА 2.5.8. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ В ВИРТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ И ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### ВОПРОСЫ

1. Синтез регуляторов в двухконтурной синхронной скоростной виртуальной системе.
2. Виртуальная одноконтурная скоростная система с бесконтактным двигателем постоянного тока.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-ВЕК, 2008. – 368 с.

### 1. Синтез регуляторов в двухконтурной синхронной скоростной виртуальной системе

Рассмотрим вопрос синтеза скоростного регулятора в системе с трехфазным автономным инвертором и релейными регуляторами в контуре тока.

В этом случае, как и ранее, контур тока можно считать безынерционным, а инвертор — источником тока.

Регулятор скорости синтезируем в соответствии с методикой, описанной в примере 9.1. Модель замкнутой системы (*файл VD\_virt\_drive\_abc*) представлена на рис. 9.54, а ее динамические характеристики «в малом» — на рис. 9.55.

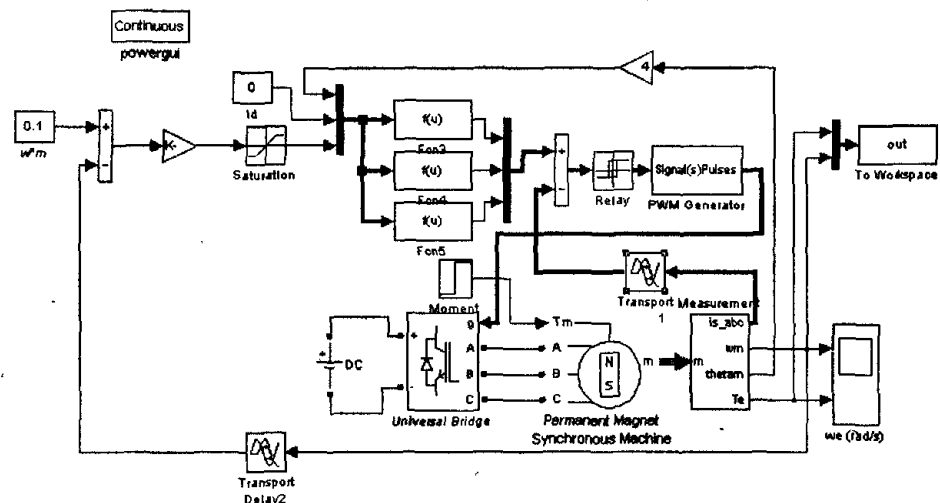


Рис. 9.54. Модель виртуальной двухконтурной скоростной системы с релейными регуляторами тока

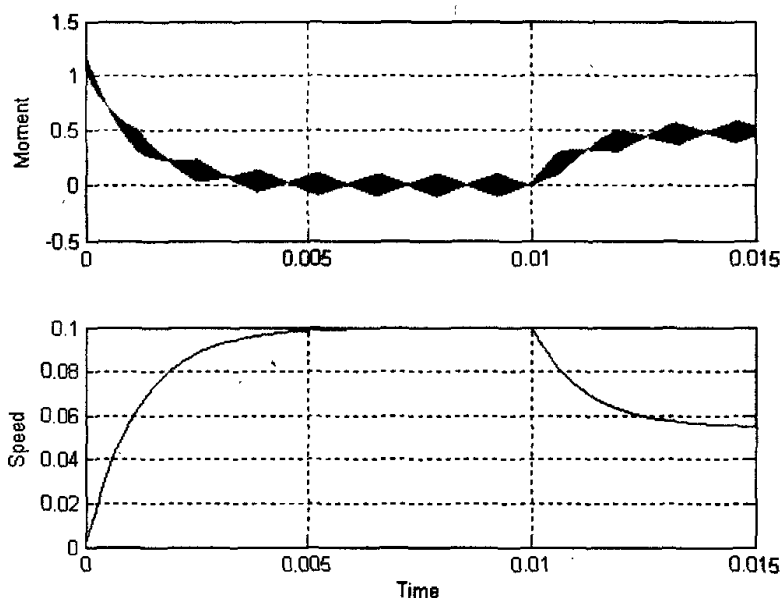


Рис. 9.55. Переходные процессы в виртуальной двухконтурной скоростной системе с релейными регуляторами тока

Сравнивая эти характеристики с характеристиками синтезированной структурной модели (рис. 9.43) можно судить об их полной идентичности.

Виртуальная модель позволяет исследовать не только динамические характеристики системы, но и все статические (электромагнитные, энергетические, регулировочные, механические) характеристики.

#### **9.14. Виртуальная одноконтурная скоростная система с бесконтактным двигателем постоянного тока**

Мехатронную систему с БДПТ рассмотрим на примере одноконтурной скоростной системы, аналогичной той, которая исследована в п. 7.6, гл. 7. Модель замкнутой системы показана на рис. 9.56 (*файл BDPT\_Virt*).

В этой системе инвертор выполняет роль коммутатора. При этом каждый транзистор инвертора включен в течение  $\alpha = 120^\circ$ . На рис. 9.57 показаны импульсы управления транзисторами одного плеча инвертора и ток нагрузки этого плеча в установившемся режиме работы.

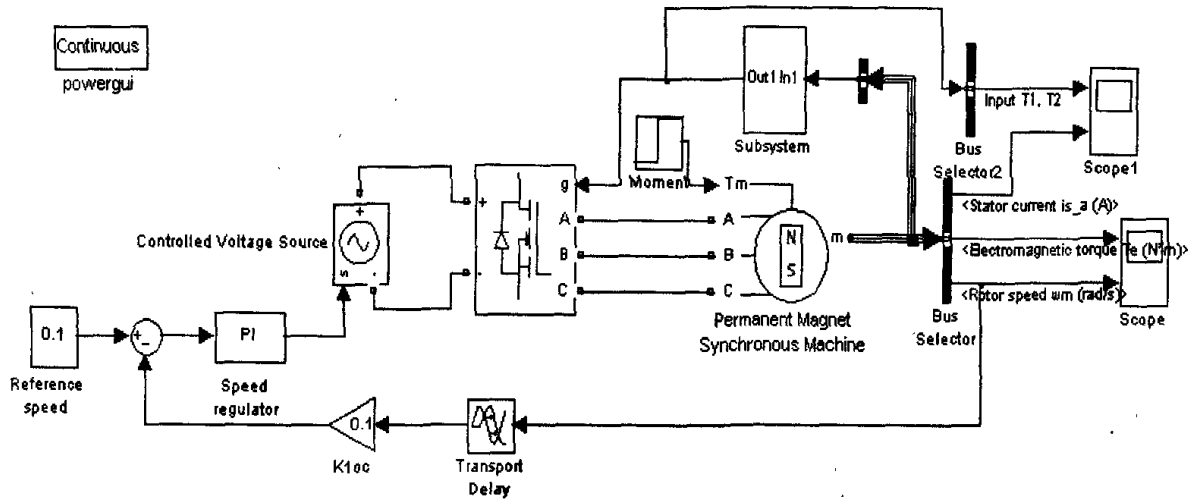


Рис. 9.56. Модель замкнутой одноконтурной скоростной системы с БДП

При таком управлении инвертором изменять напряжение на его выходе можно только в звене постоянного тока. В модели для этой цели используется управляемый источник напряжения (Controlled Voltage Source), который управляется от регулятора скорости.

При синтезе регулятора скорости приходится упрощать математическое описание БДПТ (уравнения 6.6, гл.6), заменяя его эквивалентным двигателем постоянного тока.

В этом случае уравнения, которыми описывается БДПТ, будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}
 u_s &= R_s(T_s s + 1)i_s + \Phi_0 p \omega_m, \\
 M &= p \frac{m}{2} \Phi_0 i_s, \\
 s \omega_m &= \frac{1}{J} (M - M_H), \\
 s \theta_m &= \omega_m,
 \end{aligned}
 \tag{9.33}$$

где  $u_s$ ,  $i_s$  — напряжение и ток статора (якоря),  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $T_s = \frac{L_s}{R_s}$ ,  $\Phi_0$ ,  $J$ ,  $p$  — параметры двигателя, которые вводятся в поля окна настройки параметров БДПТ (рис. 6.18, гл. 6),  $m=3$  — число фаз.

В соответствии с уравнениями (9.33) на рис. 9.58 построена структура БДПТ. Эта структура подобна структуре ДПТ (рис. 7.1), в которой

$$K_1 = \frac{1}{R_s}, \quad k_M = p \frac{m}{2} \Phi_0, \quad K_2 = \frac{p m \Phi_0}{2J}, \quad k_E = p \Phi_0.$$

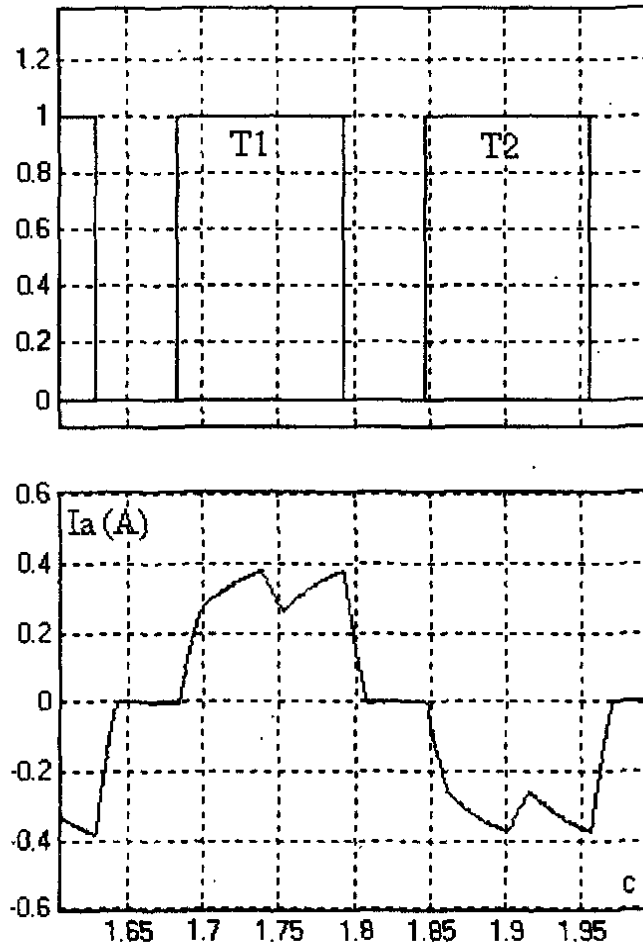


Рис. 9.57. Электромагнитные процессы в БДПТ

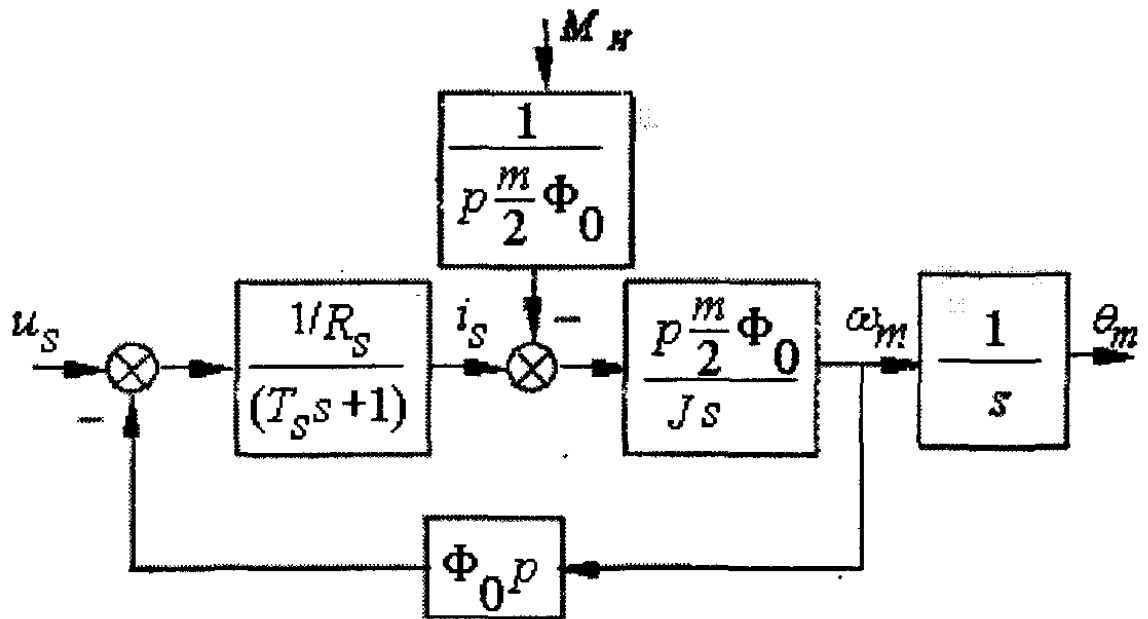


Рис. 9.58. Структурная схема БДПТ

$K_1$	$K_2$	$K_M$	$K_E$	$T_{\text{я}}$	$J$	$T_1$	$T_2$
1/Ом	1/Амс <sup>2</sup>	Нм/А	Вс	с	кгм <sup>2</sup>	с	с
0.86	1.42	0.51	0.34	0.043	0.36	0.044	2.15

Таблица 9.

В таблице 9 приведены данные БДПТ. Основные из них соответствуют рассмотренному в гл. 7 ДПТ.

Поскольку  $T_2 \gg T_1$  целесообразно строить ПИ-регулятор, который компенсировал бы большую постоянную времени объекта

$$W_p(s) = \frac{(T_2s + 1) \cdot k_p}{T_2s} = k_p + \frac{k_p}{T_2s} = k_{\text{П}} + \frac{k_{\text{И}}}{s}. \quad (9.34)$$

Тогда передаточная функция разомкнутой системы будет равна:

$$W_{\text{РАЗ}}(s) = \frac{(T_2s + 1) \cdot k_{\text{CP}} k_p k_{\text{OC}}}{T_2s} \cdot \frac{1/k_E}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1)} = \frac{k_{\text{CP}} k_p k_{\text{OC}} / k_E}{T_2s \cdot (T_1s + 1)} \quad (9.35)$$

Оптимум по модулю в такой системе достигается при  $\frac{T_2 k_E}{k_{\text{CP}} k_p k_{\text{OC}}} = 2T_1$

Коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной части регулятора определяются из уравнений:

$$k_{\text{П}} = k_p = \frac{T_2 k_E}{2T_1 k_{\text{CP}} k_{\text{OC}}}, \quad k_{\text{И}} = \frac{k_p}{T_2}. \quad (9.36)$$

При  $k_{\text{CP}} = 10$ ,  $k_{\text{OC}} = 0,1$  параметры регулятора будут равны  $k_{\text{П}} = 8,3$ ,  $k_{\text{И}} = 3,86$ , а переходные процессы в замкнутом скоростном контуре по моменту и скорости при скачке входного сигнала в момент времени  $t = 0$  и скачке возмущающего сигнала (момента на валу БДПТ) в момент времени  $t = 0,5$  представлены характеристиками на рис. 9.59.

Сравнивая параметры регулятора и результаты моделирования с примером 7.1 гл. 7 можно судить о возможности представления БДПТ эквивалентным ДПТ с математическим описанием, соответствующему системе уравнений (9.33).

В пакете Sim Power System представлены два имитационных стенда замкнутых синхронных систем. Панели настройки параметров этих стендов аналогичны рассмотренным в главах 7, 8 стендам постоянного тока и асинхронным.

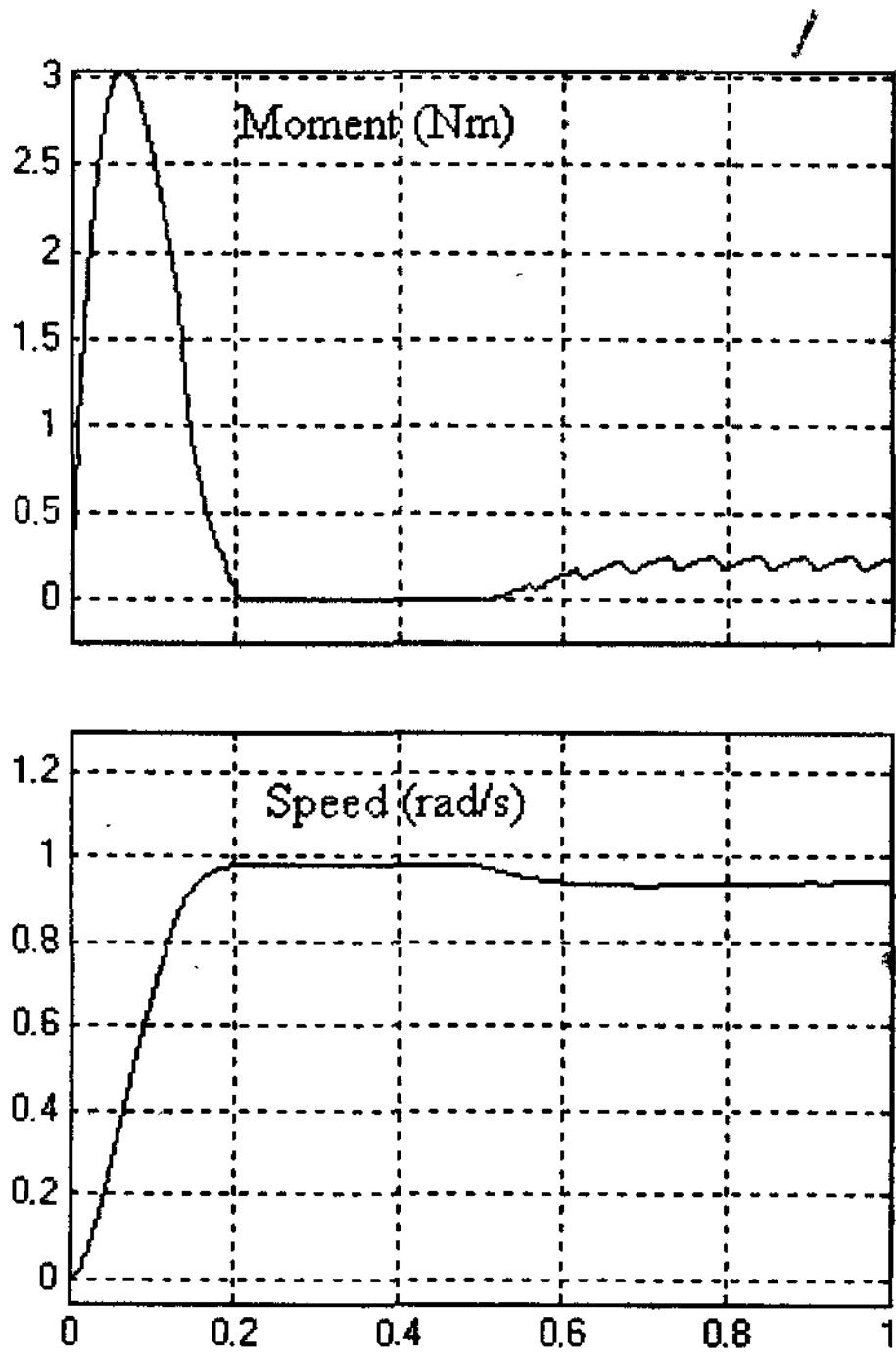


Рис. 9.59. Переходные процессы в замкнутой одноконтурной скоростной системе с БДПТ •

## Практические занятия по теме №4.3.1-2. Программное обеспечение ПЛК

### ВОПРОСЫ

1. Языки программирования ПЛК по стандарту IEC 61131-3.
2. Примеры программирования на языках IEC 61131-3.
3. Инструментальные системы программирования ПЛК.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Профессия, 2009. – 592 с. (352-380).

#### 4.1. Языки программирования ПЛК по стандарту IEC 61131-3

Языки программирования контроллеров описаны в стандарте IEC 61131-3. В нем же описаны текстовые языки IL (Instruction List — Список инструкций) и ST (Structured Text — Структурированный текст), графические языки LD (Ladder Diagram— Язык Диаграмм Лестничной Логики) и LBD (Lunction Block Diagram — Язык Диаграмм Функциональных Блоков), а также язык графических схем SBC (Sequential Lunction Chart — Язык последовательных функциональных схем).

Вопросам программирования контроллеров по стандарту IEC-61131-3 посвящены работы [4.1-4.7].

##### 4.1.1 Объекты адресации языков программирования ПЛК

Основные объекты адресации языков программирования ПЛК представляют собой либо биты, соответствующие дискретным логическим переменным, либо слова того или иного формата, соответствующие числовым данным.

*Объекты-биты* имеющие длину, соответствующую одному разряду, принимают значения 0 или 1 и соответствуют либо дискретным сигналам ввода/вывода, либо результатам выполнения тех или иных логических операций (0 соответствует понятию «ложь» — false, 1 — понятию «истина» — true).

- ◆ *Биты ввода/вывода.* Биты являются логическим отображением электрического состояния ввода/вывода. Биты хранятся в памяти данных и обновляются в цикле при каждом сканировании задачи, в которой они сконфигурированы.
- ◆ *Внутренние биты.* Внутренние биты %Mi используются для хранения промежуточных состояний во время выполнения программы.
- ◆ *Системные биты.* Системные биты с %S0 до %SI2 7 следят за корректностью операций ПЛК в процессе работы программы приложения.
- ◆ *Биты функциональных блоков.* Биты функциональных блоков соответствуют выходам специальных программных блоков, разработанных программистом. Эти выходы могут быть подсоединенными непосредственно (физически), либо использоваться как объекты.
- ◆ *Биты, выделяемые из слова.* Используя программное обеспечение, можно выделять один из 16 битов из объекта типа «слово» (word).
- ◆ *Объекты-слова* имеют различную длину и позволяют описывать числовые данные.  
*Байт.* Формат длиной 8 бит используется для операций над символьными строками.
- ◆ *Слово одинарной длины.* 16-битные слова могут содержать алгебраическую величину в диапазоне от -32 768 до 32 767.
- ◆ *Слово двойной длины.* 32-битные слова могут содержать алгебраическую величину в диапазоне от -2 147 483 648 до 2 147 483 647. Эти слова хранятся в памяти в виде двух последовательных слов одинарной длины.

- ◆ Слова с плавающей точкой используются при выполнении некоторых математических операций.

Адресация переменной величины в стандарте IEC 61131-3 осуществляется следующим образом. Сначала записывается символ стандарта %, затем тип объекта (I — ввод, Q — вывод), затем формат объекта (бит или слово), адрес (номер корзины, номер модуля, номер канала — для величин ввода/вывода или номер регистра для внутренних переменных ПЛК).

Формат адресации величины, вводимой или выводимой из ПЛК, представлен в табл. 4.1 (а), внутренней переменной ПЛК — в табл. 4.1 (б).

**Таблица 4.1а**

%	I или Q	X, W или B	x	y	i
Символ IEC	I — вход Q — выход	X — бит W — слово D — двойное слово	Номер корзины	Номер модуля	Номер канала

**Таблица 4.1б**

%	M, K или S	X, B, W, D или F	i
Символ IEC	M — внутренний K — константа S — системный	X — бит B — байт W — слово D — двойное слово F — слово с плавающей точкой	Адрес (номер ячейки памяти)

#### 4.1.2 Язык Ladder Diagram (LD)

Язык LD представляет собой графическую интерпретацию процесса разработки релейно-контактных схем. В настоящее время язык LD является одним из наиболее распространенных языков программирования ПЛК. Этот язык наиболее удобен для программирования небольших задач дискретной логики, поэтому многие компактные контроллеры имеют язык LD в качестве основного языка для разработки программ управления.

Программы, написанные на языке LD, состоят из ступеней, которые выполняются ПЛК последовательно, слева направо. Ступень состоит из набора графических элементов (ячеек), ограниченных слева и справа условными шинами питания.

Набор графических элементов языка LD включает:

- ◆ входы/выходы ПЛК (кнопки, контакты реле, конечные выключатели, сигналы датчиков, индикаторные лампы и т. д.);
- ◆ стандартные управляющие системные функции (таймеры, счетчики и т. д.);
- ◆ арифметические, логические и специальные операции;

внутренние переменные ПЛК.

Дискретные входы ПЛК и результаты выполнения логических операций представляются в виде условных контактов реле, нормально разомкнутых (замыкаются при появлении сигнала на соответствующем входе или истинности поставленного в соответствие данному контакту логического выражения) и нормально замкнутых (с логикой работы, обратной предыдущей).

Дискретные выходы ПЛК или результаты выполнения данной ступени представляются в виде обмотки реле, питание на которой появляется после прохождения сигнала от левой условной шины питания через все находящиеся на ступени элементы. Левая шина соответствует исходному питанию схемы, правая - выходу схемы, сигнал в котором появляется после замыкания всех контактов и выполнения всех логических условий.

Графические элементы языка LD можно условно разделить на базовые элементы, функциональные и операционные блоки. Каждый базовый элемент занимает одну ячейку (одну колонку в одной строке). Блоки могут занимать несколько ячеек.

Базовые блоки языка LD приведены в табл. 4.2.

Ступень содержит до 7-ми строк и до 11 -ти колонок, разделенных на две зоны — проверочную зону и зону действий. Каждая ступень может быть снабжена меткой и комментарием. Метки могут быть использованы для идентификации ступени внутри программного объекта (головной

программы, подпрограммы и т. д.), но не являются обязательными. Метки имеют синтаксис %Li (где i от 0 до 999) и располагаются в левом верхнем углу перед шиной питания. Каждая метка может присваиваться только одной ступени в пределах данного программного объекта. Система сканирует ступени в том порядке, как они были введены, независимо от порядка нумерации меток.

В состав ступени может быть введен комментарий, содержащий до 222 алфавитно-цифровых символов и обрамленный с обоих концов символами (\* и \*), что упрощает интерпретацию ступени. Введение комментария не является обязательным. Комментарий запоминается в ПЛК и в любой момент может быть вызван пользователем. Следует учитывать, что комментарии используют память программ.

Ступень изображается в форме, похожей на релейные диаграммы. Простейшие проверочные элементы и элементы действия занимают одну строку и одну колонку ступени. Все линии контактов начинаются от левой шины питания и должны заканчиваться на правой шине питания (правая шина питания может не показываться). Проверочные операции всегда располагаются в колонках с 1 по 10. Операции действия всегда располагаются в колонке 11. Предполагается, что между шинами питания протекает ток, который имеет следующее направление:

- ◆ по горизонтальным связям — слева направо;
- ◆ по вертикальным связям — в обоих направлениях.

Проверочная зона содержит контакты, которые могут быть помечены любым ранее определенным битовым объектом, функциональные блоки и блоки сравнения.

Зона действий содержит:

- ◆ прямые, инверсные, фиксирующие и инверсно-фиксирующие обмотки, которые могут быть помечены любым битовым объектом;
- ◆ операционные блоки;
- ◆ другие «обмотки» (Call, Jump, Halt, Return).

На одной линии возможно до 10-ти контактов. В одной колонке максимально может проверяться параллельно до 7-ми контактов. До 7-ми обмоток могут быть включены параллельно. Ступень может быть разделена на несколько независимых линий контактов, причем каждая линия управляет независимой обмоткой.

**Таблица 4.2. Базовые элементы языка LD**

Наименование		Символ	Функция
Элементы условий	Нормально открытый контакт		Контакт замкнут, когда битовая переменная, которая управляет им, принимает значение 1
	Нормально закрытый контакт		Контакт замкнут, когда битовая переменная, которая управляет им, равна 0
	Контакты, срабатывающие по перепаду		Возрастающий перепад: контакт замкнут, когда битовая переменная, которая управляет им, изменяется с 0 до 1
			Убывающий перепад: контакт замкнут, когда битовая переменная, которая управляет им, изменяется с 1 до 0
Элементы действия	Прямая обмотка		Устанавливает соответствующий битовый объект в значение, равное результату, полученному в проверочной зоне
	Обратная обмотка		Устанавливает соответствующий битовый объект в значение, равное инверсии от результата, полученного в проверочной зоне
	Устанавливающая обмотка		Устанавливает соответствующий битовый объект в 1, когда результат, полученный в проверочной зоне, равен 0
	Сбрасывающая обмотка		Сбрасывает соответствующий битовый объект в 0, если результат, полученный в проверочной зоне, равен 1
	Условный переход к другой ступени		Обеспечивает соединение с помеченной строкой, причем последняя может быть расположена до или после текущей ступени
	Возврат из подпрограммы		Зарезервировано для подпрограмм SR, позволяет возвращаться в вызывающий модуль, когда результат, полученный в проверочной зоне, равен 1
	Останов программы		Останов выполнения программы, когда результат, полученный в проверочной зоне, равен 1
Проверочные элементы	Блоки: таймер; счетчик; одновибратор; регистр; контроллер барабана		Каждый из блоков стандартной функции использует входы/выходы, через которые обеспечиваются связи с другими графическими элементами
	Вертикальный блок сравнения		Позволяет сравнивать два операнда. В зависимости от результата соответствующий вход принимает значение равное 1. Размер: 2 колонки/4 строки
	Горизонтальный блок сравнения «Compare»		Позволяет сравнивать 2 операнда. Выход принимает значение равное 1, если при сравнении получен истинный результат. (Блок может содержать до 4096 символов). Размер: 2 колонки/1 строка
Элемент действия	Операционный блок «Operate»		Выполняет арифметические, логические и другие операции. Использует синтаксис языка структурированного текста. (Блок может содержать до 4096 символов). Размер: 4 колонки/1 строка

Операционные блоки всегда расположены в зоне действий. Внутри блока записывается фраза на языке ST. Операционный блок должен быть присоединен непосредственно к правой шине питания.

Ступени исполняются последовательно друг за другом. Каждая ступень исполняется слева направо. В тех случаях, когда встречается вертикальная связь, выполняется подступень, соответствующая этой связи, и только после этого возобновляется исполнение оставшейся части ступени.

#### 4.1.3 Язык Instruction List (IL)

Язык Instruction List (IL) в наборе стандартных языков — это унификация интерфейса языка программирования низкого уровня, неориентированного на какую-либо микропроцессорную архитектуру. У языка IL есть очень важное качество: на его основе можно создавать оптимальные по быстродействию программные единицы.

Программа, написанная на языке IL, состоит из набора инструкций, выполняемых ПЛК последовательно. Каждая инструкция состоит из кода инструкций и операнда. Пример инструкции: LD %I. O, где LD — код инструкции, %I1.0 — операнд.

Инструкции активизируют:

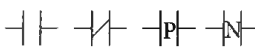

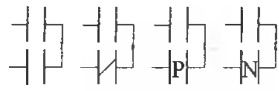
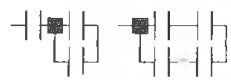
- входы/выходы ПЛК;
- стандартные системные управляющие функции (таймеры, счетчики и т. д.);
- арифметические и логические операции и операции пересылки;
- внутренние переменные ПЛК.

Существуют два типа инструкций:

- проверочные инструкции, которые содержат условия необходимые для того, чтобы выполнилось действие, например: LD, AND, OR и т. д.;
- инструкции действия, следующее за проверочной последовательностью, например: ST, STN, R и др.

Список некоторых базовых инструкций языка IL приведен в табл. 4.3.

**Таблица 4.3. Базовые инструкции языка IL**

Наименование	Инструкции	Эквивалентные функции LD
1	2	3
Проверочные инструкции	LD, LDN, LDR, LDF	
	AND, ANDN, ANDR, ANDF	
	OR, ORN, ORR, ORF	
	AND, OR (8 уровней вложения)	
	MPS MRD MPP	

1	2	3
Инструкции действия	ST, STN, S, R	-( )- -( / )- -( S )- -( R )-
	JMP, JMPC, JMPCN	Используется для перехода (безусловного, условного при булевском результате равном 1 или условного при булевском результате равном 0) на помеченную инструкцию, которая может быть расположена в списке инструкций, как перед текущей инструкцией, так и после нее
	SRn	Используется для перехода к началу подпрограммы.
	RET, RETC, RETCN	Возврат из подпрограммы (безусловный, условный при булевском результате, равном 1, условный при булевском результате, равном 0)
	END, ENDC, ENDCN	Конец программы (безусловный, условный при булевском результате, равном 1, условный при булевском результате, равном 0)
	HALT	Выполнение программы останавливается
Проверочные элементы	Блоки: таймер; счетчик; одновибратор; регистр; контроллер барабана	Существуют инструкции для управления каждым из стандартных функциональных блоков. Для активизации вводов/выводов функциональных блоков используется специальная структурная форма
	LD[.....] AND[.....] OR[.....] Пример: LD[%MW10<1000]	Используются для сравнения двух операндов. Выход становится равным 1, если при выполнении проверочной операции получаем истинный результат.  Результат равен 1, если содержимое ячейки памяти для переменной MW10 меньше 1000
Элементы действия	[.....]  Пример: [%MW10:=%MW0+100]	Элементы выполняют логические, арифметические и другие операции. Используется синтаксис языка ST.  К содержимому ячейки памяти для переменной MW0 прибавляется 100; полученная сумма размещена в ячейке памяти внутренней переменной MW10

Программой является последовательность инструкций. Каждая последовательность должна содержать одну или несколько проверочных инструкций. Результаты проверочных инструкций используются в одной или нескольких инструкциях действия. Каждая инструкция занимает одну строку. Последовательность инструкций начинается с восклицательного знака (формируется автоматически). Восклицательный знак может включать комментарий и может быть идентифицирован меткой.

Пример:

```
!           (*waiting for drying*)
%L2:
LD         %I0.1
AND       %M10
ST        %Q2.5
```

Комментарий может быть расположен в начале последовательности инструкций. Он может занимать до 3-х строк (222 алфавитно-цифровых символов) и должен быть обрамлен символами (\*...\*).

Метки используются для идентификации последовательности инструкций в программном объекте (в основной программе, в подпрограмме и т. д.), но не являются обязательными. Метка имеет следующий синтаксис: %Li (где i — от 0 до 999), и располагается в начале последовательности инструкций. Метка может быть назначена один раз для единственной последовательности инструкций в данном программном объекте.

Последовательность всегда должна быть помечена для обеспечения соответствующих связей при программном переходе. Система сканирует последовательность инструкций в том порядке, как они были введены независимо от значений чисел, используемых при формировании меток.

Последовательность выполнения инструкций может быть изменена с помощью скобок. Правила выполнения языка инструкций:

- ◆ За каждой открывающей круглой скобкой должна последовать закрывающая скобка. Открывающая скобка ставится в инструкции после операции. Инструкции, заключенные в скобки, выполняются в первую очередь.
- ◆ Метки *%Li* не должны располагаться в выражении между круглыми скобками. Это правило справедливо также для инструкций перехода — JMP, и инструкций вызова подпрограмм — SRi.
- ◆ Инструкции ST, STN, S и R не могут быть запрограммированы между круглыми скобками. Существуют три типа инструкций, которые используются для обработки содержимого ячеек в особом порядке. Они используют буфер в виде стека, который способен запоминать вплоть до трех битов булевских данных.
- ◆ Инструкция MPS (*Memory PuSh*) запоминает на вершине стека последний результат проверочной инструкции и сдвигает другие данные в направлении дна стека.
- ◆ Инструкция MRD (*Memory ReaD*) считывает содержимое вершины стека.
- ◆ Инструкция MPP (*Memory PoP*) считывает вершину стека и сдвигает другие данные в нем в направлении вершины стека.

Программы списка инструкций выполняются последовательно — инструкция за инструкцией. Первой инструкцией обязательно должна быть либо оператор LD («загрузить значение операнда в буфер»), либо безусловная инструкция перехода (например, JMP). Все инструкции (за исключением LD и безусловных инструкций перехода) используют булевский результат предыдущей инструкции.

Пример:

LD **%1.1** Булевский результат = состоянию бита **%1.1**

AND %M0 Булевский результат = AND предыдущего булевского результата и состояния бита %M0.

OR %M10 Булевский результат = OR предыдущего булевского результата и состояния бита %M10.

ST %Q2.0 бит %Q2.0 принимает состояние предыдущего

булевского результата. Оператор ST означает «присвоить значение буфера операнду»

#### 4.1.2 Язык Structured Text (ST)

Язык Structured Text (ST) относится к классу текстовых языков высокого уровня. Язык структурированного текста является основным для программирования последовательных шагов и транзакций языка SFC. Кроме этого, он имеет «выходы» во все остальные языки, что делает его универсальным в применении разными категориями пользователей. Язык ST используется для создания программ путем записи строк программ, состоящих из алфавитно-цифровых символов.

Основными инструкциями языка ST являются:

- ◆ битовые инструкции;
- ◆ арифметические и логические инструкции для слов и двойных слов;
- ◆ арифметические инструкции для чисел с плавающей точкой;
- ◆ инструкции числового сравнения слов, двойных слов и чисел с плавающей точкой;
- ◆ числовые преобразования;
- ◆ инструкции для таблиц, заполненных битами, словами, двойными словами и числами с плавающей точкой;
- ◆ инструкции для строк из символов;
- ◆ инструкции для алфавитно-цифрового сравнения;
- ◆ инструкции для управления временем;
- ◆ инструкции для управления программой (программные инструкции);
- ◆ инструкции для управления ходом выполнения программы (управляющие инструкции);

- ◆ инструкции для стандартных функциональных типов;
  - ◆ инструкции предметной области (связь, ПИД-регулирование и др.).
- Некоторые команды языка ST приведены в табл. 4.4.

**Таблица 4.4. Основные команды языка ST**

Изображение	Функция
Битовые инструкции	
:=	Битовое присвоение
OR	Булевское ИЛИ
AND	Булевское И
XOR	Булевское ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ
NOT	Инверсия
RE	Возрастающий фронт
FE	Убывающий фронт
SET	Установка в 1
RESET	Сброс в 0
Числовое сравнение для слов, двойных слов и чисел с плавающей точкой	
<	Строго меньше чем
>	Строго больше чем
<=	Меньше или равно
>=	Больше или равно
=	Равно
<>	Не равно (отлично от)
Целочисленная арифметика над словами и двойными словами	
+, -, *, /	Сложение, вычитание, умножение, целочисленное деление
REM	Остаток от целочисленного деления
SQRT	Целочисленный квадратный корень
ABS	Абсолютное значение
INC	Приращение на единицу
DEC	Уменьшение на единицу

Программы на языке ST составляются из выражений. Каждое выражение языка состоит из метки, комментариев и инструкций. Каждый из этих элементов может отсутствовать. Каждое выражение начинается с восклицательного знака (может порождаться автоматически).

Пример:

```
! %L2: (* Предложение с меткой, комментариями *)
SET %%M0; %MW4 := %MW 2 + %MW9;
(* и различными инструкциями *)
%MF12:= SQRT (%MF14);
```

В комментарии может быть использован любой символ (не более 256 символов). Комментарий занимает несколько строк и доступен пользователю в любой момент времени.

Метка используется для отсылки к выражению в программной единице (в головной программе, в подпрограмме и т. д.), но не является обязательной. Метка располагается в начале выражения и имеет следующий синтаксис: %Li, где i — целое число от 0 до 999. В пределах программной единицы (подпрограмма, головная программа, программный модуль) конкретная метка может быть употреблена для единственного выражения. Отсылка к выражению может быть сделана с любого места программы с помощью инструкции безусловного перехода.

Выражение на языке ST может содержать несколько инструкций, при этом каждая инструкция должна заканчиваться символом ';'.

В языке ST имеется четыре управляющие структуры:

- ◆ условное действие IF;
- ◆ условные итеративные действия WHILE и REPEAT;
- ◆ повторяющееся действие FOR.

Каждая управляющая структура обрамляется ключевыми словами. Допускается вложение управляющих структур независимо от их типа. Управляющие структуры могут предшествовать или следовать за любой инструкцией.

#### **Условное действие IF...END\_IF**

Простейшая форма (инструкция выполняет действие, если условие истинно).

Синтаксис	Функционирование
<p>IF условие THEN действие; END_IF;</p>	

Общая форма

Синтаксис	Функционирование
<p>IF условие 1 THEN действие 1; ELSIF условие 2 THEN действие 2; ELSE действие 3; END_IF;</p>	

Условное итеративное действие WHILE...END\_WHILE

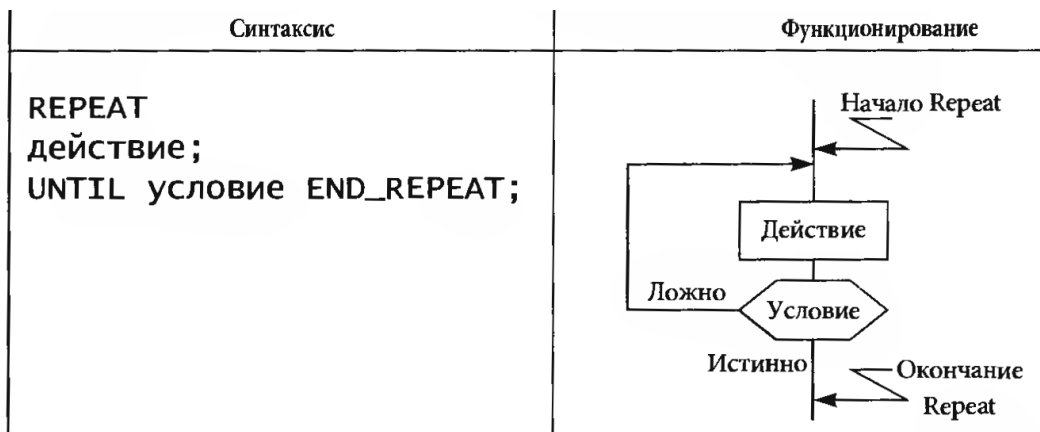
Инструкция выполняет повторно действие, пока условие истинно.

Синтаксис	Функционирование
<p>WHILE условие DO действие; END_WHILE;</p>	

Условие проверяется до выполнения действия. Если при первой проверке условие ложно, то действие не выполняется. Если условие истинно, то инструкция выполняет действие повторно

**Условное итеративное действие REPEAT...END\_REPEAT**

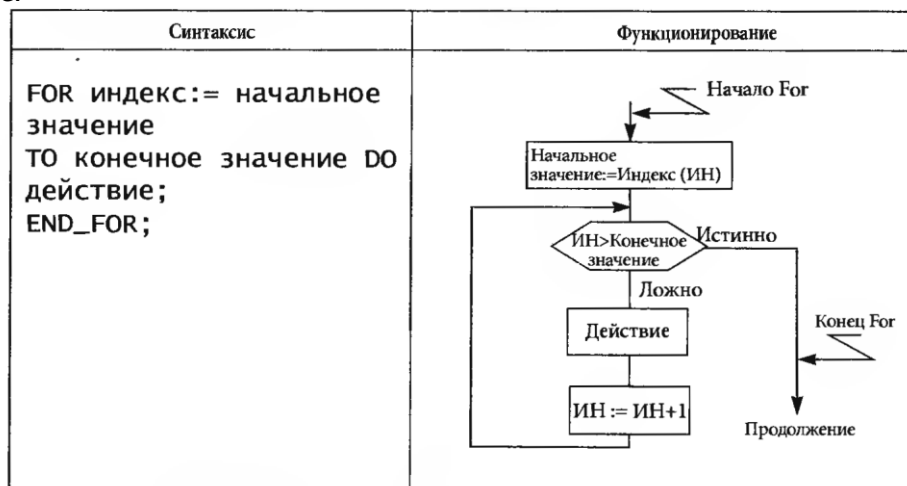
Инструкция выполняет повторно действие, пока условие истинно.



Инструкция повторяет действие до момента, пока условие не станет истинно. Условие проверяется после выполнения действия. Если при первой проверке условие ложно, то действие выполняется еще один раз.

Повторяющееся действие **FOR...END\_FOR**

Инструкция выполняет обработку операции определенное число раз, увеличивая индекс на 1 в каждом цикле.



Когда индекс строго больше конечного значения, выполнение программы продолжается с инструкции, следующей за ключевым словом **END\_FOR**.

Индекс увеличивается автоматически, без участия пользователя.

Выход из цикла посредством инструкции **EXIT**.

Ключевое слово **EXIT** используется для остановки вычислений в цикле и продолжении с инструкции следующей за ключевым словом конца цикла. Слово может быть использовано только внутри одного из трех циклов: **WHILE**, **REPEAT** или **FOR**.

Программа на языке **ST** выполняется последовательно (инструкция за инструкцией) относительно управляющих структур. В случае арифметических или булевых выражений, состоящих из различных операторов, правила приоритета определены между разными операторами.

Пример:

`NOT %MW3 * 25 AND %MW10 + %MW12`

В этом примере выполняется **NOT** перед **%MW3**, затем результат умножается на 25. Вычисляется сумма **%MW10** и **%MW12**, затем логическое **AND** вычисляется между результатами умножения и сложения.

Когда есть конфликт между двумя операторами одного и того же приоритета, первый оператор берет приоритет операций (оценка выполняется слева направо).

Пример:

`%MW34 * 2 REM 6`

В этом примере **%MW34** сначала умножается на 2, затем результат используется в вычислении модуля.

Круглые скобки меняют порядок выполнения операций. В следующем примере сложение имеет более высокий приоритет, чем умножение.

Пример:

$(\%MW10 + \%MW11) * \%MW12$

Круглые скобки могут быть вложены; число уровней вложения не ограничивается. Круглые скобки также используются для избежания некорректной интерпретации программы.

Пример:

NOT **%Ш2** o  $\%MW4 + \%MW6$

При помощи оператора управления приоритетом, получена следующая интерпретация:  
 $((NOT \%MW2) < > (\%MW4 + \%MW6))$

### ◆ Язык Sequential Function Chart (SFC)

Основой языка SFC послужила модель «сетей Петри» (разделение системы на множество простых позиций). Окончательно стандарт SFC сформировался на базе стандарта «Grafcet» (стандарт МЭК 848).

Язык последовательных функциональных схем (Sequential Function Charts, или Grafcet) позволяет формулировать логику программы на основе чередующихся процедурных шагов и транзакций (условных переходов), а также описывать последовательно-параллельные задачи в понятной и наглядной форме.

Строго говоря, SFC не является языком программирования. Это средство проектирования прикладного программного обеспечения, которое всегда является комплексом большого числа программных единиц: программ, функциональных блоков и функций. Обеспечение параллельности выполнения программ, установление и контроль состояния процессов, обеспечение синхронизации по приему и обработке данных, описание однозначно понимаемых и заказчиком, и исполнителем состояний автоматизируемого процесса — все это возможно при использовании SFC. Однако SFC не имеет средств для описания шагов и переходов, которые могут быть выражены только средствами других языков стандарта IEC. Структура языка SFC представлена на рис. 4.1.

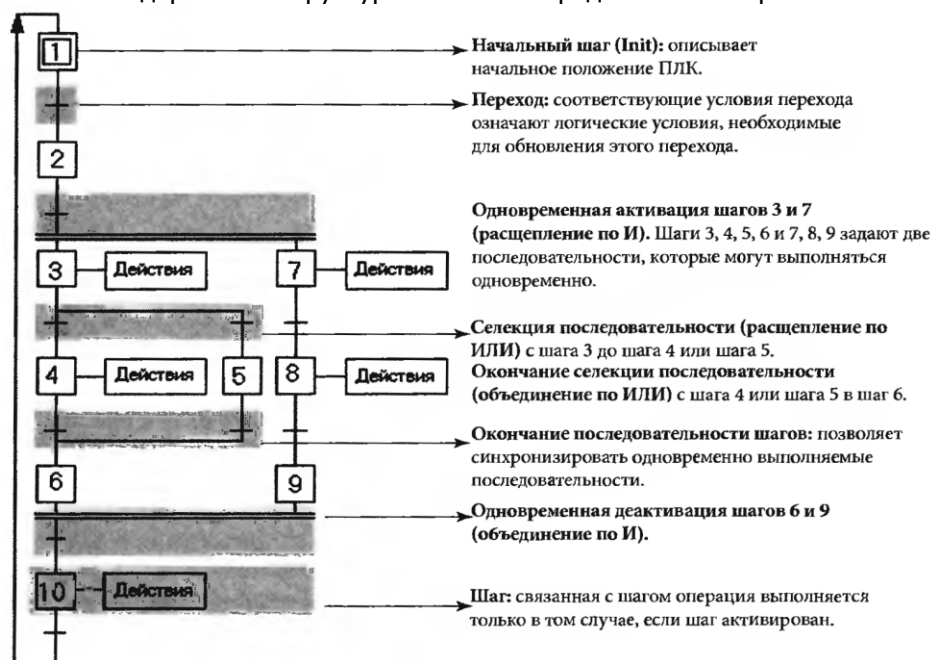


Рис. 4.1

Графическое описание последовательных операций управляющих систем, а также различных встречающихся ситуаций, выполняется с использованием простейших графических символов.

Операции, связанные с шагами, обозначаются в общей форме типа «что должно быть сделано», когда шаги активированы. В частности, они описывают порядок, по которому они должны быть посланы в приложение (автоматизированный процесс) или в другие автоматизированные системы. Последовательность активизированных шагов в любой заданный момент времени определяет ситуацию в диаграмме языка SFC. Шаги обозначаются в виде прямоугольников.

Переходы и директивные (командные) связи представляются в символической форме возможных продвижений активированных шагов. Переходы между шагами всегда определяются тем или иным условием.

### Основные правила составления SFC- диаграммы:

- ◆ первая строка используется для входов соединителей-источников;

- ◆ последняя строка используется для входов соединителей-приемников. Назначение соединителей состоит в обеспечении непрерывности диаграмм в случаях, когда направленные линии связи либо на одной странице, либо между двумя соответствующими страницами — не могут быть обозначены. Эта непрерывность обеспечивается соединителем-приемником, который всегда имеет соответствующий соединитель-источник. На диаграмме с использованием соединителей могут быть обозначены циклические возвраты. Последовательность может быть возобновлена с использованием соединителей. Соединители используются также в случаях, когда ветвь является более длинной, чем размер страницы.
- ◆ Четные строки (с 2 по 12) содержат символы шагов и соединителей-приемников
- ◆ Нечетные строки (с 3 по 13) содержат символы переходов и соединителей-источников.
- ◆ Каждый шаг нумеруется (с 0 по 127) в любом порядке.
- ◆ На одной странице может быть размещено несколько диаграмм.
- ◆ Количество переходов в верхней части конца выбора последовательности (объединение по ИЛИ) или нижней части начала выбора последовательности (разделение по ИЛИ) не должно превышать 11.
- ◆ Выбор последовательности может быть ориентирован слева направо.
- ◆ Количество шагов в нижней части одновременной активации (объединение по И) или в верхней части одновременной деактивации (разделение по И) не должно превышать 11.
- ◆ Одновременная активация всегда представлена слева направо.
- ◆ Одновременная деактивация всегда представлена справа налево.

Макрошаг предназначен для представления последовательности  $i$  лагов в виде одного графического элемента. Его отличительным знаком являются две горизонтальные черты на графическом элементе. Входной шаг подчиняется тем же правилам, что и остальные шаги, выходной шаг не может иметь какого-либо связанного с ним действия.

Каждый шаг связан с действиями, которые могут быть запрограммированы на языках LD, IL или ST. Эти действия сканируются только в том случае, если шаг, с которым они связаны, является активным. Единичное действие может содержать несколько программных элементов (последовательностей, выражений или циклов).

Каждый переход имеет связанные с ним условия, которые могут программироваться на языках LD, IL или ST. Условия перехода сканируются только тогда, когда переход, с которым они связаны, разрешен. Условия перехода соответствуют ступеням, списку инструкций или выражению структурированного текста, составляющих последовательность проверок бит или/и слов. Если условия перехода не запрограммированы, то предполагается, что условия перехода ложны (false). Основные графические элементы языка SFC приведены в табл. 4.5

**Таблица 4.5. Графические элементы языка SFC**

Обозначение	Символ	Функции
Начальные шаги		Обозначает начальные шаги, которые активируются после запуска цикла инициализации или холодного перезапуска
Одиночные шаги		Обозначает, что система управления находится в устойчивом состоянии. Все конфигурированные шаги в пределах максимального количества могут быть активизированы одновременно
Макрошаги		Обозначает макрошаг: определенную последовательность шагов и переходов
Шаги макрошага		Обозначает шаги макрошага. Допускается один IN и один OUT шаг для каждого макрошага
Переходы		Используется для перехода от одного шага к другому. Логические условия, связанные с данным переходом, определяют условия, необходимые для начальной установки (обнуление) данного перехода.
Разветвление по И		Переход от одного шага к нескольким. Допускается активация максимально N шагов одновременно
Разветвление по ИЛИ		Переход от одного шага к нескольким шагам. Используется для выполнения выбирающей последовательности максимально к N шагам
Соединитель источника		«n» — это номер шага, от которого принимается управление (шаг источника)
Соединитель приемника		«n» — это номер шага, куда передается управление (шаг приемника)

Основные достоинства языка SFC можно определить следующим образом:

- ◆ Высокая выразительность. Язык SFC имеет те же возможности, что и диаграммы состояний, и является наиболее подходящим средством для описания динамических моделей.
- ◆ Графическое представление. Благодаря графической мнемонике SFC максимально прост в использовании и изучении. Вместе с тем он является наглядным средством представления логики на разных уровнях детализации.

Предварительное проектирование ПО. Использование языка SFC на ранних этапах проектирования прикладного ПО позволяет снять многочисленные непонимания между заказчиком, проектировщиком ПО и программистом.

#### ◆ Язык Functional Block Diagram (FBD)

Язык диаграмм функциональных блоков (Function Block Diagram) позволяет создать программную единицу практически любой сложности на основе стандартных функциональных блоков (арифметические, тригонометрические, логические блоки, ПИД регуляторы, блоки, описывающие некоторые законы управления, мультиплексоры и т. д.). Это языковое средство использует технологию инкапсуляции алгоритмов обработки данных и законов регулирования. Программирование сводится к сборке готовых компонентов.

Язык FBD описывает функции преобразования входных переменных контроллера в выходные в виде сочетания элементарных функциональных блоков. Выход функционального блока может быть соединен с входами других блоков. Каждый функциональный блок представляет собой прямоугольник, внутри которого имеется обозначение функции, выполняемой блоком.

Имеются следующие формальные правила языка FBD:

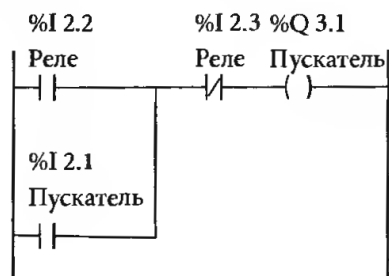
- функциональные блоки могут располагаться произвольно в поле программы;
- не может быть несоединенных входов и выходов функционального блока;
- соединение блоков может выполняться также при помощи ссылок с определенными именами;
- функциональные блоки выполняются слева направо, сверху вниз;
- на входе функционального блока может быть константное выражение, любая внутренняя или входная переменная контроллера;
- на выходе блока может быть любая внутренняя или выходная переменная ПЛК. В табл. 4.6 представлены основные функциональные блоки языка FBD.

Таблица 4.6 Функциональные блоки языка FBD

Наименование	Обозначение	Описание
1. Функции двоичного типа	NOT	Логическое отрицание
	AND	Логическая конъюнкция
	OR	Логическая дизъюнкция
	XOR	Исключающее ИЛИ
	SET	Присвоение переменной единицы
	RESET	Обнуление переменной
2. Функции управления	RETURN	Возврат из подпрограммы
	GOTO	Безусловный переход
	CALL	Вызов подпрограммы
3. Арифметические функции	ADD	Сложение
	SUB	Вычитание
	DIV	Деление
	MUL	Умножение
4. Функции сравнения	=	Равно
	<>	Не равно
	>	Больше
	<	Меньше
	=>	Больше или равно
	<=	Меньше или равно
5. Математические функции	ABS	Модуль
	EXPT	Экспонента
	LOG	Логарифм
	SQRT	Корень
6. Тригонометрические функции	ACOS	Арккосинус
	ASIN	Арксинус
	ATAN	Арктангенс
	COS	Косинус
	SIN	Синус
	TAN	Тангенс

## 4.2. Примеры программирования на языках IEC 61131-3

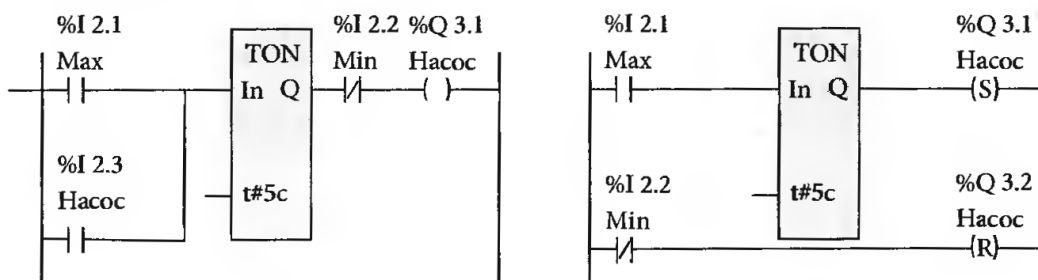
### 4.2.1 Язык Ladder Diagram (LD).



*Пример 1.* Рассмотрим схему включения пускателя с помощью контактов реле.

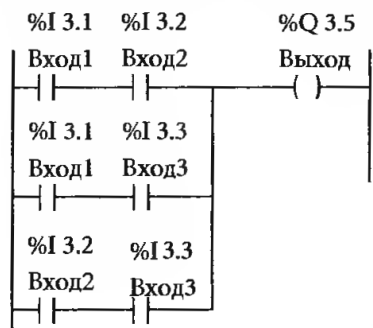
Каждому контакту в языке LD ставится в соответствие логическая переменная TRUE (контакт замкнут) или FALSE (контакт разомкнут). Контакт реле управляет булевым значением. При поступлении 1 по адресу %I 2.2 н.о. контакты реле замыкаются. Результат, полученный в проверочной зоне, устанавливает прямую обмотку (%Q 3.1) в 1.

*Пример 2.* Рассмотрим пример наполнения бака водой. При достижении уровнем воды верхней отметки (Max) сигнализатор верхнего уровня выдает на вход контроллера дискретный сигнал 1. По истечении интервала времени (5 с), необходимого для успокоения уровня жидкости и исключения ложных срабатываний, контроллер должен включить насос для откачки жидкости.



При достижении уровнем нижней отметки (Min) сигнализатор нижнего уровня должен выдать дискретный сигнал для остановки насоса. Если уровень достигнет верхней отметки (Max = 1), насос включится с задержкой 5 с. При достижении уровнем нижней отметки (Min = 1) насос выключится.

Эта же задача может быть запрограммирована с помощью устанавливающей и сбрасывающей обмоток. В следующей программе с приходом сигнала Max битовый объект (насос) устанавливается в 1. С приходом сигнала Min битовый объект (насос) сбрасывается в 0 (насос выключается).



*Пример 3.* Определение достоверности сигнала (голосование 2 из 3-х) [2.1].

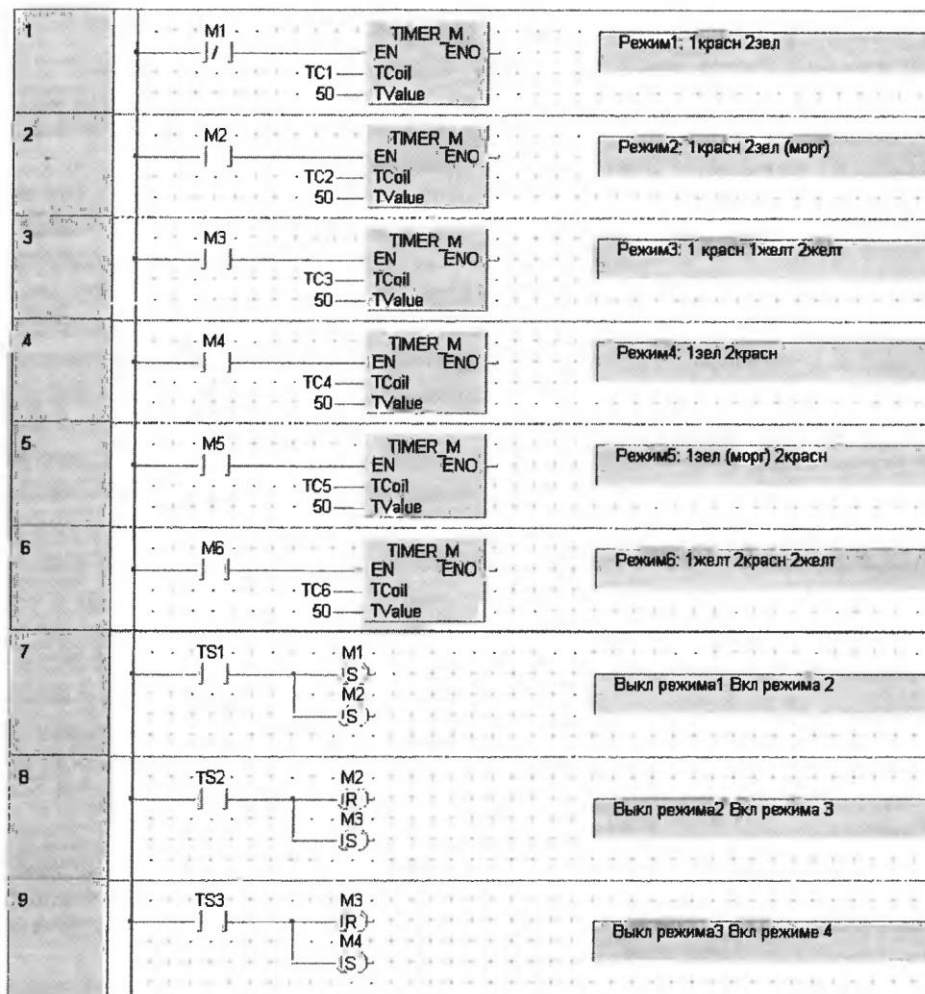
Для повышения достоверности сигнала используется принцип троирования входных (выходных) сигналов.

При совпадении значений 2-х сигналов из 3-х значение двух равных сигналов считается достоверным. Этот метод называется «голосование 2 из 3-х».

На языке LD могут быть запрограммированы логические операции «И», «ИЛИ», «НЕ» и др. Последовательное соединение контактов равнозначно логической операции «И», параллельное «ИЛИ».

Операция «НЕ» реализуется инверсным контактом.

В следующем примере 4 запрограммирована одновременная работа двух светофоров со временем горения каждой из ламп в течении 5 с. В комментариях к про-

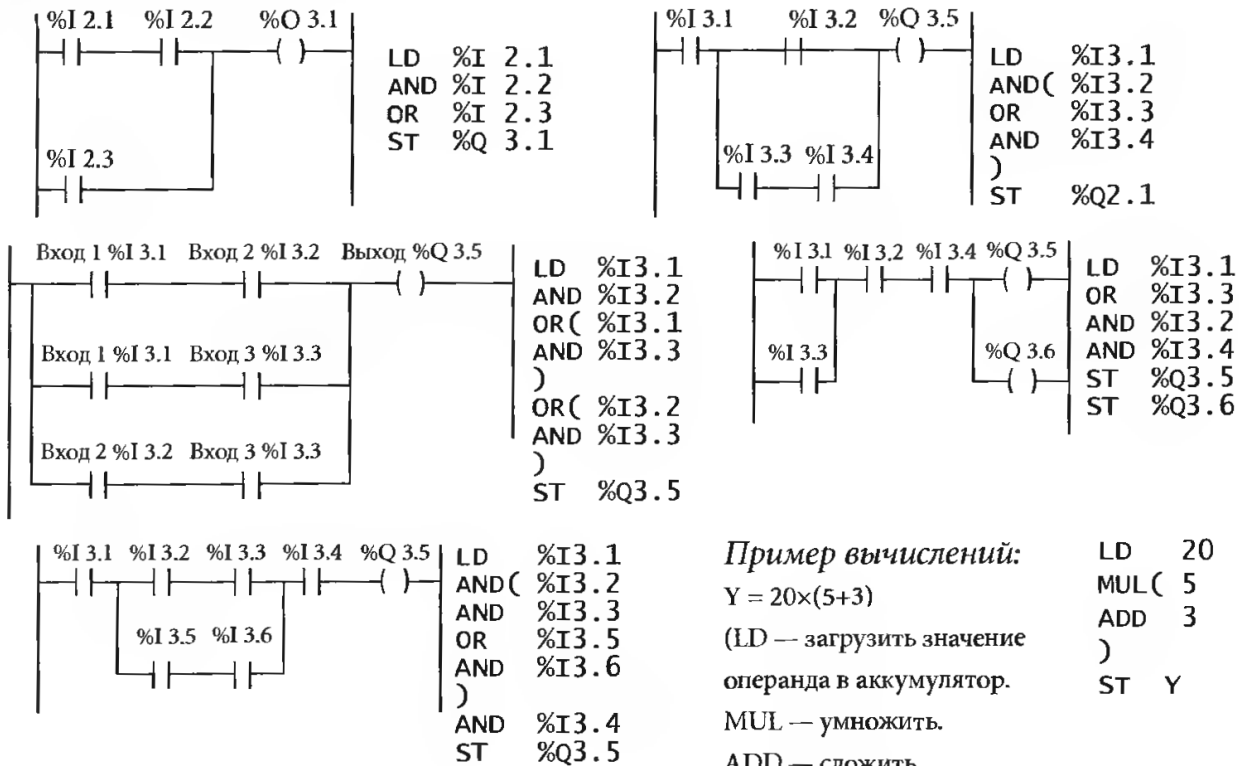


грамме под цифрой 1 подразумевается режим светофора N1, а под цифрой 2 — соответственно режим светофора N2. При подаче питания в течение выдержки времени 5 с, определяемой таймером, горит красная лампа светофора N1 и зеленая лампа светофора N2 (режим 1). Дальнейшие режимы определяют переключение ламп светофора в соответствии с общепринятой идеологией работы светофоров. Время мигания зеленой и желтой ламп формируется таймером и модулем ALT\_M смены состояния мигания.

#### ◆ Язык Instruction List (IL)

Программа на языке IL представляет собой последовательность инструкций (команд). Необходимо помнить, что скобки изменяют порядок выполнения инструкций. Открывающая скобка ставится в инструкции после операции, а закрывающая скобка ставится в отдельной строке. Инструкции, заключенные в скобки, выполняются в первую очередь.

Для большей наглядности ниже приводятся примеры на языке LD и соответствующие им программы на языке IL, состоящие из кодов инструкций и операндов.



**Пример вычислений:**

```

LD 20
MUL ( 5
ADD 3
)
ST Y
    
```

Y = 20 × (5 + 3)

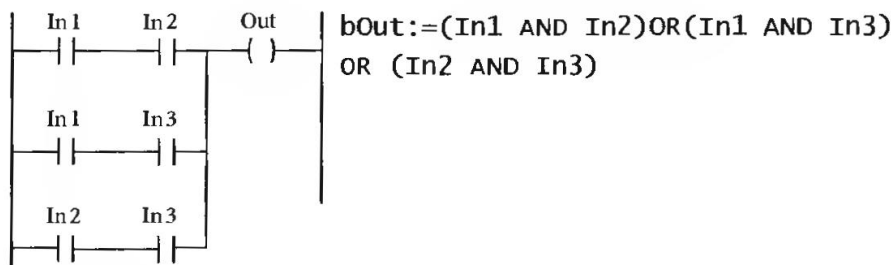
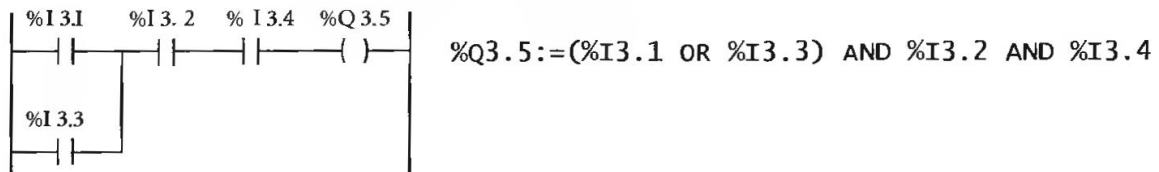
(LD — загрузить значение операнда в аккумулятор. MUL — умножить. ADD — сложить. ST — присвоить значение буфера операнду Y).

#### 4.2.3 Язык Structured Text (ST)

Язык ST является текстовым языком высокого уровня.

Программы на языке ST составляются из выражений. Каждое выражение языка состоит из метки, комментариев и инструкций. Каждый из этих элементов может отсутствовать. К числу инструкций языка ST относятся битовые инструкции, арифметические и логические инструкции для слов и двойных слов, арифметические инструкции для чисел с плавающей точкой и др.

Для большей наглядности ниже приводятся примеры на языке LD и соответствующие им программы на языке ST.



**Примеры выражений на языке ST:**

```
! SET %MW6;
```

(установить в 1 внутреннюю переменную — слово; 6 — адрес ячейки памяти).

```
! %MW4 := %MW2 + %MW9;
```

(присвоить внутренней переменной MW4 результат сложения %MW2 и %MW9). !

```
%MW24 := SQRT(%MF30);
```

(присвоить переменной MW24 значение корня квадратного из величины MF30). Круглые скобки определяют приоритет (первоочередность) действий. (%MW10 + %MW11) \* %MW12; (в первую очередь выполняется сложение, а затем умножение).

### ◆ Язык Sequential Function Chart (SFC)

Язык SFC представляет последовательность шагов и условных переходов (транзакций). В качестве примера рассмотрим программу управления наполнением резервуара водой, ее нагрев до заданной температуры и слив. Функциональная схема приведена ниже.



SFC-диаграмма выполняется, как правило, сверху вниз. Начальный шаг (Init) должен присутствовать обязательно, но может быть пустым. Слева от прямоугольника, обозначающего действие, может указываться классификатор действий: N (Non-Stored) — несохраняемое действие (выполняется при активности шага); S (Stored) — сохраняемое действие; R (Reset) — сброс; L (time Limited) — ограничение во времени и др.

Допускается ветвление (одновременное выполнение действий). Каждая параллельная ветвь должна начинаться и заканчиваться шагом.

Программы списка инструкций выполняются последовательно — инструкция за инструкцией. Первой инструкцией обязательно должен быть либо оператор LD («загрузить значение операнда в буфер»), либо безусловная инструкция перехода (например, ZMP). Все инструкции (за исключением LD и безусловных инструкций перехода) используют булевский результат предыдущей инструкции.

Пример:

- LD %I.1 Булевский результат = состоянию бита %I.1
- AND %M0 Булевский результат = AND предыдущего булевского результата и состояния бита %M0.
- OR %M10 Булевский результат = OR предыдущего булевского результата и состояния бита %M10.
- ST %Q2.0 Бит %Q2.0 принимает состояние предыдущего булевского результата. Оператор ST означает «присвоить значение буфера операнду»

В табл. 4.7 приведены примеры реализации некоторых операций на языке FBD.

Таблица 4.7 Примеры программирования на языке FBD

Выполняемая операция	Изображение	Описание
Обнаружение перепада сигнала In		Двоичная переменная Out примет значение TRUE тогда и только тогда, когда переменная In изменит свое состояние
П-регулятор		Рассогласование между текущим значением величины Val и заданием Ref умножается на коэффициент Km и используется в качестве управляющего воздействия
Ограничение нижнего предела делителя		Переменная Error принимает значение TRUE если Val < Vmin  Программа обеспечивает деление переменной Sampl на значение переменной Val. Переменная делителя Val снизу ограничена значением Vmin

### 4.3. Инструментальные системы программирования ПЛК

#### 4.3.1. Система программирования ISaGRAF фирмы ICS Triplex ISaGRAF, Канада

Система программирования ISaGRAF представляет собой масштабируемую технологию программирования контроллеров, позволяющую создавать приложения как для локальных ПЛК, так и для ПЛК, распределенных по сети [4.2].

Новая версия ISaGRAF 5.0, соответствующая стандартам МЭК 61131-3 и 61499, значительно расширяет возможности системы. Стандарт МЭК 61499 определяет использование функциональных блоков в распределенных процессах контроля и управления. В качестве распределенных устройств выступают ПЛК, микроконтроллеры или интеллектуальные полевые устройства (датчики и исполнительные механизмы).

Система программирования ISaGRAF состоит из двух основных компонентов:

- ◆ системы разработки ISaGRAF Workbench;
- ◆ системы исполнения или целевой системы ISaGRAF Target.

Отличительные особенности системы ISaGRAF;

- ◆ Поддержка всех пяти языков программирования ПЛК по стандарту МЭК 61131-3 (SFC, FBD, LD, ST, IL и дополнительного языка Flow Chart). ISaGRAF позволяет объединить

программы (процедуры), написанные на разных языках программирования, а также вставлять кодовые последовательности из одного языка в кодовые последовательности, написанные на др. языке программирования. Единой средой разработки для различных программно-аппаратных платформ служит ISaGRAF Workbench.

- ◆ Наличие мощного отладчика, позволяющего во время работы прикладной программы контролировать значения всех переменных, кодовые последовательности.
- ◆ Поддержка протоколов Modbus RTU/TCP, CAN, Profibus, обмен данными между ПЛК по сети Ethernet (протокол TCP/IP).
- ◆ Открытость системы и возможность установки ISaGRAF-ядра на любую программно-аппаратную платформу с любыми интерфейсами ввода/вывода, сетевыми интерфейсами и функциональными блоками, программируемыми на языках «С».
- ◆ Возможность разработки драйверов для модулей ввода/вывода пользователями. Для реализации драйверов под ISaGRAF необходим программный пакет ISaGRAF I/O Development Tool. К пакету прилагается документация на русском языке, объектные и исполняемые файлы целевой системы, утилиты и библиотеки для разработки драйверов.
- ◆ Наличие библиотеки готовых драйверов для работы с устройствами ввода/вывода многих фирм-производителей (PEP Modular Computer, ABB, Motorola, Weidmuller, Industrial Computer Source, ЗЭИМ, ГК Текон и др.).
- ◆ Подсветка синтаксиса различным цветом в редакторах языков ST и IL.
- ◆ Наличие системы паролей для защиты системы ISaGRAF от несанкционированного доступа.

Система разработки ISaGRAF Workbench устанавливается на PC-совместимом ПК под управлением ОС Windows NT. Система исполнения ISaGRAF Target включает в себя ядро ISaGRAF и набор драйверов Modbus RTU/TCP Master/Slave, а также набор модулей ввода/вывода для выбранной платформы. Система в зависимости от версии работает также под управлением других ОС, в том числе Windows 2000/XP, MS-DOS, Linux, OS-9, QNX, VxWorks, MiniOS7. Возможна работа системы ISaGRAF без ОС.

После создания приложения в ISaGRAF Workbench происходит компиляция проекта с генерированием машиннезависимого TIC-кода (Target Independent Code). Затем происходит загрузка TIC-кода приложения в целевую систему ISaGRAF Target, содержащую TIC-интерпретатор (для генерирования «С»-исполняемых файлов требуется «С»-компилятор). На одном физическом ПЛК может быть создано неограниченное число ресурсов («виртуальных» ПЛК). Для каждого ресурса декларируются переменные 3-х типов; внутренние, входы и выходы. Это переменные простого типа (Boolean, Integer, Real, String, Timer), массивы и структуры. Переменные могут быть связаны с локальными устройствами ввода/вывода или с устройствами, распределенными по сети. При этом одна и та же программа может выполняться на различных ПЛК с различными ОС и различными устройствами ввода/вывода.

Связь ISaGRAF со SCADA-системами осуществляется через OPC-сервер. Компания «ФИОРД», которая является официальным представителем компании *ICS Triplex ISaGRAF* в России и Белоруссии, поставляет «Стартовый Пакет Разработчика». Пакет представляет собой полностью русифицированное ПО для различных уровней автоматизации с полным комплектом документации и технической поддержкой проектов. В состав пакета входят приложения ISaGRAF Target, ISaGRAF Workbench, SCADA PcVue HMI Station (SCADA-система с набором драйверов для различных УСО), ISa Vue Utilities (разработка компании ФИОРД), документация Getting Started Manual (русифицированное описание продуктов ISaGRAF и PcVue) и ISaGRAF OPC Server. Дополнительно могут быть предоставлены следующие приложения: ISaGRAF Archive (система ведения архива в контроллерах), ISaGRAF I/O Development Tool, ISaGRAF драйверы с поддержкой сетевых протоколов CAN и Profibus и Plant Vue OPC Client Development License (автономная система класса SCADA для разработки систем сбора данных и управления верхнего уровня). Plant Vue является OPC-клиентом и поддерживает архивацию переменных в БД, работу с трендами и алармами.

Компания «Науцилус» предлагает систему ISaGRAF для ОС QNX, Linux и ПЛК МФК и ТКМ52 ГК «Текон». Компания реализовала связь ISaGRAF по сети Ethernet со SCADA-системами Real Flex, Sitex, Wizcon и iFIX на базе разработанного OPC-сервера. При этом SCADA-системы Real Flex и Sitex работают под управлением ОС QNX, а Wizcon и iFIX — Windows NT.

Система ISaGRAF поддерживает многие аппаратные платформы: 1-7xxx, 1-8xxx и LinCon (ICP DAS), x86 (DOS, QNX, Linux), PC/104 (Eurotech), VME и Industrial PC (SBS Technologies), RTU 188 (Fastwel), CX-1000 (Beckhoff), МФК, ТКМ52 и P06 (ГК Текон), P130 ISa, КРОСС и ТРАССА (ЗЭИМ), TREI и др.

Для программирования PC-based контроллеров применяется система ISaGRAF Enhanced — PC-ориентированное ПО для разработки, исполнения и визуализации приложений системы управления. Средой разработки является ISaGRAF Enhanced Workbench, в которой осуществляется настройка тревог, событий и трендов. Созданное в Enhanced Workbench приложение по сети Ethernet загружается в целевую систему под ОС Windows CE 3.0, QNX 4.25, Windows NT и др. На одном физическом ПЛК может исполняться до 16 «виртуальных» ПЛК, при этом каждый из них может использовать один или более драйверов для связи с полевым оборудованием. В состав системы входят OPC-сервер, Alarm&Events и Trending-модули, а также готовые драйверы устройств ввода/вывода. HMI позволяет создавать экранные формы интерфейса оператора и связывать их с тэгами, получаемыми от OPC-сервера. Trending- модули позволяют вести распределенную историческую БД. Для разработки собственных драйверов для целевых систем ISaGRAF Enhanced QNX 4.25 и Linux RTAI используется Driver Development Kit. ISaGRAF Enhanced Workbench поддерживает ОС Windows 95/2000/NT, а целевая система поддерживает ОС QNX 4.25, Windows CE 3.0 и Linux RTAI.

Последние версии ISaGRAF со средой разработки ISaGRAF Workbench поддерживают системы контроля и управления движением по рекомендациям PLCOpen для систем с ЧПУ в станкостроении и робототехнике.

◆ Система программирования CoDeSys фирмы *Smart Software Solution GmbH* (3S)

Комплекс CoDeSys представляет собой инструментальную систему программирования ПЛК на языках стандарта МЭК 61131-3. CoDeSys является аппаратно независимым комплексом разработки программного обеспечения ПЛК и поставляется бесплатно. Описанию комплекса посвящены работы [4.3-4.6] и публикации в журнале «Промышленные АСУ и контроллеры» (NN 2-11,2006 г. и 1, 4, 2007 г.).

Комплекс CoDeSys используется для программирования контроллеров, производимых как зарубежными фирмами (*ABB, Beckhoff, Kontron, Moeller, WAGO* и др.), так и отечественными (*Fastwel, ОВЕН*).

Отличительные особенности системы CoDeSys:

- ◆ Реализация языков программирования по стандарту МЭК 61131-3. Важнейшие компоненты системы написаны на языке ST. Широко используется язык SFC.
- ◆ Прямая генерация машинного кода (генератор кода CoDeSys представляет собой компилятор программы с ЯВУ в машинный код). Для генерации машинного кода в конкретный ПЛК используются специальные файлы конфигурации целевой платформы (TSP), в которых задаются тип процессора, распределение памяти и др. Генерируемый машинный код пригоден для исполнения на любых одноплатных процессорах аппаратных средств.
- ◆ Встроенный эмулятор помогает отладить программу без контроллера и др. аппаратных средств. Режим эмуляции включается двумя способами: выбором None в качестве аппаратной платформы (без контроллера) и установкой Simulation mode в окне Online при работе с реальным ПЛК.
- ◆ Визуализация разрабатываемого проекта благодаря встроенным серверам данных (DDE и OPC).
- ◆ Большой набор сервисных функций, ускоряющих разработку программы.
- ◆ Использование в текстовом редакторе синтаксического цветового выделения ошибок (ключевые слова высвечиваются синим цветом, комментарии — зеленым, а ошибки — красным).
- ◆ Наличие демонстрационной версии SoftPLC для Windows NT/XP (2-часовые демоверсии включены в стандартный дистрибутив CoDeSys SP WinNT или CoDeSys SP RTE).

Базовый состав комплекса CoDeSys включает среду программирования на ПК с ОС Windows NT/XP/2000 и систему исполнения. Ядро системы исполнения написано на языке C. Комплекс адап-

тирован для работы с различными классами контроллеров, включая PC-based контроллеры. Компанией «Пролог» выполнена русификация документации комплекса CoDeSys.

Система исполнения обеспечивает загрузку и отладку кода прикладной программы. ПЛК подключается к ПК рабочего места программиста через COM-порт (RS-232) или по интерфейсам RS-422/485. Связь среды разработки на ПК и ПЛК осуществляется с помощью приложения — шлюза связи (*gateway*) на основе протокола TCP/IP. При подключении через COM-порт настраиваются параметры интерфейса — номер порта, скорость обмена, контроль паритета и число стоп-бит. Таким образом, разработка программы может вестись на удаленном ПК и взаимодействовать с др. ПК по сети Internet, а с ПЛК — через модем.

Составление программы предусматривает обязательное определение типов данных. CoDeSys поддерживает набор стандартных типов данных: биты, строки, массивы, структуры и др. С помощью отладчика программы последняя может быть остановлена для проверки правильности переменных, а в режиме работы программы по циклам легко проверить правильность выполнения программы с контролем значений всех переменных (механизм графической трассировки значений переменных).

При структурном программировании текст программы должен включать подпрограммы — программные компоненты POU. В стандарте МЭК 61131-3 определены 3 типа POU: функция (FUNCTION), функциональный блок (FUNCTION BLOCK) и программа (PROGRAM). Результаты работы функции определяются только значениями ее параметров. Функциональный блок — подпрограмма с собственной структурой данных. Программа в CoDeSys представляет собой глобальный объект и применяется для больших программных модулей.

Комплекс CoDeSys включает пять языков программирования: IL, ST, LD, FBD и SFC. Программа, созданная на одном из языков программирования (например, ST), может быть конвертирована в программу на другом языке программирования (например, IL). Программы CoDeSys по МЭК 61131-3 можно экспортировать и импортировать.

Встроенный компилятор CoDeSys V2.3 имеет генераторы кода микропроцессоров Intel 8051, 80x86/Pentium, Motorola MC68000, Power PC и др.

Встроенная в CoDeSys система визуализации (тренды, алармы, примитивы и др.) приближается к возможностям SCADA-систем. Созданный проект визуализации может быть использован любым ПК с помощью Win32 приложения CoDeSysHMI через Web-браузер.

При совместной разработке проекта группой программистов интеграция клиентских приложений и ENI-сервера осуществляется с помощью ENI 3S (ENgineering Interface — инженерингового интерфейса 3S).

Простые системы исполнения CoDeSys работают в ПЛК без ОС. Комплекс CoDeSys SP RTE имеет собственное ядро жесткого PB под Windows 2000/NT/XP. Есть 8-, 16- и 32-битные модификации CoDeSys SP для процессоров соответствующей разрядности (в основном без ОС). Однако в настоящее время 3S предлагает решения для ОС Windows NT/XP/CE, QNX и Linux. Использование CoDeSys с PC-based ПЛК расширяет возможности программирования ПЛК.

Система CoDeSys имеет программный инструментарий CoDeSys SoftMotion для управления движением (станки и обрабатывающие центры с ЧПУ и др.).

Новая версия CoDeSys V3.0 включает новые опции и полностью совместима с предыдущими версиями комплекса.

#### **4.3.3. Система программирования Unity Pro компании *Schneider Electric*, Франция**

Система программирования контроллеров Unity Pro входит в состав ПО Unity Studio, предназначенного для управления полномасштабными проектами. Пакет Unity Studio помимо системы программирования Unity Pro включает пакет Power Suite для программирования приводов и пускателей, XBTL-1000 для разработки интерфейсов оператора и OFS-сервер для связи ПЛК с верхним уровнем интегрированной системы управления предприятием.

Пакет Unity Pro базируется на более ранних системах программирования контроллеров PL7 и Concert и предназначен прежде всего для работы с ПЛК Premium, Atrium и Quantum. Однако поскольку Unity Pro базируется на открытых стандартах МЭК, имеется возможность конвертирования приложений для использования различными программно-аппаратными платформами. Помимо ПЛК система Unity Pro поддерживает различные интеллектуальные устройства ввода/вывода и полевые шины, в том числе Ethernet [4.8-4.9].

Дополнительный набор средств разработки Unity EFB позволяет создавать функции и функциональные блоки на языке C, которые впоследствии могут использоваться в любом приложении, созданном с помощью Unity Pro.

Отличительные особенности EЮ Unity Pro:

- ◆ Поддержка пяти языков программирования по стандарту МЭК 61131-3 (LD, SFC, FBD, ST и IL).
- ◆ Наличие мощных графических редакторов и отладчика, в том числе наличие встроенного симулятора. Графический редактор Microsoft Visio предоставляет в распоряжение разработчика стандартные библиотеки объектов (ПЛК, привод, сети и др.) и обеспечивает наглядное представление проектируемого процесса.
- ◆ Встроенные графические элементы Unity Pro позволяют создавать и видоизменять экраны оператора в процессе работы.
- ◆ Открытая архитектура клиент-сервер обеспечивает локальный или удаленный доступ к ресурсам приложения при помощи интерфейсов COM/DCOM.
- ◆ Компоненты пакета Unity Pro (данные, кодовые последовательности, модули), хранящиеся в библиотеках на локальном или удаленном ПЛК, могут совместно использоваться всеми разработчиками проекта.
- ◆ Обмен данными (переменные, программы, конфигурации) в Unity Pro осуществляется по стандарту XML. Обмен данными в формате XML обеспечивает взаимодействие создаваемых программных продуктов с приложениями сторонних разработчиков. Возможен экспорт/импорт данных между частями различных приложений.
- ◆ Наличие средств диагностики пакета Unity Pro, позволяющих быстро выявлять ошибки в программах.
- ◆ Возможность создания архива действий оператора с метками времени и идентификацией оператора.

Для программистов, работающих с языками VBA, VB или C++, а также для доступа к серверам Unity Pro и Unity Studio используется ПО Unity Developer Edition (UDE).

Интеграция ПЛК и ЧМИ осуществляется с помощью средства разработки и генерации приложений Unity Applications Generator (UAG). При разработке проекта с использованием UAG возможно использование стандартных объектов типа «клапан», «двигатель», «ПИД-регулятор» и др.

Во время разработки проекта Unity Pro осуществляет автоматическое присвоение адресов переменным, обеспечивая тем самым универсальность базы данных. В режиме просмотра проект представляется в виде функциональных модулей.

Специальные объекты, созданные и используемые при помощи пакета Unity Pro, а также структуры данных и функциональные блоки, могут группироваться в библиотеки и повторно использоваться в др. приложениях.

Оперативная диагностика процесса обеспечивается возможностью прямого доступа к модулям приложения в процессе работы системы. К интегрированным средствам диагностики приложений относятся отображение сообщений сигнализации (алармов), сохраненных в диагностической памяти ПЛК.

Причиной этих сообщений могут быть неисправность ПЛК, ошибка при выполнении программы и др.

#### ◆ 4.3.4. Система программирования STEP7 фирмы *Siemens*, Германия

Пакет ПО STEP7 является интегрированным пакетом программирования контроллеров Simatic S7-300, S7-400, C7 и WinAC. Упрощенная версия STEP7 Lite предназначена для программирования простых систем управления на базе ПЛК S7-300 и C7, а также станций систем распределенного ввода/вывода ET200S/ET200X. Программы, созданные в STEP7 Lite, поддерживаются пакетом ПО STEP7. Для программирования контроллеров S7-200 применяется пакет ПО STEP7 Micro/Win [4.10].

Помимо программирования ПЛК пакет STEP7 используется для конфигурирования аппаратуры и промышленных сетей, программирования и диагностики систем человеко-машинного интерфейса и управления на базе контроллеров Simatic.

Пакет STEP7 поставляется в виде самостоятельного программного пакета для ПК под управлением ОС Windows 2000/XP (объем ОЗУ не менее 64 Мбайт, ПЗУ — от 200 до 380 Мбайт), а также входит в комплект поставки программаторов Simatic Field PG и Simatic Power PG. Для подключения ПЛК к ПК последний должен быть оснащен MP1 картой и USB/MP1 адаптером с соединительным кабелем.

В состав пакета STEP7 входит набор инструментальных средств:

- Simatic Manager — основной компонент системы, позволяющий управлять всеми частями проекта, осуществлять быстрый поиск и запуск приложений.
- Symbol Editor — программа определения символьных имен, типов данных, ввода комментариев для глобальных переменных.
- Hardware Configuration — инструментальное средство для программного конфигурирования аппаратуры и настройки параметров всех модулей. Выполняется автоматическая проверка корректности всех вводимых данных.
- Communication — программа для задания управляемой по времени циклической передачи данных между компонентами автоматизации через MPI или по сетям Profibus или Industrial Ethernet.
- System Diagnosis — программа, предоставляющая пользователю обзор состояния контроллера.
- Information Functions — компонент для быстрого обзора данных CPU и проверки написанной пользователем программы.

Редактор программ STEP7 позволяет выполнять разработку проекта на языках Statement List (STL), Ladder Diagram (LAD), Function Block Diagram (FBD) по стандарту МЭК 61131-3. Для специальных задач могут использоваться дополнительные языки программирования высокого уровня или технологически ориентированные языки. Все файлы программ пользователя и все файлы STEP7 объединяются в блоки, что улучшает структуру программы.

Программа STEP7 может содержать организационные блоки (OB), функциональные блоки (FB), функции (FC), блоки данных (DB), а также блоки, встроенные в ОС CPU: системные функциональные блоки (SFB), системные функции (SFC) и системные блоки данных (SDB).

STEP7 поддерживает мощную систему команд, позволяющих выполнять логические и математические операции с плавающей точкой, управлять ходом выполнения программы, обслуживать таймеры и счетчики, преобразовывать и пересылать форматы данных, обеспечивать работу мультипроцессорных систем S7-400 и пр.

*STEP7 Lite* — недорогое программное обеспечение для реализации простых автономных систем на базе контроллеров Simatic S7-300/C7, а также станций систем распределенного ввода/вывода ET200S/ET200X с интеллектуальными интерфейсными модулями, работающими без связи с сетью Profibus.

*Пакет S7-PLC SIM* — эмулятор работы ПЛК Simatic S7-300/S7-400/C7/WinAC на компьютере или программаторе. S7-PLC SIM позволяет обнаружить ошибки в программе, повысить ее качество и ускорить разработку проекта. С помощью пакета S7-PLC SIM выполняется отладка программ, написанных в STEP7. При этом тестируемая программа загружается в эмулируемый контроллер. S7-PLC SIM поддерживается программным пакетом Step7 Lite.

#### **4.3.5. Система программирования «ПОЛИГОН» ООО «Промавтоматика»**

Система программирования PC-совместимых контроллеров, разработанная ООО «Промавтоматика», состоит из конфигуратора, графического редактора и менеджера проектов. Конфигуратор служит для выбора и редактирования аппаратного состава проекта, а Графический редактор — для графического представления алгоритмов работы программы и их отладки в режиме реального времени. Менеджер проектов обеспечивает сервисные функции при разработке проекта. Создаваемый проект состоит из 3-х частей: программной, аппаратной и объектов.

Аппаратная часть, формируемая конфигуратором, включает данные о принятом в проекте оборудовании. Конфигуратор предоставляет состав оборудования в виде древовидной структуры (например, крейт - плата ввода/вывода - регистр - канал или крейт - плата CPU - COM-порт - модуль). Аппаратная часть проекта с помощью команды «Передать проект в редактор» преобразуется в формат программной части проекта.

Программная часть проекта, представленная в виде модулей, содержит основной алгоритм работы программы контроллера и редактируется в Графическом редакторе. Основным элементом программной части является функциональный блок, представляющий собой законченный алгоритм определенной функции с заданным числом входных и выходных параметров. ПО «Полигон» содержит обширную библиотеку функциональных блоков, поддерживающих арифметические и логические функции, драйверы устройств ввода/вывода, интерфейсы различных модулей, регуляторов, дисплеев. Возможно создание новых функциональных блоков с помощью программы «мастер».

ПО «Полигон» поддерживает большое число плат ввода/вывода MicroPC, модулей сбора данных и управления ADAM фирмы Advantech (серий 4000 и 5000), ПЛК Beckhoff, PC-совместимых контроллеров серии MIC и др.

Кроме аппаратной части в Конфигураторе создаются и редактируются объекты, в качестве которых выступают реакторы, резервуары и др. Связь объекта с проектируемой системой осуществляется через каналы ввода/вывода (аналоговые и дискретные). С аппаратной частью проекта объекты связываются путем простого перетаскивания канала из объектов в канал аппаратной части.

Заключительным этапом создания программного обеспечения является трансляция проекта, которая проводится в Графическом редакторе, и перенос полученного exe-файла в память контроллера. В Графическом редакторе предусмотрены различные функции работы с контроллером по интерфейсу RS-232 — запись программы в ПЛК, пуск и остановка программы, просмотр файлов в контроллере, создание и удаление каталогов и др.

Для тестирования программного обеспечения используется отладчик. В режиме отладки на контроллере запускается программа, а в Графическом редакторе открывается соответствующий проект для его просмотра в режиме реального времени. Также предусмотрена функция печати проекта и др.

#### **4.3.6. Система программирования PXI-контроллеров Lab VIEW компании *National Instruments*, США**

LabVIEW является системой моделирования, измерения, тестирования и управления компании *National Instruments*. В названии программы LabVIEW VI означает «Виртуальный Прибор», поскольку в блок-схеме при графическом программировании используются внешний вид и функциональность традиционных физических приборов — осциллографов, генераторов и пр.

Операторский интерфейс LabVIEW содержит лицевую панель создаваемого прибора, на которой размещены управляющие элементы, — тумблеры, кнопки, переключатели и др. Помимо управляющих элементов на экран выводятся графики (тренды), гистограммы, лампочки и др. элементы отображения.

Аналогично традиционным языкам программирования LabVIEW включает переменные, типы данных, структуры циклов и последовательностей. Созданный код может быть использован в виде библиотек DDL и интегрирован с открытыми стандартами (ActiveX, OPC, TCP и др.).

В LabVIEW имеется более 500 встроенных функций для анализа данных. Это функции частотного анализа, генерации сигналов, математической обработки, аппроксимации кривых, статистического анализа и др.

Представление данных включает их визуализацию на экране дисплея в виде двух- и трехмерных изображений, генерацию отчетов и управление данными, включая такие атрибуты их представления, как цвет, масштаб, тип графики. Генерация отчетов осуществляется в виде текстовых документов в форматах Microsoft Word, Microsoft Excel и HTML.

В качестве средств разработки виртуальных измерительных приборов используются компоненты LabVIEW VI Analyzer, LabVIEW State Diagram Toolkit и LabVIEW Express VI Development Toolkit. Для генерации отчетов в форматах Microsoft Word и Microsoft Excel применяется ПО LabVIEW Report Generation Toolkit for Microsoft Office. Взаимодействие с БД осуществляется с помощью технологии Microsoft ADO и GJ LabVIEW Database Connectivity Toolkit.

Для анализа и обработки сигналов применяется ПО LabVIEW Digital Filter Design Toolkit (проектирование цифровых фильтров), LabVIEW Advanced Signal Processing Toolkit (анализ во временной и частотной областях) и LabVIEW Vision Development Module (захват, обработка и вывод изображений) и др.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ПО ТЕМЕ №4.3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОЧИХ СТАНЦИЙ**

### **ВОПРОСЫ**

1. SCADA-системы PCY.

2. Методика выбора SCADA-систем.
3. OPC-стандарт взаимодействия SCADA-систем и ПЛК.
4. Базы данных и системы управления базами данных.
5. Серверы баз данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Профессия, 2009. – 592 с. (380-418).

#### ◆ SCADA-системы распределенных систем управления

К настоящему времени SCADA-система (*Supervisory Control And Data Acquisition* — система сбора данных и оперативного диспетчерского управления) является обязательным атрибутом автоматизированной системы оперативно-диспетчерского управления. SCADA-системы устанавливаются на диспетчерских станциях, локальных технологических станциях, а также на операторских станциях различного назначения. Аппаратной платформой для SCADA-систем служат рабочие станции на базе промышленных персональных компьютеров (ППК), панельные компьютеры и операторские панели. Отдельные компактные модификации SCADA-систем устанавливаются во флэш-памяти контроллеров (например, Trace Mode, MasterSCADA и др.).

Наряду с многофункциональными, рассчитанными на большое число тэгов, SCADA-системами, которые предназначены для применения в сложных системах управления крупными предприятиями, в последние годы повысился спрос на небольшие SCADA-системы, потребность в которых определяется желанием небольших предприятий малого и среднего бизнеса проектировать и использовать системы управления по аналогии (в смысле функциональности) с крупномасштабными предприятиями. Хотя малые SCADA-системы рассчитаны на меньшее число каналов и уступают крупным, таким, как InTouch, iFIX, Genesis и др., в быстродействии, отсутствии ряда компонентов и пр., они имеют значительно меньшую стоимость, занимают небольшой объем памяти и характеризуются быстрым рестартом и отсутствием функциональной избыточности. В любом случае установка недорогой малой SCADA-системы является эффективным и более целесообразным решением, чем разработка собственного программного продукта.

Несмотря на вышеизложенное, все SCADA-системы имеют ряд общих функций, а именно:

- 4.1.3 сбор и обработка данных о параметрах процесса (фильтрация, нормализация, масштабирование, линеаризация и др. для приведения данных к нужному формату);
  - 4.1.4 хранение (архивирование) полученной информации в базе данных;
  - 4.1.5 представление данных в цифровой, символьной или иной форме; это может быть динамизация значений переменных, представление значений переменных в виде графиков в функции времени (трендов), гистограмм и др.;
  - 4.1.6 сигнализация изменений хода технологического процесса, особенно в предаварийных и аварийных ситуациях в виде системы алармов; при этом может осуществляться регистрация действий обслуживающего персонала в аварийных ситуациях;
  - 4.1.7 формирование сводок, журналов и других отчетных документов о ходе технологического процесса на основе информации, собранной в архивах;
- формирование и сохранение в памяти команд оператора по изменению параметров настройки и режима работы контроллеров, исполнительных устройств (пуск-останов, открытие закрытие и др. функции).

• Автоматическое управление ходом технологического процесса в соответствии с имеющимися в SCADA-системах алгоритмами управления (ПИ-, ПИД-регулирование, позиционное, нечеткое регулирование и др.). Данные функции рекомендуется использовать для решения задач невысокого быстродействия. Таким образом, SCADA-системы являются мощным инструментом для разработки ПО РСУ

Наиболее распространенные на сегодняшний день SCADA-системы приведены в таблице 5.1.

Краткое описание возможностей большинства SCADA-систем приведено в работах [2.9, 5.1-5.15]. Ниже приведено описание SCADA-систем, не рассмотренных в работе [2.9], а также SCADA-систем, представленных на российском рынке в последние несколько лет, в том числе SCADA-системы для малых производств.

Таблица 5.1. SCADA-системы

№	Наименование	Фирма – производитель
1	InTouch	Wonderware, США
2	Genesis32	Iconics, США
3	iFIX	Intellution, США
4	Trace Mode	AdAstra, Россия
5	Real Flex	BJ Software Systems (BJSS), США
6	Cimplicity	GE Fanuc, США–Япония
7	WinCC, Simatic WinCC flexible	Siemens, Германия
8	Citect (Vijeo Citect)	Schneider Electric, Франция
9	Vijeo Look, Monitor Pro	Schneider Electric, Франция
10	PcVue	ARC Informatique, Франция
11	MX SCADA	Mitsubishi Electric, Япония
12	Clear SCADA	Control Microsystems, Канада
13	Elipse SCADA, Elipse E3	Elipse Software LTDA, Бразилия
14	RSView 32	Rockwell Automation, США
15	MOSCAD	Motorola, США
16	Phocus	Jade Software, Великобритания
17	WizFactory	PC Soft International Inc., США–Израиль
18	Genie 3.0, AStudio	Advantech, Тайвань
19	LabView	National Instruments, США
20	IMAGE	Nympha Soft, Финляндия–Россия
21	MasterSCADA	ИнСАТ, Россия
22	VNS	ИнСАТ, Россия
23	КРУГ 2000	КРУГ, Россия
24	Сириус QNX	ЗАО «Предприятие Реалтайм», Россия
25	МИКСИС (MIKSys)	МИФИ, Россия
26	СКАТ-М	«Центрпрограммсистем», Россия
27	КАСКАД	АО «Элара», Россия
28	VIORD microSCADA	ФИОРД, Россия

К числу таких SCADA-систем относятся: ClearSCADA компании *Control Microsystems* (Канада), Vijeo Citect компании *Schneider Electric* (Франция), MX SCADA компании *Mitsubishi Electric* (Япония), Elipse E3 компании *Elipse Software* (Бразилия), Pc- Vue компании *ARC Informatique* (Франция), RSView 32 компании *Rockwell Automation* (США), SimaticWinCC flexible компании *Siemens* (Германия) и «Сириус QNX» ЗАО «Предприятие Реалтайм».

Для наиболее полного изучения возможностей SCADA-систем ниже рассматривается структура и функции SCADA-системы InTouch фирмы *Wonderware* (США).

#### 5.1.1. SCADA-система InTouch

Программное обеспечение InTouch является объектно-ориентированным человеко-машинным интерфейсом (HMI — Human Machine Interface) для процессов сбора данных и управления и позволяет контролировать и управлять объектами и системами, используя графические объекты.

Основные функции SCADA-система InTouch: отображение параметров объекта управления, текущих и исторических трендов, отображение и регистрация аварийных сигналов (алармов).

Средства объектно-ориентированного проектирования позволяют создавать динамические изображения, поддерживают их вращение, дублирование, копирование, вставку, стирание и др. операции. Анимационные связи поддерживают работу с дискретными, аналоговыми и строковыми переменными, горизонтальными и вертикальными движками и кнопками, а также связаны с размером и цветом текста, его местоположением, вращением и мерцанием.

InTouch содержит полную библиотеку мастер-объектов (Wizard), включающую предварительно сконфигурированные вспомогательные средства — переключатели, ползунковые регуляторы, счетчики и др. Возможно создание собственных мастер-объектов применительно к конкретной системе.

Приложение Productivity Pack, являющееся дополнением к InTouch, содержит библиотеку более чем 2000 мастер-объектов, универсальные средства просмотра на 200 файловых форматов, генератор мастер-объектов и пр. InTouch позволяет организовать взаимодействие с другими приложениями, используя следующие стандартные средства:

4.1.8 DDE-обмен (Dynamic Data Exchange — динамический обмен данными). Большинство серверов ввода/вывода (например, контроллеры) поддерживают DDE-обмен для передачи данных в InTouch-приложение. Приложение Excel также использует DDE-механизм. Используя NetDDE, поставляемый с InTouch, пользователь получает возможность связи по DDE между задачами на разных PC через сеть. Поддерживается связь между Windows, VNS и UNIX с помощью протоколов Net-BIOS, TCP/IP и DecNET, а также через последовательный канал.

4.1.9 OLE-технология (Object Linking and Embedding — включение и встраивание объектов). Используется для взаимодействия с другими пользовательскими приложениями.

4.1.10 OPC-программы (OLE for Process Control — OLE для управления процессами). SCADA-система InTouch постоянно развивается в различных версиях. За последние годы на рынке внедрены версии 7.11, 8.0, 9.5, 10.

*InTouch 7.1 U* поддерживаемая ОС Windows NT, является одним из компонентов интегрированного пакета программного обеспечения для полной автоматизации производства FactorySuite 2000.

К числу таких SCADA-систем относятся: ClearSCADA компании *Control Microsystems* (Канада), Vijeо Citect компании *Schneider Electric* (Франция), MX SCADA компании *Mitsubishi Electric* (Япония), Elipse E3 компании *Elipse Software* (Бразилия), Pc- Vue компании *ARC Informatique* (Франция), RSView 32 компании *Rockwell Automation* (США), SimaticWinCC flexible компании *Siemens* (Германия) и «Сириус QNX» ЗАО «Предприятие Реалтайм».

Для наиболее полного изучения возможностей SCADA-систем ниже рассматривается структура и функции SCADA-системы InTouch фирмы *Wonderware* (США).

#### 5.1.1. SCADA-система InTouch

Программное обеспечение InTouch является объектно-ориентированным человеко-машинным интерфейсом (HMI — Human Machine Interface) для процессов сбора данных и управления и позволяет контролировать и управлять объектами и системами, используя графические объекты.

Основные функции SCADA-система InTouch: отображение параметров объекта управления, текущих и исторических трендов, отображение и регистрация аварийных сигналов (алармов).

Средства объектно-ориентированного проектирования позволяют создавать динамические изображения, поддерживают их вращение, дублирование, копирование, вставку, стирание и др. операции. Анимационные связи поддерживают работу с дискретными, аналоговыми и строковыми переменными, горизонтальными и вертикальными движками и кнопками, а также связаны с размером и цветом текста, его местоположением, вращением и мерцанием.

InTouch содержит полную библиотеку мастер-объектов (Wizard), включающую предварительно сконфигурированные вспомогательные средства — переключатели, ползунковые регуляторы, счетчики и др. Возможно создание собственных мастер-объектов применительно к конкретной системе.

Приложение Productivity Pack, являющееся дополнением к InTouch, содержит библиотеку более чем 2000 мастер-объектов, универсальные средства просмотра на 200 файловых форматов, генератор мастер-объектов и пр. InTouch позволяет организовать взаимодействие с другими приложениями, используя следующие стандартные средства:

4.1.11 DDE-обмен (Dynamic Data Exchange — динамический обмен данными). Большинство серверов ввода/вывода (например, контроллеры) поддерживают DDE- обмен для передачи данных в InTouch-приложение. Приложение Excel также использует DDE-механизм. Используя NetDDE, поставляемый с InTouch, пользователь получает возможность связи по DDE между задачами на разных PC через сеть. Поддерживается связь между Windows, VNS и UNIX с помощью протоколов NetBIOS, TCP/IP и DecNET, а также через последовательный канал.

4.1.12 OLE-технология (Object Linking and Embedding — включение и встраивание объектов). Используется для взаимодействия с другими пользовательскими приложениями.

4.1.13 OPC-программы (OLE for Process Control — OLE для управления процессами). SCADA-система InTouch постоянно развивается в различных версиях. За последние годы на рынке внедрены версии 7.11, 8.0, 9.5, 10.

*InTouch 7.1 U* поддерживаемая ОС Windows NT, является одним из компонентов интегрированного пакета программного обеспечения для полной автоматизации производства FactorySuite 2000.

Компоненты FactorySuite используются на трех уровнях автоматизации:

- на контроллерном уровне — управление процессом с помощью ПЛК и рабочих станций;
- на диспетчерском уровне (уровне SCADA-систем) — супервизорное управление технологическим процессом;
- на уровне MES-систем — оперативно-диспетчерское управление процессом. Пакет FactorySuite построен на открытых технологиях COM, DCOM, OPC, ActiveX и содержит большое число серверов ввода/вывода, обеспечивающих связь с оборудованием, приборами и устройствами связи. Вся информация накапливается в реляционной базе данных реального времени (БД РВ) IndustrialSQL Server. За счет использования протокола Suite Link обеспечивается высокое быстродействие, компактность хранения данных. IndustrialSQL Server использует возможности Microsoft SQL Server, в том числе его возможности фильтрации, объединения и обработки данных для удобства их запроса и выборки. IndustrialSQL Server может автоматически обновлять статистические данные в виде сводных таблиц с заданной производительностью, фиксируя средние, а также максимальные и минимальные значения параметров. Данные из SQL сервера в виде отчетов могут передаваться в Internet и далее удаленным пользователям, а также через GSM-модем запрашиваться и передаваться потребителям. Кроме IndustrialSQL Server в FactorySuite входят приложения-клиенты FactoryOffice, предназначенные для создания текущих и архивных трендов, графиков и таблиц.

Помимо объектно-ориентированной графики, анимационных связей и библиотеки мастер-объектов InTouch дает пользователям возможность удаленного доступа к ист очникам данных ввода/вывода (например, Microsoft Excel) без необходимости создания тэгов (тэг — это запись базы данных, содержащая информацию о параметре процесса) в локальной базе данных тэгов.

Другими функциями InTouch являются одновременная поддержка многочисленных источников алармов (поддержка от 1 до 999 приоритетов алармов). Алармы могут быть выведены на экран, записаны на диск и выведены на печать. Также InTouch позволяет создавать исторические тренды и тренды реального времени с возможностью одновременного отображения до 8-ми переменных (тренд реального времени поддерживает работу с четырьмя переменными). При этом каждая переменная читается из собственного файла. Возможен экспорт данных в Excel, файл данных или в канал DDE. Кроме того, пользователь имеет возможность генерирования рапорта напрямую из проекта InTouch путем прямого форматирования экрана, вывода на печать или рассылки по электронной почте.

Благодаря наличию функции SPC (Statistical Process Control — Статистическое Управление Процессом) InTouch предоставляет возможность статистического управления процессом на уровне оператора.

Система паролей InTouch предоставляет встроенную систему доступа на 10000 уровней, гарантирующую надежную защиту системы.

Пакет *InControl* — это система программирования и управления с открытой архитектурой реального времени, позволяющая создавать архитектуру SoftPLC с заменой традиционного ПЛК на PC, подключенный к устройствам ввода/вывода через локальные сети Profibus, Modbus и др. InControl поддерживает языки релейной логики (LD), последовательных функциональных схем (SFC) и структурированного текста (ST) по стандарту IEC 61131-3. Поддерживается технология ActiveX (ПИ-

, ПИД-регуляторы, нечеткая логика и др.). Также допускается программирование с использованием традиционных языков программирования. InControl поддерживает различные промышленные интерфейсы и сети — Profibus, DeviceNet, Interbus, DDE, SDS, Internet и др. Подобно другим компонентам FactorySuite InControl через набор мастер-объектов интегрируется с InTouch.

Пакет *InTrack* — система управления производственными процессами — от закупки сырья, материалов и комплектующих до выпуска готовой продукции. Различные схемы производственных процессов создаются в специальном графическом редакторе и включают мастер-объекты, среди которых есть производственные цепочки, материальные ресурсы, продукты и пр. Таким образом, в рамках одной прикладной программы совмещаются функции SCADA-системы и MES-системы (Manufacturing Execution System — производственная исполнительная система). Использование DDE-обмена и OLE-технологии позволяют организовать связь с устройствами ввода/вывода, а также с системами верхнего уровня MRP (Management and material Resource Planning — система планирования ресурсов предприятия). InTrack включает в себя, подобно InTouch, тэги, текущие и исторические тренды, алармы, сценарные функции и мастер-объекты. За счет встроенных функций открывается возможность автоматизации задач учета, планирования и диспетчеризации производства.

*InBatch* — гибкая система управления процессами дозирования и смешения в металлургической, химической, пищевой и др. отраслях промышленности. Имеется возможность моделировать процессы, создавать рецепты и имитировать их исполнение, а также управлять реальным процессом. InBatch тесно интегрирован с InTouch, что позволяет оператору вести мониторинг периодических процессов дозирования и смешения. Кроме того, InBatch имеет набор функций для интеграции с ERP-системами (Enterprise Resource Planning — система планирования производства), в том числе осуществлять планирование сроков поставки материалов, выполнения заказов и пр.

*FactorySuite Web Server* с помощью утилиты Application Publisher выполняет функции преобразования созданных InTouch приложений в вид, доступный для просмотра с любого удаленного узла и управления производственным процессом в режиме реального времени через Internet и Intranet.

Версия *InTouch 8.0* пакета FactorySuite A2 на платформе ArchestrA компании *Invensys* объединяет все компоненты FactorySuite A2. В числе новых компонентов — сервер приложений Industrial Application Server (IAS). IAS включает БД Galaxy со средой разработки приложений IDE (Integrated Development Environment) и средой исполнения. IAS обеспечивает сбор и обработку информации в режиме РВ, управление подсистемами алармов и событий, сервисы управления данными и может быть полнофункциональным или распределенным (БД, компоненты, среда разработки и среда исполнения разнесены по рабочим станциям). IAS в отличие от InTouch 7.11 оперирует не с тэгами, а с объектами («аналоговое устройство», «дискретное устройство», «платформа», «переключатель» и др.). Использование платформы ArchestrA обеспечивает интеграцию IAS, БД IndustrialSQL Server и SCADA-системы InTouch 8.0, сокращая время разработки приложений для автоматизации всего производства.

На технологии ArchestrA основана программная платформа *Wonderware System Platform 3.0* для управления производством.

Новая версия *In.Touch 9.5* по итогам опроса читателей журналов *Control Engineering* и *Control Magazine* признана лучшим программным пакетом в категории «HM1 и SCADA» [5.3].

InTouch 9.5 имеет ряд преимуществ, среди которых возможность резервирования, новые средства проектирования, дополнительные возможности алармов.

Графический интерфейс пользователя (GUI — Graphical User Interface) позволяет быстро и просто разрабатывать графическое представление процесса.

К числу новых возможностей создания графического интерфейса относится технология SmartSymbols, позволяющая создавать шаблоны графических символов и связывать их с объектами приложения ArchestrA, локальными тэгами InTouch с помощью удаленных ссылок (Remote Tag Referencing). Используя технологию SmartSymbols пользователь может создавать из набора графических объектно-ориентированных средств стандартизованные библиотеки объектов.

Редактор QuickScript позволяет настроить приложения InTouch в соответствии с требуемой спецификацией. Компонент InTouch Fast Switch предназначен для быстрого переключения из среды разработки в среду исполнения и наоборот простым нажатием клавиши. Для доступа к удаленным тэгам или изменения источников данных для объектов приложения ArchestrA введена новая функция сценариев IOSetRemoteReferences.

Архитектура InTouch 9.5 допускает установку SCADA-системы как на отдельном компьютере, так и в клиент-серверной среде. Механизм конфигурации сервера тегов позволяет разработчику назначать один или несколько компьютеров в качестве серверов тегов. Динамическая среда

разработки сетевых приложений (NAD) позволяет с одного сервера обслуживать приложения InTouch. Для наблюдения за технологическим процессом используется механизм InTouch View.

InTouch 9.5 имеет расширенные возможности визуализации алармов (функции):

- Функция отображения распределенных алармов (Distributed Alarm Display) позволяет оператору во время работы выбрать заранее сконфигурированные алармы.
- Функция управления просмотром БД (Database View Control) отображает алармы, зарегистрированные в БД.
- Функция управления просмотром алармов (Alarm Viewer Control) является элементом управления ActiveX, позволяющим просмотр как текущих, так и исторических данных.

Программный пакет InTouch 9.5 является универсальным клиентом FactorySuite для любого программного обеспечения фирмы *Wonderware*. Он может использоваться совместно с Industrial Application Server, IndustriSQL Server, InTrack, InBatch, DT Analyst и другими приложениями.

Новая версия *InTouch 10.0* имеет следующие новые достоинства:

- новые независимые от разрешения экрана графические объекты;
- многопользовательская разработка и редактирование разрабатываемого проекта;
- мощный набор графических символов с интегрированными сценариями и средствами связи, графическая анимация и разнообразный инструментарий;
- интеграция с *Wonderware System Platform 3.0* с возможностью масштабирования — от одиночного узла с HMI до систем диспетчерского управления в масштабе предприятия (до 400 PC и до 1 млн точек ввода/вывода);
- полная совместимость с предыдущими версиями InTouch;
- встроенные средства для согласованной обработки и визуализации качества данных.

В InTouch 10.0 имеется встроенная библиотека символов *ArchestrA*, включающая более 500 графических символов, которые могут быть модифицированы или использоваться без изменений. Каждый атрибут графики может быть индивидуально анимирован. *ArchestrA* символы предоставляют доступ к стандартным элементам управления, таким, как Web-браузеры, компоненты ERP-систем и другие приложения, поддерживающие .NET.

Среда разработки *Wonderware Development Studio* обеспечивает общую интегрированную среду разработки (IDE) для *Wonderware System Platform 3.0* и InTouch 10.0. Функция InTouch Fast Switch позволяет осуществить быстрое переключение из среды разработки в среду исполнения и наоборот.

InTouch 10.0 поддерживает мультиэкранный режим и позволяет создавать многоэкранные HMI приложения.

Программное обеспечение InTouchIO.0 включает следующий инструментарий по анализу и поиску неисправностей:

- Distributed Alarm Display — предоставляет суммарную информацию по текущим аварийным сигналам;
- Alarm Viewer Control — элемент управления ActiveX, отображающий текущие и исторические аварийные сигналы;
- Database View Control — отображает историческую информацию по аварийным сигналам для анализа событий.

InTouch 10.0 может работать как OPC-клиент и как OPC-сервер. Серверы ввода/вывода от *Wonderware* предоставляют доступ к данным по технологии OPC, протоколу *Wonderware SuiteLink* или по протоколу *Microsoft DDE*. Также можно использовать инструментарий *ArchestrA DA Server Toolkit* для создания дополнительных серверов.

InTouch 10.0 включает несколько встроенных моделей и функций безопасности:

- систему безопасности с разделением уровней доступа по паролю;
- аутентификацию *Microsoft Windows*;
- защиту на уровне данных — при установке системной платформы *Wonderware System Platform 3.0*;
- программное обеспечение InTouch 10.0 Read Only, допускающее только чтение данных.

Предыдущие версии пакета InTouch русифицированы и адаптированы к российскому рынку. Благодаря программе технической поддержки имеется возможность прохождения курсов обучения по Интернету с использованием обширной онлайн-базы знаний. Число внедрений программно-

го обеспечения InTouch превышает 450 тыс на более чем 100000 объектах. Проекты с применением SCADA-системы InTouch широко используются в различных отраслях промышленности.

Вопросам выбора SCADA-систем, а также описанию структуры, компонентов и характеристик SCADA-систем посвящены работы [5.1, 5.2, 5.4, 5.7, 5.10, 5.15].

### 5.1.2. SCADA-система PcVue компании *ARC Informatique* (Франция).

SCADA-система PcVue использует объектную технологию создания приложений и работает под управлением ОС Windows 2000/XP, Server 2003 как в среде автономной, так и клиент-серверной архитектуры.

Среди возможностей PcVue отметим следующие: динамическое конфигурирование, графический интерфейс с использованием архитектуры Document/ View, создание 3D мнемосхем, резервирование сервера со структурированной БД, использование объектно-ориентированной технологии и международных стандартов (DDE, OPC, ODBC и др.).

Подобно другим SCADA-системам PcVue сохраняет возможности визуализации процесса, создания трендов, алармов, отчетов и расписаний. Возможно создание программ пользователя на языке VBA.

SCADA-система PcVue снабжена обучающей программой и примерами различных проектов. В состав компонентов ПО помимо SCADA-системы PcVue входят:

- Plant Vue — приложение для небольших производств. Графический интерфейс аналогичен SCADA-системе PcVue. Plant Vue имеет достаточно мощный инструмент работы с историческими данными, но в то же время имеет ограниченное число переменных (до 2000), устанавливается только на одной станции. Используется, как правило, в локальных системах автоматизации при управлении отдельными объектами.
- Lon Vue — ПО для управления интерфейсом сети Lon Works (работает под Windows). Данные в режиме PB поступают в Lon Works через OPC-серверы.
- Data Vue — инструмент для получения исторических данных, трендов, файла регистрации и отчетов данных от PcVue. Поддерживает форматы PcVue, Access, Oracle v.8, SQL Server.
- Web Vue — программный продукт, работающий с Web-браузером и обеспечивающий удаленное отображение и управление технологическими процессами через Internet или Intranet. Безопасная передача данных осуществляется через SSL-соединение. Последняя версия Web Vue 3.0 предусматривает Web-сервис системы. При этом PcVue выступает в качестве Web-клиента, имеющего удаленный доступ через Internet к Web-серверу с Web Vue.

Графический интерфейс PcVue поддерживает векторные рисунки, импортируемые растры, допускает свободное вращение изображений, заливку, изменение цвета и масштаба изображений, копирование и др.

Диаграммы исторических трендов и трендов реального времени могут быть встроены в мнемосхему. При этом допускается масштабирование окна с трендами, одновременное масштабирование оси времени и оси значений, динамическое назначение переменных трассам и пр.

Генератор отчетов PcVue позволяет распечатывать отчеты в PB или из БД. Также могут быть распечатаны или внесены в архив сообщения о тревогах.

Объектно-ориентированная технология использует объектные библиотеки, содержащие несколько сотен двух- и трехмерных предварительно сконфигурированных объектов (реакторы, вентили, трубопроводы и т. п.). Каждый объект может быть изменен и сохранен либо создан заново в соответствии с требованиями пользователя. Все созданные объекты распространяются на все мнемосхемы, в которых они используются.

Коммуникационные возможности PcVue определяются собственным коммуникационным менеджером, поддерживающим протокол TCP/IP Для обмена данными в реальном времени с устройствами независимых производителей PcVue действует, как OPC-клиент. Для создания и выполнения структурированных программ используются скрипты на языке *Microsoft VBA*. При этом имеется возможность обращения к свойствам объектов ActiveX и Java Beans. В мнемосхемы разработчик может встраивать компоненты от независимых производителей оборудования.

Интеграция данных от PcVue с MES-приложениями осуществляется с помощью СУБД по интерфейсам ODBC или ADO. Для автоматического конфигурирования БД применяется Smart Generator с использованием интерфейса XML. Генератор поддерживает среду разработки Unity и CoDeSys.

К новым функциям PcVue 8.10 относятся функция сервера исторических данных (СИД). Новый СИД имеет более высокую производительность, большую безопасность, открытость и доступность. Высокая производительность означает сбор данных по событиям со скоростью несколько сотен в секунду. При недоступности БД поток данных направляется в буфер (объем буфера — десятки тысяч переменных), откуда генерируется во временные файлы, которые затем направляются в освободившуюся БД.

Данные СИД доступны различным клиентам благодаря функции репликации (механизм копирования данных из одной БД в другую). Таким образом, если недоступен первый сервер БД, то данные направляются во второй, а при освободившемся первом сервере в него направляются данные со второго сервера.

К другим новинкам относятся: возможность отправки через SMTP-сервер по электронной почте сообщений, в том числе тревожных сообщений, службе поддержки компании; возможность представления нескольких мнемосхем в одном окне; им- порт/экспорт текстовых сообщений на разных языках и др.

SCADA-система PcVue используется в промышленности, строительстве, при автоматизации зданий и в других областях.

### 5.1.3 Clear SCADA. компании *Control Microsystems* (Канада)

ClearSCADA представляет собой программный пакет с расширяемой клиент-серверной архитектурой, соответствующий международным стандартам (OPC, OLE, ODBC, HTTP/XML и др.), и содержит открытые протоколы связи Modbus RTU/ASC II, DNP3 и DF1. Также ClearSCADA поддерживает последовательные интерфейсы (RS-232, RS-422, RS-485), линии радиосвязи, коммутируемые телефонные линии, LAN/WAN и программно совместима с контроллерами SCADAPack.

Доступное число точек ввода/вывода на сервере — 500, 1500, 5000, 25 000 и 50 000. Сервер в базовой конфигурации содержит различные драйверы (Modbus, SCADAPack Modbus, OPC клиент, SNMP, ODBS/SQL и др.), историческую БД, подсистему событий и алармов, систему переадресации данных по E-mail и на пейджер.

ClearSCADA работает с двумя типами клиентов: ViewX и WebX. Клиент ViewX обеспечивает интерфейс пользователя с функциями визуализации и отображения данных на экране, алармов и трендов, ведение журнала событий. Каждый клиент ViewX может одновременно подключаться к 64 системам с различным числом точек ввода/вывода. Интегрированная среда разработки (IDE) позволяет проводить отладку системы в режиме on-line.

Клиент WebX предназначен для контроля и управления SCADA-системой путем Web-технологии через стандартный браузер. Работа с системой осуществляется через безопасное SSL-соединение (Secure Sockets Layer) с использованием логина и пароля.

Интеграция аппаратных средств в ClearSCADA обеспечивается за счет сохранения в БД конфигурации удаленных устройств (RTU), автоматического обновления параметров настройки системы, сохранения данных в исторической БД, синхронизации системного времени и удаленной диагностики. Для программирования контроллеров ClearSCADA имеет пять взаимозаменяемых языков программирования по стандарту IEC 61131-3.

Для ускорения разработки проекта в ClearSCADA имеются шаблоны различных технологических аппаратов (насосы, емкости, дозаторы и пр.), электроаппаратуры, средств связи и сигнализации, а также групповые элементы для оперативного интерфейса верхнего уровня (технологические установки, насосные станции и т.п.).

Высокая надежность ClearSCADA обеспечивается двойным и тройным резервированием серверов, клиентов, средств связи. При обрыве сетевых соединений и их последующем восстановлении все данные в фоновом режиме из буферной памяти RTU/PLC перешлются в БД. Степень безопасности объекта (проекта) обеспечивается различными уровнями доступа пользователей с индивидуальными паролями и системой шифрования паролей. ClearSCADA ведет журнал записи действий пользователей с сохранением информации о категории клиента, его имени и адреса, времени записи и др.

Для работы в сети Internet используется протокол защищенных сокетов (SSL) и личные пароли. Лицензирование ClearSCADA осуществляется через программный или аппаратный ключ. В отличие от ряда других SCADA-систем лицензируется не число тэгов, а число точек ввода/вывода.

### 5.1.4. MX SCADA компании *Mitsubishi Electric* (Япония)

Пакет программ MX SCADA поддерживает распределенную архитектуру клиент-сервер. Интерфейс MX MMI предназначен для визуализации и управления объектами с числом входов/выходов до 300 и используется как в локальной, так и в сетевой версии. Особенностью MX SCADA является наличие обучающих модулей Quick Start, используемых на всех этапах разработки

приложений проекта. MX SCADA имеет встроенную библиотеку графических объектов и технологию Drag&Drop для ускорения разработки приложения.

Разработка экранной графики осуществляется благодаря готовым к использованию символам (dynamos), функции Trend (тренды в режиме реального времени), обработки алармов, парольных сообщений и рецептов.

К компонентам MX SCADA относятся MX SCADA Server, MX Remote, MX TV, MX-View, MX Chart, MX OPC Server, MX Monitor.

MX SCADA Server устанавливается на диспетчерской станции и связана с БД. Сервер используется как в локальной, так и в сетевой версии — для обмена данными с др. SCADA-серверами либо с компонентами MX View, MX TV или MX MMI.

MX Remote — программный пакет доступа удаленных пользователей в систему для получения данных о процессе.

MX TV — программное средство просмотра текущих и исторических данных из реляционной БД, через DDE-сервер, MMI, от видеокамер, а также просмотр ASCII данных.

MX View — клиентское приложение для дополнительных рабочих мест операторов. Каждое клиентское место с установленным MX View связано по сети со SCADA- серверами.

Программные модули MX Chart, MX OPC Server и MX Monitor объединены в пакет коммуникационных утилит MX Components. Отличительные особенности MX Components:

- поддержка Access, Excel, VBA и C++;
- мониторинг состояния ПЛК через HTML-страницы с помощью стандартного Web-браузера;
- мониторинг состояния ПЛК через Internet или Intranet с поддержкой технологии Active Server Pages (ASP);
- поддержка ОС Windows 98/2000/NT V.4/XP.

Подсоединение к ПЛК осуществляется через последовательные порты RS-232/422, Ethernet, CC-Link и сети MELSEC.

MX Chart обеспечивает быстрый доступ к данным через ПЛК с отображением их в MS Excel.

MX OPC Server обеспечивает безопасный доступ контроллеров *Mitsubishi Electric* к любому OPC-совместимому ПО, в том числе к ПО верхнего уровня.

MX Monitor предназначен для разработки графического интерфейса с помощью Visual Basic или C++.

К средствам визуализации *Mitsubishi Electric* также относится GT SoftGOT, разработанное для операторских панелей GOT, но позволяющее разрабатывать операторский интерфейс на персональном компьютере. Это дает возможность использовать возросший объем памяти для хранения информации, возможность обмена данными с MS Excel и др. К числу пакетов визуализации для PC на базе панелей MAC E относится пакет E-View, занимающий промежуточное положение между пакетом для программирования панелей оператора и SCADA-системой. Достоинства пакета: возможность хранения большого объема данных, поддержка E-mail, SMS и FTP. E-View содержит обширную библиотеку объектов, использующих технологию ActiveX.

Программные продукты компании *Mitsubishi Electric* объединены в программном обеспечении MELSOFT — *Mitsubishi Electric* SOFTWARE.

#### **5.1.5. SCADA-система Advantech Studio (AStudio) компании Advantech, Тайвань.**

SCADA-система AStudio является составной частью концепции eAutomation фирмы *Advantech*. Данная концепция базируется на технологии IBM PC-совместимых аппаратных средствах, сети Ethernet и Web-технологии сбора и передачи данных на всех уровнях иерархии системы управления предприятием. Все клиенты, расположенные на нижних и верхнем уровнях производственной структуры, объединены локальной сетью и используют Internet-технологию доступа к данным [5.9].

AStudio поддерживает среду исполнения для ОС Windows 2000/XP и Windows CE для встраиваемых систем. AStudio через встроенный Web-сервер, совместимый с MS Internet Explorer, поддерживает HTML-страницы с передачей по сети или телефонной линии, передачу электронной почты.

AStudio имеет графический редактор и библиотеку графических символов. Имеется возможность построения графиков на основе текущих и исторических данных (трендов), создания гибкой системы формирования отчетов и таблиц, редактирования и загрузки проектов. При использовании языков программирования по МЭК 61131-3 возможно динамическое переключение языка проекта. Также AStudio имеет большую библиотеку встроенных функций для создания скриптов, систему парольной защиты проекта с большим числом уровней доступа (до 256 уровней).

К достоинствам AStudio относятся большое число драйверов (более сотни) для контроллеров основных производителей программно-аппаратных средств. Настройка любого драйвера сопровождается файлом помощи.

Обмен данными между SCADA-системой AStudio и Windows-приложениями осуществляется по протоколам DDE, TCP/IP, ODBC. Также поддерживаются и другие стандарты: OPC, XML, ActiveX и др.

AStudio допускает экспорт и импорт отчетов, конфигурационных профилей и текущих данных в XML-формате, интеграцию с *Microsoft Word* и *Excel*, просмотр одним браузером данных нескольких клиентов, обмен данными в сетях Internet и Intranet и др. AStudio имеет мощную библиотеку математических функций (более 100 функций) и используется в резервированных системах с дублированием модулей, сервера TCP/IP и баз данных. AStudio применяется при автоматизации в средних и малых распределенных системах управления.

#### **5.1.6. SCADA-система ADAM View компании Advantech, Тайвань**

ADAMView — программное обеспечение начального уровня для построения небольших систем сбора, анализа, визуализации данных и управления, работающее под управлением операционных систем Windows 98/NT/2000/XP. Специальная оболочка для построения пользовательских приложений значительно сокращает время их разработки и максимально облегчает этот процесс. Весь процесс разработки сводится к «рисованию» системы на экране с последующей привязкой к физическим каналам ввода/вывода. Для построения комплексных систем и организации сложных алгоритмов обработки данных имеется возможность использования встроенного языка Basic Script.

Открытая архитектура ADAMView позволяет легко интегрировать его с другими приложениями через механизмы OLE, DDE, ODBC.

ADAMView обеспечивает:

- 4.1.14 поддержку до 150 каналов ввода/вывода;
- 4.1.15 легкий для освоения человеко-машинный интерфейс;
- 4.1.16 объектно-ориентированную графику;
- 4.1.17 исторические тренды;
- 4.1.18 возможность генерации отчетов;
- 4.1.19 возможность написания программ на Basic Script;
- 4.1.20 многозадачный режим работы;
- 4.1.21 поддержку механизмов DDE, OLE, ODBC, технологии OPC;
- 4.1.22 лёгкую интеграцию с системами программирования МЭК 61131.

ADAMView является 32-разрядным приложением и обеспечивает многозадачный режим работы при параллельном сканировании задач для повышения эффективности операций ввода/вывода, обновления графической информации на экране и диалог с оператором. Это обеспечивает высокую производительность работы системы.

ADAMView поддерживает спецификацию OPC. Технология OPC обеспечивает возможность использования в системах на базе ADAMView оборудования других производителей (в частности, любых PLC-контроллеров). Для этого достаточно иметь соответствующие OPC-серверы.

Поддержка протокола TCP/IP обеспечивает возможность работы с данными технологического процесса в реальном времени с любого узла сети через Internet, а также дистанционное управление процессом.

SCADA-система ADAMView поддерживает работу с контроллерами ADAM серий 4000, 5000 и 6000 и включает базу данных на 150 точек ввода/вывода, драйверы и OPC сервер.

#### **5.1.7. SCADA-система Vijeo Look компании Schneider Electric, Франция**

Vijeo Look базируется на открытых международных стандартах, среди которых компоненты ActiveX (включая WEB браузер) и Java Bean, использующие объектно-ориентированный подход, встроенный сервер OFS (OPC Factory Server), ПО *Microsoft VBA*, интерфейс ADO (Active Data Object) доступа к БД и др. ПО Vijeo Look позволяет сохранять все переменные, поступающие через OPC-сервер в БД и включает в себя поддержку реляционной БД MSDE (*Microsoft Data Engine*), поставляемой с Vijeo Look, для доступа к которой используется ПО *Microsoft Access*. БД MSDE позволяет сохранять объем данных до 2 Гбайт (около 5,5 млн записей).

Стандарт ActiveX обеспечивает взаимодействие программных компонентов, расположенных как на одном PC так и на удаленных PC, объединенных сетью. Архитектура компонентов Java Bean позволяет использовать сети с разнородными ОС и аппаратными средствами. Можно связывать свойства компонентов ActiveX и Java Beans со значениями переменных сервера OPC, в частности сервера данных OFS. Доступ к свойствам компонентов ActiveX, переменным OPC и компонентам среды проекта осуществляется с помощью языка MS VBA, который поставляется с ПО Vijeo Look.

SCADA-система Vijeo Look предназначена для работы на PC с ОС Windows 2000/ XP и поддерживает контроллеры *Schneider Electric*: Twido, TSX Micro, Modicon Premium/ Atrium/Quantum/Momentum.

SCADA-система Vijeo Look используется для малых систем визуализации и рассчитана на 128, 512 или 1024 точек ввода/вывода. Тем не менее, Vijeo Look имеет все необходимые функции SCADA-систем, используемых в больших системах.

Функции визуализации используются для отображения на экране переменных, считываемых из ПЛК, для архивирования переменных в БД и программной обработки данных. Переменные могут быть представлены в виде значений, исторических и текущих трендов, анимированной цветной графики и т. д. Приложения Vijeo Look разрабатываются с помощью программы Конфигуратор (Configuration Explorer). Связь с ПЛК устанавливается после выбора файла переменных, протокола связи и адреса ПЛК. Программа может быть использована для редактирования переменных, конфигурации дополнительных серверов OPC и БД, создания переменных для трендов и пр. Все переменные в окне Configuration Explorer делятся на следующие типы: HMI, диагностические и АПС (Аварийно-Предупредительная Сигнализация), встроенной обработки, переменные архивов и трендов.

Для создания графических объектов используются следующие инструменты: библиотеки графических объектов, компоненты ActiveX и Java Bean, собственные графические элементы Vijeo Look, функции Zoom (увеличение) и Panoramic (панорама), тренды и др. Библиотека графических объектов включает около 100 двух- и трехмерных графических объектов. Библиотека дополнена набором специфических символов (конвейеры, PID, пиктограммы компонентов *Schneider Electric* и др.). Все эти объекты являются готовыми к привязке к переменным ПЛК. ПО Vijeo Look позволяет создавать до 8 независимых трендов в одном окне просмотра. Тренды реального времени отображают данные из БД. Частота обновления данных задается при конфигурировании.

Функция управления производственными рецептами поддерживает до 1000 рецептов для каждого приложения (в каждом рецепте допускается до 1000 элементов). Помимо возможности создания, рецепты могут быть сохранены или экспортированы в другие приложения.

ПО Vijeo Look устанавливается на одной рабочей станции и используется как в локальной, так и в сетевой версии. Подключение к сетям Ethernet, Modbus Plus и Fip-Way осуществляется с помощью соответствующих сетевых карт, а к шинам Modbus и Uni-Telway — с помощью интерфейсов RS-232 или RS-485.

Помимо функций визуализации Vijeo Look обладает функциями диагностики, обработки, коммуникации, записи в БД и трассировки, печати сообщений АПС и функцией безопасности.

К функциям диагностики относятся управление, визуализация и квитирование переменных типа АПС, диагностика для сетевых модулей Ethernet TCP/IP для платформ Micro, Premium, Quantum и Momentum. Переменные сохраняются в блоке памяти ПЛК (Diag Buffer). Встроенное программное средство Diag Viewer предоставляет оператору инструмент для наблюдения за состоянием системы.

Функция обработки позволяет назначить любому графическому объекту анимацию (вращение, перемещение, изменение размера и пр.), написанную на языке VBA. Имеется возможность встраивания программы на языке VBA в приложение системы визуализации.

Поскольку Vijeo Look имеет архитектуру клиент-сервер, то возможен удаленный или локальный обмен данными с другими приложениями, сбор и пересылка данных с ПЛК. Данные поступают через коммуникационный сервер OPC, который имеет прямой доступ к БД PB Vijeo Look. Так как Vijeo Look является одновременно сервером и клиентом OPC, это позволяет SCAD-приложениям обмениваться данными с ПЛК и другими программными продуктами, имеющими интерфейс OPC.

Функция записи переменных в БД и трассировки (контроль изменения данных во времени) позволяет записанные в БД данные экспортировать в форматах CSV (Comma Separated Values) или XML. Значения переменных записываются в БД по изменению их состояния или периодически. При этом имеется возможность выбора типа БД, размещения БД и наименования таблицы БД. Поскольку используется реляционная модель БД, для записи необходим минимальный объем памяти (атрибуты переменных, не изменившихся за определенный промежуток времени, записываются только один раз). Все данные в БД записываются в символьной форме по имени объекта (клапан, насос, расход, температура и т. д.). Из баз данных используются БД MSDE или др. стандартные БД (MS SQL Server, ORACLE, SYBASE и др).

Функция безопасности определяется идентификацией пользователя по имени и паролю, а также по уровням доступа. ПО Vijeo Look допускает возможность работы только одного пользова-

теля в каждый момент времени. HMI базируется на системе пользовательских профилей безопасности, связанных с графическими объектами (окно, анимация, поле ввода и т. д.). Каждый объект имеет список авторизованных профилей.

SCADA-система Vijeo Look осуществляет сбор, визуализацию архивирование данных на одном и том же PC, поэтому рекомендуется не завышать частоту сбора данных, количество переменных для хранения в БД и число обрабатываемых сигналов АПС. Дальнейшее развитие возможностей SCADA-системы реализовано в SCADA-системе Vijeo Citect Lite, приходящей на смену Vijeo Look.

#### **5.1.8. SCADA-система Monitor Pro v7.2 компании Schneider Electric, Франция**

ПО Monitor Pro v7.2 имеет архитектуру клиент-сервер и предназначено для визуализации и диспетчерского управления средних и больших распределенных систем управления.

В состав ПО Monitor Pro v7.2 входит база данных MS SQL Server 2000 и коммуникационные протоколы *Schneider Electric*, в том числе OPC-сервер (OFS).

К др. средствам коммуникации относятся сетевые протоколы Modbus TCP/IP, Modbus Plus и FipWay.

Monitor Pro v7.2 является многопользовательским SC AD A-приложением, работающим на платформах Windows 2000/XP. В зависимости от масштаба системы управления предлагаются исполнения на число точек ввода/вывода от 300 (4800 переменных) до 50000 (800 тыс переменных). Учитывая открытость Monitor Pro, возможна работа системы с ПЛК сторонних производителей, для чего поставляются (вместе с Monitor Pro v7.2) коммуникационные драйверы для связи с устройствами сторонних производителей.

Monitor Pro имеет функцию обмена информацией между несколькими серверами в общей структуре (функция VRN — Virtual Real-time Network, виртуальная сеть реального времени). Каждая станция может быть сервером для одних и клиентом для других станций в сети. Также имеется функция VRR (Virtual Real-time Redundancy — виртуальная сеть реального времени с резервированием), с помощью которой можно построить систему с резервированием серверов.

Функция визуализации Monitor Pro использует объектно-ориентированный редактор, работающий в среде Windows, состоящий из Построителя (Client Builder) и конфигуризатора (Configuration Explorer).

Для ускорения разработки проекта Client Builder использует объектно-ориентированную графику, библиотеку стандартных объектов, контейнеры объектов ActiveX и Java Bean, набор готовых компонентов ActiveX для просмотра журнала АПС, трендов и БД. Для любого графического объекта может быть задана анимация, написанная на языке VBA.

Configuration Explorer поддерживает одновременную разработку приложения с нескольких сетевых станций, тем самым допуская доступ одного пользователя к нескольким серверам и нескольким пользователям к одному серверу Monitor Pro v7.2.

Управление безопасностью в Monitor Pro аналогично модели безопасности Windows NT. После создания пользовательских учетных записей (имя и пароль) каждой учетной записи назначается профиль, который определяет видеокadres, слои и графические объекты в слоях. Доступ пользователя к разрешенному ему профилю осуществляется в режиме РВ, редактирования или с рабочего стола через иконку.

При разработке системы визуализации с помощью Client Builder используется БД РВ, находящаяся в оперативной памяти сервера. Все задачи приложения (математическая обработка данных, отчеты, коммуникации API, интерфейс ODBC и др.) используют информацию БД, считывая и записывая в нее данные. Клиентское приложение подключается к серверам приложения через интерфейс OPC клиента в режиме РВ. Таким образом, БД РВ, расположенная в оперативной памяти RAM, является ядром ПО визуализации Monitor Pro.

БД РВ содержит данные следующих типов: двоичные данные, слова (16 бит), двойные слова (32 бита), значения с плавающей точкой (64 бита) и строковые переменные (до 256 бит).

Функция диагностики определяет режим генерирования сигналов АПС, их отображение с использованием ActiveX, архивирование, печать в реальном времени, квитирование АПС, а также создание распределенной БД АПС. Отображение сигналов АПС осуществляется через интерфейс Diag Viewer блока Diag Buffer.

Данные с любого сервера Monitor Pro могут быть отображены в виде трендов реального времени и исторических трендов. Последние выбираются из архива реляционной БД. Число переменных в окне трендов и число окон неограниченно. Управляющие элементы ActiveX связаны с реляционной БД через независимый сервер трендов, встроенный в Monitor Pro. От сервера трендов данные поступают клиенту ActiveX.

Доступ к реляционной БД осуществляется с помощью интерфейса ODBC. В качестве реляционной БД используется SQL Server 2000, поставляемый с Monitor Pro, или стандартные БД с интерфейсом ODBC (Dbase IV, Oracle, Sybase и др.). В свою очередь БД РВ по интерфейсу обмена информацией с реляционными БД имеет возможность читать и обновлять таблицы реляционной БД. Среди клиентских задач, имеющих доступ к реляционной БД, основными являются архивирование А ПС, сохранение и просмотр данных, ведение журнала трендов и др.

Функция рецептов Monitor Pro может управлять до 1000 различных типов рецептов (8000 элементов БД для каждого рецепта).

Функция генератора отчетов поддерживает печать данных из БД в нужном формате. Отчеты могут передаваться по сети или сохраняться на жестком диске в формате ASCII.

С 2007 г. компания *Schneider Electric* рекомендует преимущественное использование SCADA-системы Vijeo Citect<sup>1</sup> v7.0, имеющей определенные преимущества перед Monitor Pro v7.2.

#### **5.1.9. SCADA-система RSVIEW32 компании Rockwell Automation, США**

RSView32 — это интегрированное, основанное на компонентах программное обеспечение человеко-машинного интерфейса (HMI) для контроля и управления автоматизированными устройствами и процессами. RSVIEW32 создана с использованием открытых технологий, которые обеспечивают максимально эффективную связь с другими продуктами Rockwell Software, продуктами *Microsoft* и сторонними приложениями.

RSView32 — программный продукт HMI, в котором использованы следующие преимущества передовых технологий фирмы *Microsoft*:

4.1.23 Открытие графических дисплеев в виде OLE контейнеров для элементов управления ActiveX, что дает возможность встраивать в собственные проекты уже готовые решения, выбирая их из элементов управления ActiveX сторонних поставщиков.

4.1.24 Разработка моделей объекта для выделения отдельных частей его основных функциональных возможностей, что позволяет RSVIEW32 легко взаимодействовать с другими программными продуктами, основанными на компонентах.

4.1.25 Использование языка Visual Basic for Applications (VBA) фирмы *Microsoft* в качестве встроенного языка программирования

4.1.26 Поддержка стандартов OPC как для сервера, так и для клиента, с целью осуществления быстрой и надежной связи с аппаратными устройствами различных поставщиков.

Реализация технологии Add-On Architecture (AOA) для расширения функциональных возможностей RSVIEW32 и интеграции новых свойств в ядро RSVIEW32.

SCADA-система RSVIEW32 предлагает уникальный набор инструментов для повышения производительности, в том числе имитация выполнения при разработке посредством нажатия кнопки, редактирование отдельных объектов в группе без нарушения группы или влияния на анимацию, движение и перетаскивание объектов с помощью ПО Object Smart Path.

Также RSVIEW32 имеет возможность представления множества механизмов с помощью одного графического дисплея, используя метки-заполнители тегов и файлы параметров, быстрой замены имен тегов и символьных строк с помощью подстановки тегов, простой импорт графики, разработанной в других приложениях для создания изображений.

RSView32 с помощью интерактивных справочных систем RSVIEW32, учебников и проектов-примеров позволяет получить необходимую помощь при разработке проектов.

#### **5.1.10. SCADA-система Elipse E3 компании Elipse Software, Бразилия**

Elipse E3 — программный продукт, представляемый на рынке компанией Elipse Software с 2001 г. Описание предыдущей SCADA-системы этой компании Elipse Windows приведено в [ 2.9].

Elipse E3 является объектно-ориентированной SCADA-системой, основанной на концепции «Application Domain», которая содержит большой объем графических объектов и поддерживает работу с EITML страницами через Интернет и Интранет.

Аналогично с другими SCADA-системами Elipse E3 поддерживает форматы баз данных (MS SQL Server, Oracle, MDB), использует базы данных для формирования отчетов, архивов, трендов, алармов, рецептов и пр. Возможна интеграция любых ActiveX-объектов в создаваемое приложение или библиотеку. Обеспечивается полностью безопасная среда выполнения, управляющая доступом пользователя к окнам и экраным объектам (функция Security). К числу других функций системы относится функция Hot-Standby — поддержка дублирующих устройств, которые активизируются в случае отказа первичных серверов.

Elipse E3 основана на клиент-серверной архитектуре с поддержкой стандартов OPC, ODBC, DDE и др. и выпускается в 3-х версиях: E3 Studio (содержит ядро системы E3 Server), E3 Server

5000 (поддержка 5000 точек ввода/вывода) и Unlimited E3 Server (поддержка до 1 млн точек ввода/вывода).

В состав E3 Server входят приложения Viewer (визуализация и управление), I/O Driver (связь с устройствами ввода/вывода), DB Server (управление базами данных), Scripts (поддержка языка программирования VBScript), Reports (средство для создания отчетов), OPC Client (поддержка OPC, как клиент) и E3 Web Server (обмен данными через Internet с использованием навигатора Internet Explorer. Возможна работа SCADA-системы при создании проекта на различных компьютерах.

Приложение E3 Server и E3 Studio работают на платформах *Microsoft* Windows 2000/XP, а E3 Viewer на любом ПК под управлением ОС Windows 98/Me/NT 4.0/2000/ XP. Требования для установки системы под Windows 2000/XP: процессор Celeron, Pentium **II** или выше; RAM — 128 Мбайт, HDD — 100 Гбайт свободного места, IxLPT порт, сетевая и видеокарта.

### 5.2. Методика выбора SCADA-систем

Рассмотрим основные показатели, определяющие выбор той или иной SCADA- системы:

- Максимальная гибкость, в том числе масштабируемость и открытость SCADA- системы (поддержка механизма взаимодействия OPC, основанного на объектной модели COM/DCOM, а также других стандартов).
- Соответствие функциональным требованиям разрабатываемой АСУ ТП, высокие технические характеристики, поддержка аппаратных средств (контроллеров, интеллектуальных датчиков и компонентов УСО); удобство интерфейса оператора.
- Степень сложности и эффективности разработки ПО, затраты времени на разработку, инструментальные возможности разработки баз данных, качество графического редактора (палитра, тренды и пр.).
- Качество, полнота и доступность технической документации, ее русификация, наличие помощи (help) и учебных пособий, удобный пользовательский интерфейс, наличие демоверсии, возможность сопровождения и обучения, процедура обновления приобретенного ПО и др.
- Известность торговой марки, отзывы пользователей о работе SCADA-системы по данным эксплуатации на производстве.
- Возможность интеграции с корпоративными системами верхнего уровня, в том числе возможность интеграции с продуктами смежного назначения— СУБД, бухгалтерскими и складскими программами, электронными таблицами и др.
- Надежность, возможность работы на опасных производствах с большим числом контролируемых параметров, устойчивость к сбоям внешних компонентов системы и ошибочным действиям персонала.
- Стоимость пакета и совокупная стоимость проекта, цена лицензии на исполнительные модули пакета (run-time модули). В этот показатель входят зависимость цены от числа тэгов, при необходимости — стоимость обучения, обновления и сопровождения пакета. Процедура лицензирования пакета косвенным образом влияет на выбор системы. Программный ключ в случае повреждения жесткого диска должен быть обновлен за пониженную плату. Поэтому защита системы электронным ключом более предпочтительна с точки зрения переноса продукта с одного компьютера на другой в режиме реального времени, хотя и налагает дополнительные требования сохранности ключа.

Помимо этих функций не менее важной характеристикой является производительность ПО, в частности СУБД, а также наличие функций ускорения разработки проекта (автопостроение БД РВ, наличие библиотек алгоритмов контроля и управления, сквозное программирование системы и пр.).

Здесь же следует отметить и возможность взаимодействия SCADA-системы с системами управления, предполагаемыми к установке или уже функционирующими на объекте. Большинство производителей SCADA-систем обеспечивают свои продукты драйверами, позволяющими им беспрепятственно вписываться в уже существующие системы управления, взаимодействуя с установленным оборудованием и программным обеспечением.

На некоторых предприятиях та или иная SCADA-система принята в качестве корпоративного стандарта (например, InTouch на предприятиях Лукойл, iFIX на ПО «Пикалевский глинозем», Trase

Mode на комбинате «Североникель»), на других — в системах управления технологическими процессами используются различные SCADA-системы.

### 5.3. OPC-стандарт взаимодействия SCADA-систем и ПЛК

Стандарт OPC (OLE for Process Control) — это стандарт взаимодействия между программными компонентами системы сбора данных и управления, основанный на объектной модели COM/DCOM фирмы *Microsoft*. Стандарт установлен Международным комитетом OPC Task Force. Стандарт OPC приходит на смену DDE-обмена (Dynamic Data Exchange) — динамического обмена данными. COM (Component Object Model) — модель многокомпонентных объектов, позволяющая приложению вызывать те или иные функции объекта, находящегося в адресном пространстве приложения. Если объект распределен по сети или находится в другой программе того же компьютера, то мы имеем распределенный COM (Distributed COM) или DCOM. Таким образом, DCOM является по сути сетевым расширением COM.

OPC-технология создана консорциумом *OPC Foundation*, куда входят более 170 ведущих производителей аппаратно-программных средств промышленной автоматизации. Среди них фирмы *Siemens, Fisher-Rosemount, Honeywell, Rockwell Automation, Iconics* и др. Деятельность OPC Foundation осуществляется в рабочих группах по направлениям (OPC Data Access Working Group, OPC Alarm and Events Working Group, OPC Historical Working Group, OPC Security Working Group, OPC Windows CE Working Group и др.) [5.16, 5.17].

OPC-взаимодействие основано на клиент-серверной архитектуре. В качестве OPC-клиента выступает, например, SCADA, а в качестве OPC-сервера — контроллеры, УСО и пр. Основные производители SCADA- систем поддерживают технологию OPC. Это SCADA-системы Genesis32 (фирма *Iconics*), iFIX (фирма *Intellution*), Factory Suite (фирма *Wonderware*) и др. При этом все компоненты SCADA- систем могут взаимодействовать между собой через OPC, выполняя функции в зависимости от задачи либо сервера, либо клиента.

OPC-серверы разрабатываются и поставляются производителями контроллеров и др. аппаратуры или поставщиками SCADA-систем.

Стандарт OPC включает 3 спецификации [5.16]:

- 4.1.27 Доступ к данным реального времени (Data Access) или стандарт DA.
- 4.1.28 Обработка тревог и событий (Alarm&Events) или стандарт A&E.
- 4.1.29 Доступ к историческим данным (Historical Data Access) или стандарт HDA.

OPC-серверы физических устройств (контроллеров) являются, как правило, серверами данных (Data Access Servers).

Сервер тревог по состоянию тега, полученного от сервера данных, оповещает клиентов, посылая сигнал тревоги, и получает от клиентов подтверждение полученного сигнала.

Серверы исторических данных также используют данные, получаемые в реальном времени от сервера данных, и архивируют их, предоставляя затем эти данные другим приложениям для построения, например, трендов, гистограмм или таблиц.

Помимо этих основных спецификаций стандарта OPC существуют и ряд других спецификаций. Так, отдельный класс OPC-серверов представляют специализированные OPC-серверы конкретных аппаратных устройств [5.18, 5.19].

Рассмотрим работу OPC-сервера в клиент-серверной архитектуре.

При использовании COM/DCOM технологии реализуется информационный обмен между COM-объектами. Вызов любой функции объекта осуществляется через COM-интерфейс, представляющий определенную структуру памяти, содержащую массив указателей на все функции интерфейса. Этот вызов реализуется через агента-посредника, так называемого Proxy/Stab DLL, представляющего функции объекта. Модуль Proxy («заместитель») принадлежит клиенту, а модуль Stab (заглушка) расположен в сервере. Proxy реагирует на запрос клиента, кодируя и пакетируя параметры функции, после чего передает их по каналу серверу. На стороне сервера модуль Stab распаковывает вызов клиента и передает его серверу, заставляя реальный объект выполнить заданную функцию. Результат выполнения функции возвращается обратно приложению-клиенту. Этот процесс получил название «маршалинг» (*marshaling* — транспортировка). Основной спецификацией OPC является спецификация Data Access (DA). Базовым понятием спецификации является элемент данных (OPCItem-объект), т. е. фактически один из параметров технологического процесса, имеющий значение (Data Value), время последнего обновления (Time Stamp) и признак качества (достоверности) значения (Quality). Следующим вверх по иерархии является понятие группы элементов (OPC Group-объект) — создается OPC-сервером по требованию клиента, который

задает частоту обновления данных этой группы. Для каждого клиента сервером создается своя группа. Элементы в группе имеют имена, которые являются по сути именами реальных переменных (тегов). Имена тегов клиентом запрашиваются по специальному интерфейсу OPCBrowseServerAdressSpace.

На верхней ступени иерархии находится сам OPCServer-объект. Для подключения OPC сервера к реальному объекту OPCItem-объекты содержат ссылки на созданные OPC-сервером теги. Пример полного имени тега: Контроллер\_1. Модуль\_2. Аналоговый вход\_1.

Обмен данными между клиентом и OPC-сервером может быть в трех режимах: синхронный режим чтения/записи данных, асинхронный режим чтения/записи данных, режим подписки (только чтение данных).

При синхронном режиме OPC-клиент запрашивает у OPC-сервера интересующие его переменные и находится в режиме ожидания. После выполнения запроса OPC-клиент считывает значения переменных.

При асинхронном режиме обмена OPC-клиент запрашивает у OPC-сервера значения переменных с заданной частотой обновления данных, определенной при создании OPCGroup, и продолжает работать. После выполнения запроса OPC-сервер сам оповещает об этом OPC-клиента. Этот режим является наиболее распространенным в силу экономии вычислительных ресурсов и времени.

Режим подписки аналогичен асинхронному режиму с той лишь разницей, что OPC-сервер посылает OPC-клиенту уведомление лишь в случае изменения значений переменных. Передача этих данных осуществляется единым блоком для снижения временных затрат, что особенно важно при обмене по сети.

Одной из основных характеристик OPC-сервера является его производительность. Известны три вида OPC-серверов в зависимости от их местонахождения:

- Внутрizaдачный OPC-сервер (InProcess Server), находящийся в адресном пространстве OPC-клиента. Этот OPC-сервер оформлен, как динамическая библиотека (DLL), а не как самостоятельная программа.
- Локальный OPC-сервер (Local Server) — сервер работает в отдельной самостоятельной программе того же компьютера, в котором расположен OPC-клиент.
- Удаленный OPC-сервер (Remote Server) расположен на другом (удаленном по сети) компьютере.
- Естественно, производительность внутрizaдачного сервера выше локального, а последнего — выше, чем удаленного. Однако другим важным фактором, влияющим на производительность OPC-сервера, является возможность группировки данных, отправляемых OPC-клиентам. Так, по данным Web-узла OPC Foundation ([www.opcfoundation.org](http://www.opcfoundation.org)) предельная пропускная способность внутрizaдачного сервера (процессор Pentium 233 МГц) составляет до 1 млн элементов OPC в секунду, что является вполне достаточным для подавляющего числа процессов.
- Пропускная способность локального OPC-сервера составляет от 3000 до 60 000 элементов в секунду. Для удаленного OPC-сервера по сети
- Ethernet 10 Base-T пропускная способность колеблется от 330 до 7000 элементов в секунду. Типовая структура OPC-сервера с открытой архитектурой представлена на рис. 5.1 [5.18].

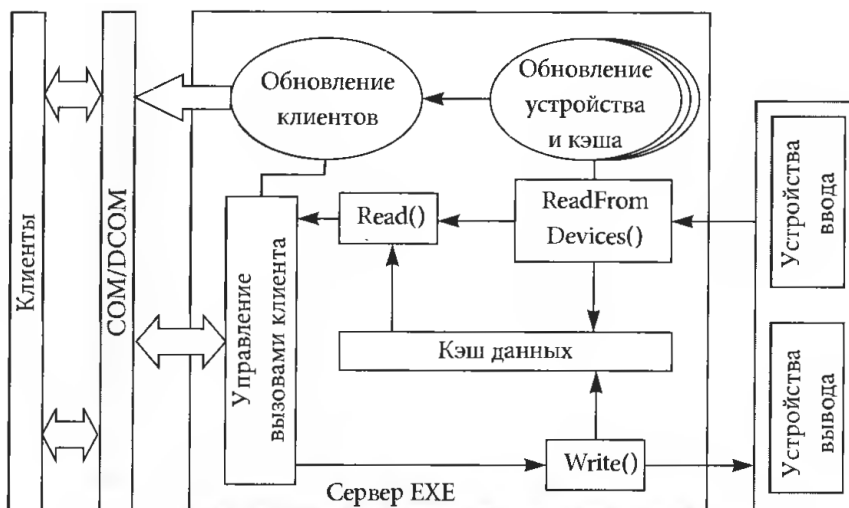


Рис. 5.1

Открытая архитектура OPC-сервера предусматривает возможность его работы (после небольшой доработки) с любым аппаратным или программным средством, поддерживающим технологию OPC. Чтение данных с устройств ввода или прямо из кэш-памяти данных осуществляется с помощью функции Read(). В свою очередь функция ReadFromDevicesO опрашивает устройство ввода и передает данные OPC- клиенту. Функция Write() служит для записи данных OPC-клиента на устройство вывода и/или в кэш-память данных. Функции обновления устройства ввода, кэшпамяти данных и OPC-клиентов осуществляются с частотой, заданной клиентом при формировании OPCGroup.

Таким образом, разработчик АСУ ТП при выборе SCADA-системы, контроллеров и другой аппаратуры, поддерживающих технологию OPC, может рассчитывать на взаимопонимание компонентов системы. К сожалению, при наличии в системе аппаратных средств других фирм, интерфейсы которых не поддерживают OPC-взаимодействие, использование их в сетевом обмене данными затруднен. В этом случае требуется разработка специализированных OPC-серверов, обладающих свойствами открытости. При этом разработчик (пользователь) должен написать динамическую библиотеку (DLL), содержащую полный код, необходимый для управления конкретным устройством, либо обеспечить связь с соответствующей DLL, поставляемой производителем этого устройства.

Специализированный OPC-сервер разрабатывается на основе программной заготовки, созданной некоторыми фирмами. Так, фирма *Iconics*, изначально спроектировавшая SCA DA-систему у Genesis32 на основе OPC-технологии, предлагает OPC ToolWorX, оформленный в виде дополнительного мастера в Wizard, который встроен в среду разработки Visual C++. Мастер генерирует проект, в котором требуется выполнить модификацию фрагментов кода, связанных со спецификой обслуживаемого устройства нижнего уровня.

Так на базе Iconics ToolWorX создан универсальный OPC-сервер/Universal OPC Server фирмы *Fastwel*. Этот OPC-сервер предусматривает подключение динамической библиотеки (DLL), написанной пользователем для конкретного устройства. Недостатком OPC-сервера служит то, что клиент получает данные из внутреннего буфера DLL, а не непосредственно от устройства ввода, что служит причиной некоторой временной задержки обмена данными. Эти недостатки устраняются в предлагаемых структурах OPC-серверов, описанных в работах [5.18, 5.19].

Для разработки OPC-сервера в АСУ ТП, использующей SCADA-систему FIX Dynamics, целесообразно использовать пакет для разработки OPC-приложений фирмы *Intellution*.

#### **5.4. Базы данных и системы управления базами данных.**

##### **5.4.1. Модели баз данных.**

Выполнение прикладных программ предусматривает преобразование и логическую обработку данных, их хранение, защиту и архивацию в базе данных (БД), а также взаимодействие прикладной программы с файловой системой операционной системы компьютера. Любое вновь созданное приложение выполняется в архитектуре клиент-сервер [5.20-5.27].

Системой баз данных<sup>2</sup> называют компьютерную систему хранения однотипных записей. Известны однопользовательские БД (single-user system) и многопользовательские БД (multi-user system). Все данные в БД являются интегрированными (представляют совокупность файлов данных) и

разделяемыми (с возможностью использования одних и тех же данных разными пользователями). Обработка всех запросов пользователей к БД осуществляется программным обеспечением, которое принято называть диспетчер базы данных (database manager), сервер базы данных (database server) или, как принято в настоящее время, система управления базой данных — СУБД (DataBase Management System — DBMS). Под СУБД понимают совокупность языковых и программных средств, предназначенных для создания, ведения и совместного использования БД многими пользователями. Большинство СУБД имеют встроенный язык запросов (SQL).

Основные достоинства БД: возможность совместного доступа к данным разных пользователей, сокращение избыточности данных, возможность поддержки транзакций, обеспечение целостности данных, организация защиты данных, возможность стандартизации данных и др.

Трехуровневая система организации БД по стандарту ANSI (American National Standards Institute — Американский национальный институт стандартов) приведена на рис. 5.2.

Архитектура системы БД представляет три уровня: внутренний или физический, концептуальный или логический и внешний или пользовательский).

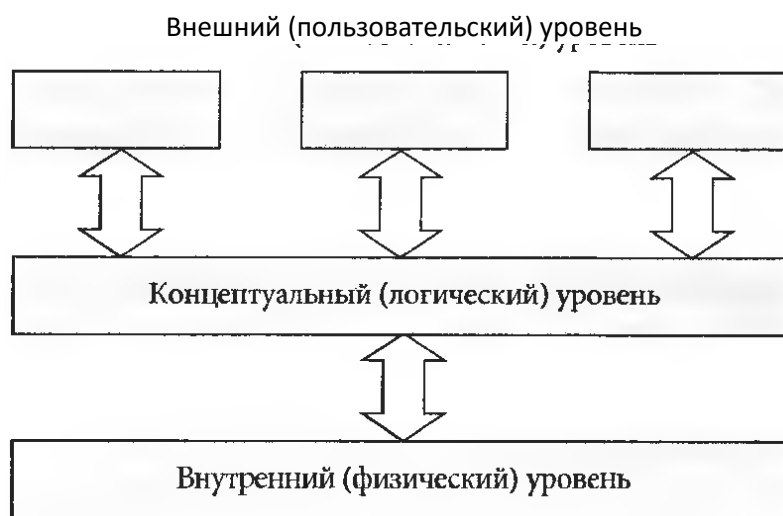


Рис. 5.2

Внутренний уровень — это внутреннее представление всей БД в виде внутренних (храняемых) записей. Данные размещаются в файлах или на внешних носителях. Внутреннее представление предполагает наличие неограниченного адресного пространства.

Концептуальный (логический) уровень представлен реляционными таблицами и операторами выборки строк и столбцов таблиц. Таким образом, это уровень реляционной модели данных. Внешний (пользовательский) уровень — это индивидуальный уровень пользователей.

Доступ к данным БД происходит в следующей последовательности: пользователь на языке SQL выдает запрос на доступ к БД; СУБД перехватывает и анализирует запрос; СУБД просматривает внешнюю и концептуальную схемы, а также структуру хранения данных и выполняет необходимые операции в хранимой БД с преобразованием типов данных.

Если доступ к данным сервера осуществляется на уровне файлов с разделением доступа средствами ОС, то такие приложения построены по типу «файл-сервер».

Недостатками таких приложений является высокая нагрузка на клиентскую часть, трудность разделения доступа при работе нескольких пользователей, высокая нагрузка на сеть при передаче файлов от одного компьютера к другому. К файловым структурам хранения информации в базе данных относятся файлы прямого доступа, файлы последовательного доступа, индексные файлы, инвертированные списки и взаимосвязанные файлы.

К файлам прямого доступа относят файлы с постоянной длиной записи, расположенные на устройствах прямого доступа (УПД).

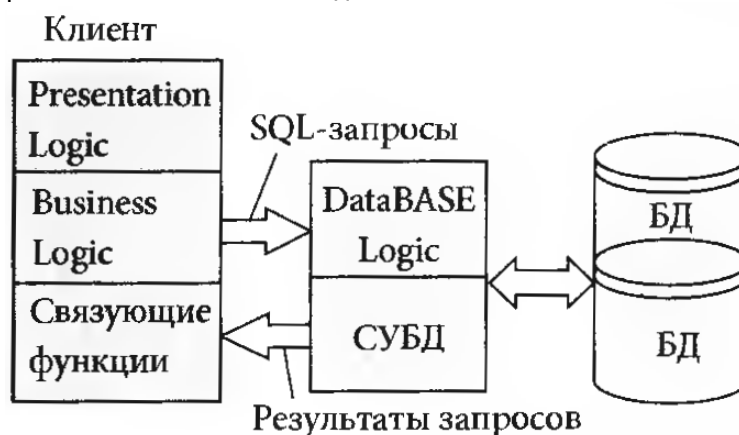
Индексные файлы состоят из индексной области (индексного файла) и основной области (основного файла). Инвертированные списки представляют собой трехуровневую структуру, начальный файл (или часть файла) которой содержит значение вторичного уровня (ключа). На втором уровне — блоки с номерами записей одинаковых значений вторичного ключа и на третьем уровне — основной файл.

Управление файловой структурой относится к ОС и в сравнении с СУБД имеет следующие недостатки: система управления файлами не имеет сведений о внутренней структуре записей; система защиты и поддержки целостности записей недостаточна или отсутствует; восстановление данных и параллельный доступ к данным затруднен или отсутствует; отдельные файлы не являются «интегрированными» или «разделяемыми».

В распределенных системах управления база данных используется многими пользователями, поэтому имеет место распределенная обработка данных. Если база данных распределена по нескольким компьютерам и используется многими пользователями, то такая система называется системой распределенных баз данных. Достоинства распределенной обработки данных [5.24]:

- возможность параллельной обработки данных и, как следствие, увеличение скорости обработки.
- серверный ПК может быть изготовлен более мощным по производительности.
- клиентский ПК может быть максимально приближен к потребностям конкретного пользователя для увеличения сроков его готовности.

В распределенной клиент-серверной архитектуре доступа к данным функции между клиентским и серверным приложениями распределяются нижеследующим образом [5.24]. Функции ввода и отображения данных (Presentation Logic) и прикладные функции (Business Logic) находятся на стороне клиента, а функции обработки данных внутри приложения (Database Logic). Также БД с ядром СУБД находятся на стороне сервера. Двухуровневая модель удаленного доступа к данным RDA (Remote Data Access) представлена на рис. 5.3. К недостаткам модели RDA относятся большая загрузка клиентского приложения и сети обмена данными.



**Рис. 5.3**

Современные СУБД поддерживают трехуровневую модель «клиент-сервер», представленную на рис. 5.4. В основе модели лежит механизм процедур— специальных программных модулей, хранящихся в БД и управляемых непосредственно СУБД.

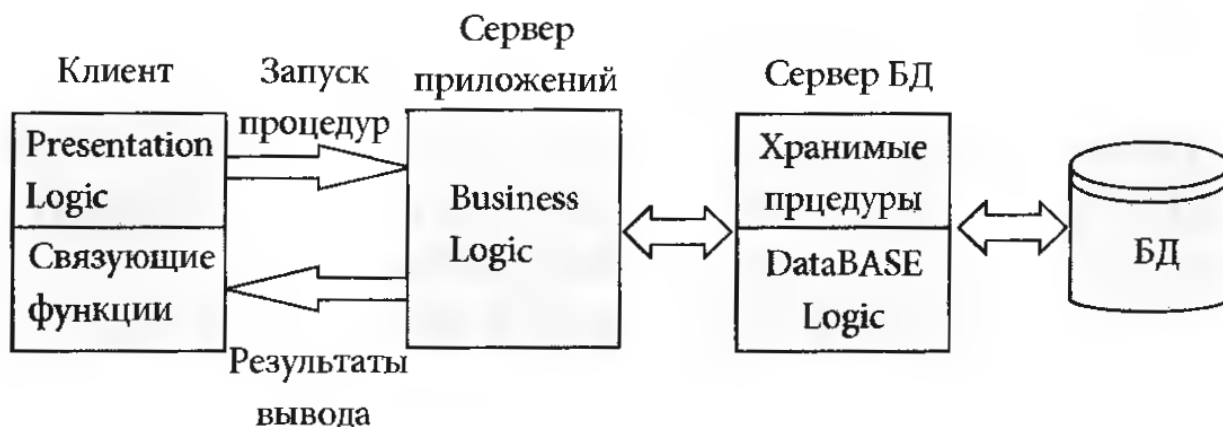


Рис. 5.4

На стороне клиента сохраняются только функции ввода и отображения данных. Такой разгруженный клиент называется «тонким клиентом». Промежуточный уровень между клиентом и сервером занимает сервер приложений с прикладными функциями. При этом сервер БД выполняет исключительно функции СУБД — создание и ведение БД, хранение данных, создание резервных копий, управление транзакциями.

Хранимые процедуры (Stored Procedure) в сервере БД являются подпрограммами, которые выполняются на сервере. Они пишутся на специальных встроенных языках программирования и включают любые операторы языка SQL (Structured Query Language — Структурированный Язык Запросов). В коммерческих СУБД используются собственные языки программирования (PL/SQL в Oracle, Transact SQL в MS SQL Server).

В современных БД организация взаимодействия клиент-сервер осуществляется с использованием мультипроцессорных серверных платформ. При этом достигается возможность запуска нескольких серверных процессов на различных процессорах многопроцессорного сервера.

Многопоточная мультисерверная архитектура представлена на рис. 5.5 [5.22].



Рис. 5.5

Одним из важнейших показателей надежности БД является степень защиты информации. Так, в БД MS SQL Server 6.5 поддерживаются несколько режимов проверки прав пользователя, — стандартный (Standard), интегрированный (Integrated Security) и смешанный (Mixed).

Стандартный режим предполагает наличие у пользователя учетной записи пользователя домена NT Server и MS SQL Server (имя пользователя и пароль).

Интегрированный режим предполагает наличие учетной записи в ОС как пользователя только домена (задается имя пользователя и пароль).

БД MS SQL Server 7.0 имеет два режима: интегрированный (Windows NT Authentication Mode) и смешанный (Mixed Mode). При этом последовательно проводятся проверки имени пользователя и пароля.

Для защиты закрытых сетей (особенно intranet) от несанкционированного доступа со стороны пользователей Internet используются системы, которые называются брандмауэр (Firewall). Все сообщения, которые входят или выходят из сети Intranet, проходят через брандмауэр.

Основные типы брандмауэров:

- Пакетный фильтр. Просматривается каждый пакет на соответствие его определенным пользователем правил.
- Шлюз приложения. Применяется для серверов FTP и Telnet.
- Шлюз на уровне цепи. Проверяется безопасность на уровне TCP или UDP соединения. После соединения пакеты передаются без проверки.
- Прокси-сервер. Программа, установленная на защитном экране, которая действует от имени внутреннего пользователя корпоративной сети. Прокси-сервер, называемый агентом, устанавливает связь с внешним пользователем, аутентифицирует его и разрешает (или запрещает) использовать ресурсы данной сети.

#### 5.4.2. Клиент-серверная архитектура доступа к данным

Выполнение прикладных программ предусматривает преобразование и логическую обработку данных, их хранение, защиту и архивацию в базе данных (БД), а также взаимодействие прикладной программы с файловой системой операционной системы (ОС) компьютера. Любое вновь созданное приложение выполняется в архитектуре клиент-сервер. Серверная часть приложения обрабатывает данные на уровне файлов и БД. Сервер представляет по сути СУБД, которая поддерживает все функции СУБД: определение данных, манипулирование и защиту данных, поддержание их целостности и пр. Клиентская часть приложения служит для обработки данных, полученных от сервера данных. Клиент — это различные приложения как встроенные, так и написанные пользователями. Встроенные приложения — это приложения, поставляемые поставщиками СУБД (инструментальные средства) или другими поставщиками ПО. К ним, например, относятся генератор отчетов, электронные таблицы, статистические пакеты и др. К числу специальных «служебных» приложений (клиентов) относятся утилиты. Утилиты — это специальные программы администратора БД, в том числе инструменты загрузки, выгрузки и реорганизации БД, статистические инструменты показателей качества БД и др.

Наибольшее распространение получила архитектура клиент-сервер. БД служит для хранения данных, а система управления базой данных (СУБД) — для доступа к данным, их хранению, защите и резервному копированию. Файловые операции и обмен с БД реализуются на сервере, а клиентские приложения освобождаются от этих функций. За клиентским приложением сохраняются функции запроса, получения и обработки данных от СУБД [5.26, 5.28].

Основные функции СУБД:

- управление данными во внешней памяти (на жестких дисках);
- управление буферной памятью ОЗУ для повышения скорости обмена данными;
- управление транзакциями для поддержания логической целостности БД; при выполнении операций над данными (выполнении транзакции) СУБД фиксирует

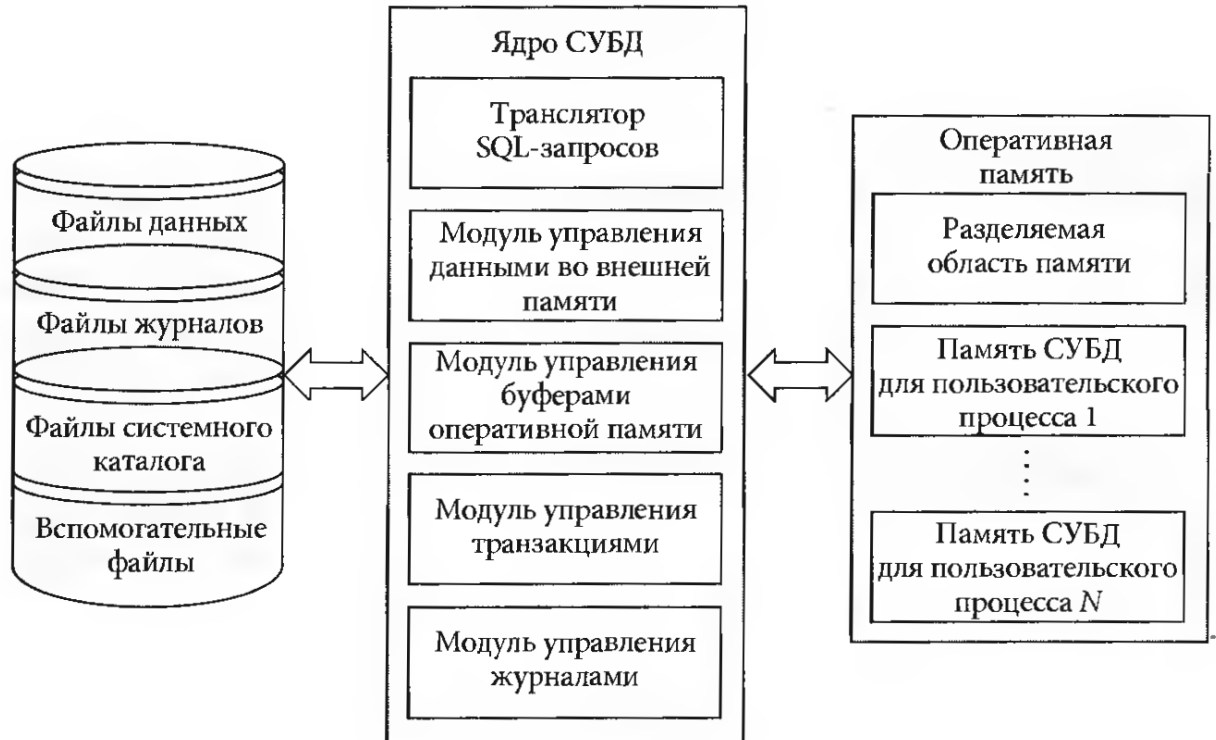


Рис. 5.6

(commit) все изменения в БД. В противном случае осуществляется откат (rollback) транзакции и изменения в БД не производятся.

- протоколирование; в случае аппаратного или программного сбоя СУБД должна восстановить все данные в БД, находящиеся в ней до сбоя, поэтому все изменения в БД протоколируются в журнале до введения их в БД.
- Поддержка языков баз данных. В основном используются два языка: язык определения схем данных (Schema Definition Language, SDL), определяющий логическую структуру БД, и язык манипулирования данными (Data Manipulation Language, DML), содержащий набор операторов манипулирования данными.

При размещении клиентского приложения и сервера на разных компьютерах в составе сети по сети передаются только запросы клиента и получение данных от СУБД. Тем самым снижается нагрузка на сеть. Обобщенная структура СУБД приведена на рис. 5.6 [ 5.24]

СУБД делятся на иерархические, сетевые, реляционные и объектно-ориентированные. Среди СУБД на рынке промышленной автоматизации получили применение Oracle, MS SQL Server, Industrial SQL Server, Industrial Application Server, Sybase, DB2, iHistorian и др.

Наибольшее распространение имеют реляционные базы данных (Oracle 8i корпорации *Oracle*, DB2 фирмы *IBM*, Ingress II корпорации *Computer Associates International, Inc.*, Informix Dynamic Server корпорации *Informix Software, Inc.*, MS SQL Server корпорации *Microsoft*, Sybase Adaptive Server корпорации *Sybase, Inc.*, Industrial SQL Server, Industrial Application Server и др.).

Реляционная модель данных представляет информацию в виде совокупности взаимосвязанных таблиц, которые называются отношениями или реляциями [5.18-5.21]. К основным понятиям реляционной модели данных относят:

- Тип данных (целочисленные, вещественные, строковые, специальные типы данных и типы двоичных объектов).
- Домен: множество неделимых значений одного и того же типа (по сути — это наименование столбцов таблицы).
- Атрибуты: именованные столбцы отношения (таблицы). Список имен атрибутов с указанием имен доменов называется схемой отношения, а число атрибутов — степенью отношения. Множество именованных схем отношений называется схемой БД.
- Кортеж: имя атрибута и его значение. Степень кортежа (число элементов в кортеже) совпадает со степенью соответствующей схемы отношения.

- Ключ отношения: атрибут, однозначно определяющий каждый кортеж отношения и обеспечивающий уникальность строк таблицы. Ключ, содержащий один атрибут, называется простым ключом. Ключ, состоящий из нескольких атрибутов, называется сложным или составным ключом.

Другим важным понятием реляционной модели является взаимосвязанность таблиц. Эта связь устанавливается по общему атрибуту, который является внешним ключом. Таким образом, внешний ключ — это атрибут (или их множество) одного отношения, являющийся ключом другого отношения. Ключи реализуются в виде объектов, называемых индексами. Индекс дает информацию о точном физическом расположении данных в таблице. При установлении связи между таблицами одна из них является главной (master), содержащей все необходимые записи, а другая — подчиненной (detail).

Таким образом, реляционная база данных является совокупностью отношений (таблиц), содержащих всю информацию БД. Свойства таблиц реляционной БД:

- каждая таблица состоит из однотипных строк и имеет уникальное имя;
- строки таблицы имеют фиксированное число столбцов и значений;
- столбцы таблицы имеют уникальные имена и в каждом столбце размещаются однородные значения.

#### 5.4.3. Структурированный язык запросов (SQL). Управление транзакциями.

Запрос данных от клиентского приложения к серверу осуществляется на языке SQL (Structured Query Language — язык структурированных запросов). Язык SQL принят ANSI в качестве стандарта в 1986 г. и расширен в 1992 г. В настоящее время — это язык ANSI SQL-92 или SQL/92. Язык SQL является интегрированным языком реляционной БД и определяет как схему реляционной БД, так и манипулирование данными. Специальные операторы языка SQL определяют представления БД [5.22-5.24, 5.28].

Типы команд языка SQL:

- Команды языка DDL (Data Definition Language — язык определения данных). Используется для изменения структуры БД (создания и удаления таблиц).
- Команды языка DML (Data Manipulation Language — язык манипулирования данными). Может загружать, модифицировать и удалять данные.
- Команды языка DCL (Data Control Language — язык управления данными). Обеспечивает управление доступом к БД.
- Команды языка DQL (Data Query Language — язык запросов к данным). Формирует запросы к БД.
- Команды администрирования БД.
- Команды управления транзакциями.

Типы данных языка SQL: символьные строки переменной длины, целые и точные числа, типы представления даты, времени и временного интервала.

К числу операторов языка SQL относятся следующие операторы:

- SELECT — оператор выборки данных;
- INSERT — добавление в таблицу новых данных;
- UPDATE — обновление (изменение) данных таблицы;
- DELETE — удаление данных из таблицы;
- REFERENCES — ссылка на столбцы таблицы в описаниях требований поддержки целостности данных;
- USAGE — предоставление права использования доменов;
- GRANT — предоставление привилегий доступа к данным;
- REVOKE — отмена привилегий доступа к данным.

При обработке SQL-запросов СУБД обращается к системному каталогу БД, который представляет собой совокупность специальных таблиц. Все системные таблицы объединены системным идентификатором пользователя. В стандарте SQL определены следующие системные таблицы:

USERS (одна строка для каждого идентификатора пользователя с паролем), SCHEMA (одна строка для каждой информационной схемы),  
DOMAINS (одна строка для каждого домена),

TABLES (одна строка для каждой таблицы с указанием имени, числа столбцов, размера данных столбцов).

Взаимодействие клиентского приложения и сервера определяется также механизмом транзакций [5.21-5.24].

Транзакцией называется логическая единица работы, состоящая из одного или более SQL-операторов и являющаяся неделимой. По стандарту ISO модель транзакций построена на операторах COMMIT и ROLLBACK. Транзакция запускается SQL- оператором, иницируемым пользователем, или программой. Завершается транзакция вводом оператора COMMIT, что свидетельствует об успешном завершении транзакции (внесение изменений в БД). Ввод оператора ROLLBACK означает отказ от изменений в БД. Если SQL-оператор входит в текст программы, то транзакция будет успешно завершена и без оператора COMMIT.

При типовых часто повторяющихся запросах к серверу, когда со стороны сервера включается механизм распознавания запроса и проверки его правильности, увеличивается время на обмен данными.

В современных серверах данных используется механизм предопределенных выборок (VIEW) и хранимых процедур сервера. И в этом случае работа клиентских приложений не зависит от типа СУБД. Подсистема обработки транзакций типичной СУБД приведена на рис. 5.7.

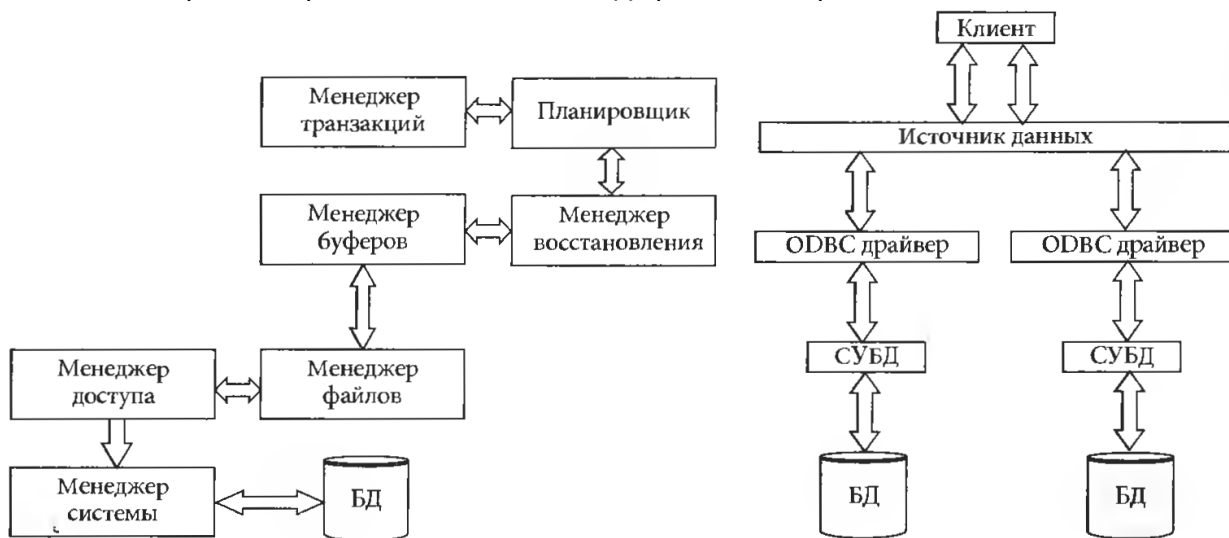


Рис. 5.7

Рис. 5.8

Менеджер транзакций координирует работу транзакций. Планировщик отвечает за управление параллельности. Менеджер восстановления возвращает БД в исходное состояние в случае отказа, а менеджер буферов отвечает за передачу данных из ОЗУ в дисковую память.

Для сокращения времени обмена данными между клиентскими приложениями и сервером используется динамически загружаемые библиотеки (DLL — Dynamic Link Library). Клиентское приложение формирует запрос к соответствующей функции DLL на языке SQL. После установления связи с сервером DLL передает запрос, получает ответ и передает его клиентскому приложению. Поскольку для определенного типа сервера существует своя DLL со своими функциями, клиентские приложения зависят от типа СУБД.

Для устранения этого недостатка фирмой *Microsoft* разработан стандарт ODBC (Open Database Connectivity — открытый доступ к базам данным), использующий единый универсальный интерфейс доступа к различным БД (рис. 5.8). Для этого требуется лишь соответствующий ODBC-драйвер и источник данных. В настоящее время ODBC-драйверы имеются для более чем 50 различных типов БД.

В архитектуру стандарта ODBC входят:

- приложение, которое выполняет обработку данных, вызов функций библиотеки ODBC для отправки SQL-операторов в СУБД и выборки полученной СУБД информации;
- менеджер драйверов, выполняющий загрузку драйверов (представляет собой библиотеку DLL);

- драйверы и агенты баз данных, обрабатывающие вызовы функций ODBC и направляющие SQL-запросы к БД, а также возвращающие полученные результаты приложению;
- источники данных (данные БД).

ODBC драйвер передает запросы клиента базе данных на языке, поддерживаемом конкретной СУБД. Источник данных содержит имя пользователя и его пароль. Клиентское приложение взаимодействует с сервером путем набора системных вызовов к источнику данных. Последний транслирует запросы клиента драйверу ODBC и получает ответы. Драйвер ODBC обменивается данными с СУБД. При необходимости работы с др. СУБД в источнике данных указывается другой тип ODBC-драйвера. Тем самым достигается независимость ПО клиентского приложения от типа СУБД.

Современные лицензируемые СУБД, ориентированные на работу большого числа пользователей, избавляют разработчика клиентских приложений самостоятельно разрабатывать средства хранения и разделения доступа к данным, их защиты от несанкционированного доступа и резервного копирования. Эти функции осуществляются выбранной СУБД. Хотя функции управления данными реализуются на сервере, обработка этих данных выполняется клиентскими приложениями, что является одним из немногих недостатков обмена данными в архитектуре клиент-сервер.

Доступ к БД через Internet на основе Web-технологии используется в локальных сетях, называемых интрасетями (intranets) [ 5.29]. Язык HTML интерпретируется Web- браузером ОС клиента для доступа к БД, размещаемой на Web-сервере (рис. 5.9).

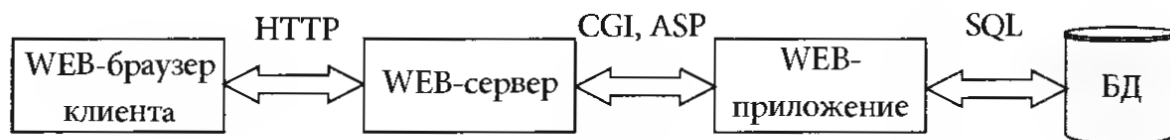


Рис. 5.9

Для доступа к БД через Web используется преобразование содержимого БД в статические или динамические гипертекстовые документы. Для организации динамических гипертекстовых документов используются специальные приложения CGI, ISAPI, ASP и др., которые вызываются Web-сервером после получения запросов от Web-клиента. После обработки приложением запроса клиента и выборки информации из БД, приложение формирует выходной HTML-документ и передает его клиенту. Интерфейс CGI (Common Gateway Interface — общий шлюзовый интерфейс) представляет собой программу преобразования форматов баз данных в формат языка HTML, программу реализации задач поиска в удаленных базах данных, использования графических меню. Интерфейс ISAPI (Internet Server Application Programming Interface — прикладной программный интерфейс для Интернет-сервера) представляет собой интерфейс доступа к серверу Интернета фирмы *Microsoft*, предназначенный для программного управления сервером. ISAPI-программы — это специальный вид приложений, обрабатывающих пользовательские запросы и отображающих их вывод в виде потока HTML, который поступает непосредственно в web-браузер клиента [5.29, 5.30].

#### 5.4.4. БД и СУБД.

Ниже рассматриваются некоторые БД для систем управления.

##### 5.4.4.1. IndustrialSQL Server

*IndustrialSQL Server*— открытая реляционная база данных реального времени (БД РВ) промышленного назначения, разработанная корпорацией *Wonderware* [5.31].

*IndustrialSQL Server* является расширением *MicrosoftSQL Server* и предоставляет возможность регистрации больших объемов данных с высокой скоростью (разрешение около одной мс). Данные о производственном процессе в РВ интегрируются в базе данных с архивными данными, событийными, итоговыми и отчетными данными.

Доступ ко всей информации возможен с любого клиентского приложения, которое имеет доступ к *MS SQL Server*. *IndustrialSQL Server* использует язык структурированных запросов SQL в качестве интерфейса между серверной и клиентскими частями.

По сравнению с традиционными реляционными базами данных *IndustrialSQL Server* позволяет хранить данные на небольшом объеме дискового пространства. Так, двухмесячный архив предприятия с 4000 параметров, опрашиваемых с периодичностью от нескольких секунд до не-

скольких минут, занимает до 2 Мбайт дискового пространства. При этом алгоритм сжатия информации гарантирует высокое разрешение и качество данных. IndustrialSQL Server содержит временные характеристики событий (изменение переменных, обновление, удаление, вставка) с выполнением определенных действий в зависимости от событий (например, выдача сменных отчетов, посылка сообщений о запуске оборудования и пр.). За счет того, что IndustrialSQL Server автоматически обновляет сводные таблицы с заданной производительностью, записывая в них максимальные, минимальные, средние значения параметров и др., таблица всегда отражает реальное состояние процесса.

Все приложения, работающие с MS SQL Server, могут быть подключены и к IndustrialSQL Server. Таким образом, текущая информация (сводные или конфигурационные данные и другая информация) сохраняются в IndustrialSQL Server.

Области применения IndustrialSQL Server охватывают задачи широкого круга специалистов: инженеров АСУ ТП, службы ремонта оборудования, персонала ОТК, операторов, экономистов. Клиентские приложения, размещенные на рабочих станциях специалистов предприятия, включают набор клиентских программ фирмы *Wonderware*. К ним относятся SCADA-система InTouch, SQL-приложения, MS Access, Excel, Word, Lotus, программы математического и статистического анализа, приложения пользователя (разработанные с использованием инструментальных программных средств, включая Visual Basic, Delphi, Power Builder, C++).

Таким образом, IndustrialSQL Server представляет собой мощную БД с возможностями традиционных реляционных БД, так как базируется на MS SQL Server, но обладает дополнительными свойствами, связанными с регистрацией БД в реальном времени. Со сформированными в РВ таблицами возможна работа по стандартным SQL-запросам. IndustrialSQL Server использует такие возможности встроенного MS SQL Server, как интерфейсы для обмена электронной почтой, Internet-обмена данными (передача и прием данных через Internet), мощные возможности MS SQL Server по фильтрации и обработке данных, но в реальном времени.

Основные характеристики IndustrialSQL Server:

- Архитектура клиент/сервер является средой между станциями верхнего уровня, ответственными за обработку финансовой и экономической информации предприятия, и станциями диспетчерского уровня, обеспечивающими визуализацию данных процесса в РВ.
- Программно-аппаратные требования: ОС — MS Windows NT 4.0; Internet Explorer 5.0; ПЦ — Pentium Pro 200 МГц; 256 Мб RAM; сети — Ethernet, Novell, Token Ring, Arcnet, Decnet.
- Масштабируемость (обработка от нескольких сотен до сотен тысяч параметров).
- Использование клиентских программ и программных пакетов третьих фирм, включающих средства статистического анализа, создания и управления отчетами, диаграммы, тренды, графики, в том числе по интеграции с системами верхнего уровня. Для отображения данных в SCADA-системе InTouch из БД IndustrialSQL Server через Internet используются следующие ActiveX-объекты:
  - ActiveDataGrid служит для выполнения SQL-запроса, который возвращает результаты выборки из БД любых SQL-серверов;
  - ActiveGraph используется для поиска исторических данных из БД IndustrialSQL Server и отображения значений переменных в виде трендов;
  - ActiveTagBrowser дает иерархический обзор имен тэгов (переменные, события, серверы ввода/вывода) в базе данных IndustrialSQL Server.
  - ActiveTimeSelector используется для просмотра и выбора исторических данных за определенный период времени из IndustrialSQL Server.

Благодаря тому что IndustrialSQL Server отличается простотой обслуживания и низкой стоимостью, IndustrialSQL Server может использоваться как выделенный сервер производственной линии или определенного производственного оборудования. В условиях удаленного доступа IndustrialSQL Server может использоваться как Web-Server или GPRS Server.

Для генерации отчетов и обновления графиков из IndustrialSQL Server и использования их в процессах управления производством используется ActiveFactory.

Новая версия БД IndustrialSQL Server 9.0 снабжена дополнительными функциями [5.32]:

- возможностью интеграции с информационными системами фирм *Siemens*, *ABB*, *Rockwell Automation*, *Honeywell* и др.;

- интеграцией с Industrial Application Server (IAS) — сервером промышленных приложений, который используется для интеграции систем нижнего и верхнего уровней системы.

Совмещение и анализ данных РВ и архивной информации способствует более эффективно управлению предприятием. Коммуникационные возможности IndustrialSQL Server основаны на технологиях OPC, DDE, стандарте SQL и средствах доступа к БД ODBC IndustrialSQL Server.

Полный набор инструментального ПО для управления предприятием объединяется в открытую программную архитектуру ArchestrA. Помимо ActiveFactory в состав ArchestrA входят следующие программные компоненты [2.32]:

- QI Analyst — статистический анализ в РВ, базирующийся на данных о технологическом процессе из IndustrialSQL Server;
- DT Analyst — анализ работы оборудования, отслеживание времени работы, простоев оборудования;
- Web-портал SuiteVoyager — функция ПО SuiteVoyager, обеспечивающая обмен данными между IndustrialSQL Server и другими программными продуктами компании *Wonderware*;
- PEM — набор объектов для IAS, осуществляющих сбор данных и сохранение их в IndustrialSQL Server.

Сбор данных для IndustrialSQL Server осуществляется, помимо IAS, также через IndustrialSQL Data Acquisition Service (IDAS). IDAS и IAS поддерживают функции резервирования и защиты от сбоев IndustrialSQL Server.

Надежность сервера БД IndustrialSQL Server поддерживается на кластерных системах. Когда возникает сбой IndustrialSQL Server, установленного на основном компьютере, автоматически запускается IndustrialSQL Server на резервном компьютере. К основным особенностям архитектуры ArchestrA относятся следующие:

- централизованная настройка приложений в соответствии с заданными требованиями;
- архивная БД для сбора производственных данных, сигналов тревог и событий;
- интеграция полевых и локальных устройств и сетей;
- средства управления предприятием на основе технологии TCP/IP;
- наличие функций удаленной диагностики на базе локальных Web-серверов.

Основой архитектуры является Industrial Application Server (IAS), представляющий собой сервер интеграции данных в РВ, сигналов тревог и событий. IAS удовлетворяет следующим требованиям производства в РВ:

- высокой скоростью выполнения операций в РВ;
- возможностью обработки больших объемов данных и сообщений о событиях;
- возможностью взаимодействия с тысячами локальных или удаленных устройств.

БД IndustrialSQL Server и Industrial Application Server широко используются в различных отраслях промышленности (целлюлозно-бумажная, химическая, нефтеперерабатывающая и др.).

#### 5.4.4.2. iHistorian.

Для интеграции систем нижнего и верхнего уровней системы автоматизации производства фирмой *Intellution* (США) разработан программный пакет iHistorian [5.33, 5.34]. Концепция построения многоуровневой информационно-управляющей системы на базе ПО iHistorian получила название Plant Intelligence.

Архитектура iHistorian представлена на рис. 5.10.

К основным достоинствам системы относятся: масштабируемость, высокая производительность и простота настройки. Объем архива, создаваемого средствами iHistorian, составляет от 100.. 300 до 100000 параметров на одном сервере. Кроме того, iHistorian поддерживает многосерверную распределенную архитектуру. Сбор данных осуществляется с помощью специальных программных модулей (коллекторов). Коллекторы делят на две группы:

- Plant Data Collectors: сбор данных от ПЛК, SCADA-систем и от др. источников данных.
- Transformation Collectors: реализация вычислительных функций и обмена данными между серверами.

K Plant Data Collectors относятся коллекторы для SCADA-систем iFIX, FIX 32, OPC и файл-коллектор. OPC-коллектор используется для сбора данных от серверов. Файл-коллектор осуществляет сбор данных из файлов в формате CSV и XML.

В группу Transformation Collectors входят вычислительные модули, которые осуществляют преобразование собранных данных с использованием Visual Basic Script и сохранение их на сервере iHistorian.

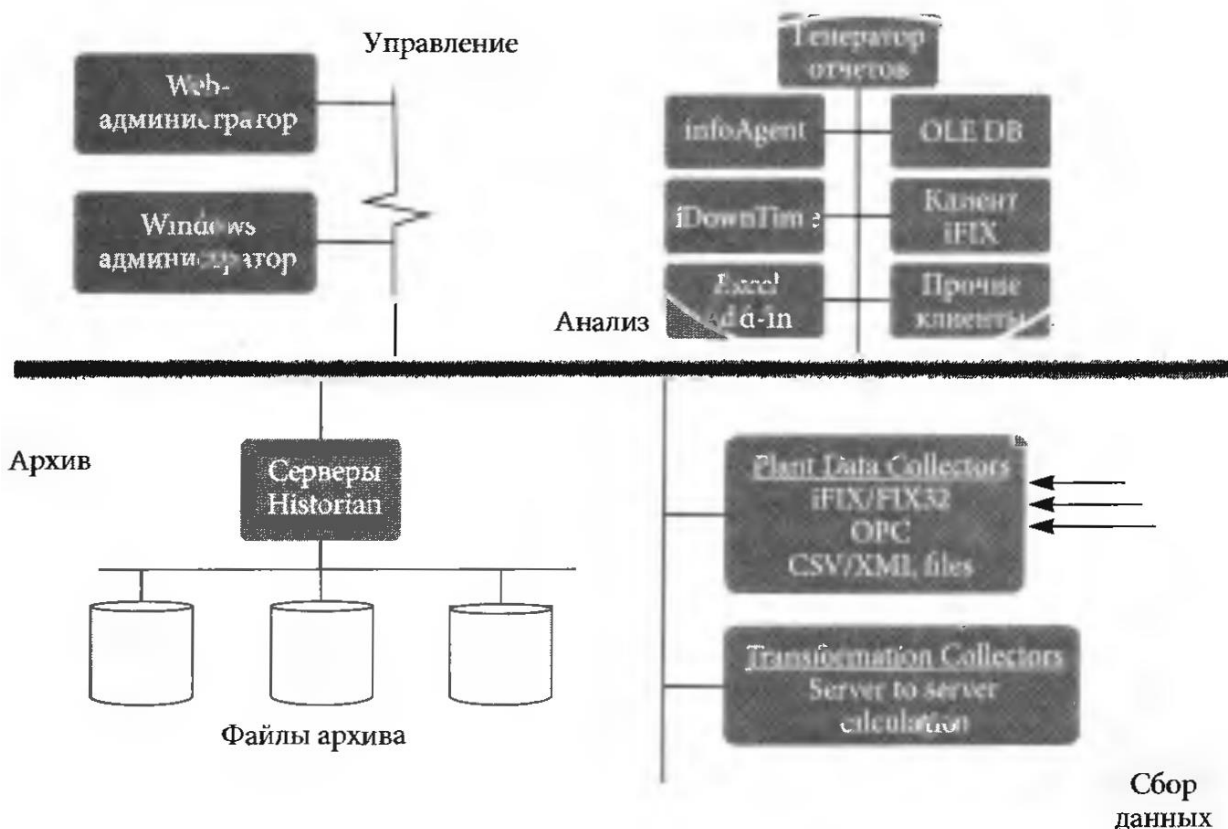


Рис. 5.10

Сервер iHistorian имеет мультифайловую структуру архива. Благодаря нереляционному типу базы данных, сервер iHistorian имеет более высокое быстродействие (скорость записи и чтения с жесткого диска составляет более 20000 событий в секунду).

Администрирование iHistorian носит упрощенный характер по сравнению с реляционными базами данных. С помощью OLE DB провайдера пользователь может работать с архивом iHistorian как с обычной реляционной базой, состоящей из восьми таблиц, используя SQL-запросы. Вместе с OLE DB провайдером поставляется программа-утилита выполнения SQL-запросов — iHistorian Inter-active SQL.

Для увеличения объема сохраняемых данных используется двойное сжатие массива данных, — на уровне коллектора и на уровне сервера. Для iHistorian Server должны соблюдаться минимальные требования: процессор Pentium III 500 МГц, 256 Мб RAM, 2 Гб на жестком диске.

Настройка iHistorian осуществляется с помощью ПО Administrator Website, устанавливаемого на сервере. Web-администратор предоставляет графический интерфейс для конфигурирования тегов, коллекторов, данных, копирования, анализа и стемных тревог и сообщений.

Данные iHistorian поступают от клиентских приложений, в частности от SCADA- системы iFIX. В SCADA-системе iFIX можно строить графики и мнемосхемы на основе данных из iHistorian. Встраиваемые в iFIX модуль Excel Add-In позволяет создавать отчеты, модуль iDownTime — анализировать события (продолжительность работы и простоев). Модуль infoAgent представляет собой Web-клиента для визуализации и анализа данных из iHistorian. Компонента iHistorian API — программный интерфейс iHistorian, который обеспечивает связь между клиентами и сервером iHistorian.

#### 5.4.4.3. БД ORACLE фирмы Oracle

Реляционные базы данных ORACLE в настоящее время являются широко распространенными БД и достигают размеров сотен гигабайт. Для более детального ознакомления с БД ORACLE можно рекомендовать литературу [5.36, 5.37]. БД ORACLE поддерживается большим числом пользователей и удовлетворяет международным стандартам по ОС, протоколам, интерфейсам, языкам доступа к БД.

БД ORACLE может быть представлена физической и логической структурами. Физическая структура — это файлы ОС трех типов: один или несколько файлов данных; два и более файлов журнала повторения работы; один или несколько управляющих файлов.

Файлы данных принадлежат одной БД и не могут изменять свой размер. Файлы данных формируют логическую структуру в виде табличного пространства. Табличные пространства — это логические единицы хранения данных; они служат для того, чтобы группировать вместе взаимосвязанные логические структуры. Каждая БД имеет одно или более табличных пространств, для каждого из которых создаются файлы данных для физического хранения данных. Емкость памяти табличного пространства равна сумме емкости его файлов, а суммарная емкость табличных пространств составляет общую емкость БД. Табличное пространство может быть в состоянии ONLINE (доступно) или OFFLINE (недоступно). При обращении к файлам данных последние размещаются в кэш-памяти ORACLE.

Файлы журнала повторения работы регистрируют все изменения в БД. При невозможности доступа к данным в процессе работы эти данные могут быть получены из журнала повторения. Таким образом, в случае сбоя или отключения питания данные могут быть восстановлены.

Управляющие файлы БД служат для записи и хранения физической структуры БД. Управляющий файл имеет имя БД, имена файлов данных, временную метку создания БД.

Логическая структура БД ORACLE определяется помимо табличных пространств также объектами схем БД (схемы, объекты схем, таблицы, кластеры и пр.).

Схема — это набор объектов. Объекты схемы включают такие структуры, как таблицы, индексы, хранимые процедуры, кластеры. Объекты одной и той же схемы могут находиться в различных табличных пространствах. Таблица — основная единица хранения данных в БД ORACLE. Данные хранятся в виде строк и столбцов. Каждая таблица является нумерованной, а каждому столбцу дается имя и тип данных.

Представление данных из одной или нескольких таблиц называется обзором. Генерация значений столбцов таблицы БД называется последовательностью, а совокупность SQL-запросов к БД — процедурой. Группа из одной или нескольких таблиц, физически хранящихся вместе, называется кластером. Кластеры могут иметь общие столбцы данных. Взаимосвязанные столбцы таблиц в кластере называются ключом кластера. Так как ключ кластера имеет соответствующий индекс, то строки таблицы извлекаются с минимальными временными затратами.

Данные БД ORACLE хранятся в блоках данных, каждый из которых содержит определенное число байт физического пространства на диске. Определенное число блоков данных образуют экстен-т, а набор экстен-тов образуют сегмент.

Память БД представляется в виде структур, предназначенных для решения определенных задач. Глобальная область системы (SGA) состоит из буферного КЭШа БД и буфера журнала повторения. Данные, хранящиеся в SGA, используются всеми пользователями БД. Буферный кэш хранит только свежие данные, еще не записанные на диск. Часть глобальной области предназначена для обработки SQL-запросов.

Глобальная область программы (PGA) — буфер памяти, содержащий данные и управляющую информацию. Механизм исполнения ОС последовательности шагов программы называется процессом.

В БД ORACLE предусмотрены пользовательские (клиентские) процессы (исполнение программного кода прикладной программы) и процессы БД ORACLE. К последним относятся процессы сервера, фоновые процессы, писатель базы данных DBWG, писатель журнала LGWR, монитор системы SMON, монитор процессов PMON, архиватор ARCH и др.

Запуск БД ORACLE сопровождается распределением глобальной области системы (SGA) и запуском фоновых процессов ORACLE.

#### 5.4.5. Серверы баз данных

Возросший объем информации, охватывающий все уровни иерархической структуры предприятия, включая производственную, хозяйственную, финансовую и другие виды деятельности предприятия, предъявляет повышенные требования к устройствам хранения, обработки и обмена данными. Эти задачи возлагаются на компьютеры с большими вычислительными ресурсами — сер-

веры. Сервером принято считать мощный компьютер, подключенный к сети и используемый многими пользователями, как центр обработки и хранения данных.

Концепция сервера основана на использовании как одного, так и нескольких компьютеров для решения специфических задач — хранения, обработки, преобразования информации, печати и пр.

Сервер может быть выделенный или совместно используемый, централизованный или распределенный. Выделенный сервер имеет более высокую производительность и более надежную защиту данных, но является более дорогим. Производительность выделенного сервера ниже из-за более частых прерываний операционной системы при обслуживании ряда пользователей. Централизованный сервер подразумевает использование одного компьютера для выполнения сервисных функций, что делает его надежность выше, чем у распределенного сервера.

В зависимости от вычислительной мощности серверы подразделяются на следующие типы: сервер рабочих групп, сервер подразделения (отдела), сервер предприятия, корпоративный сервер и Internet-сервер (Web-сервер). Встречается деление серверов на серверы начального, среднего и высшего уровней (классов).

Сервер рабочих групп (сервер начального уровня) используется для сетевой печати, управления файлами и удаленного доступа по сети. Сервер подразделения (сервер среднего уровня) служит для организации работы приложений для нескольких рабочих групп, электронной почты, поддержки работы удаленных подразделений. Сервер предприятия — мощный сервер для управления предприятием в целом. Сервер эффективен при формировании кластеров и отказоустойчивых вычислительных систем, поддерживает работу ERP, EAM и других систем верхнего уровня. Корпоративный сервер — мощный сервер для работы с большими базами данных, приложениями сложных информационных систем и Web-приложений. Сервер эффективен при формировании кластеров и отказоустойчивых вычислительных систем. Internet-сервер (сервер Internet-приложений) эффективен при работе с Web-приложениями, требующими непрерывной работы с высокой производительностью.

Основные требования, предъявляемые к серверам:

- высокая надежность хранения данных;
  - защита данных от несанкционированного доступа;
  - возможность наращивания дискового пространства и вычислительной мощности (до сотен терабайт);

Отличительными особенностями серверов являются многопроцессорность (до 16 процессоров, в том числе RISC-процессоров с поддержкой режима многопроцессорной обработки), большой объем HDD-памяти (многомодульность памяти), многоуровневая шинная архитектура, поддержка RAID — технологии дисковых массивов.

Транзакционная производительность сервера по тесту TPC-C измеряется в единицах tpmC (примерно 60000 для сервера среднего класса).

Для накопления и обработки больших массивов информации существуют сетевые хранилища данных, удовлетворяющие требованиям быстрого доступа к данным по сети, резервирования хранимой информации в условиях сбоев и сетевых помех, управления массивами независимо от платформ и конфигураций вычислительных систем, использования высокоскоростной шины PCI-X и др.

Среди фирм, выпускающих серверы различной производительности и назначения, отметим компании *Hewlett-Packard*, *Sun Microsystems*, *Motorola*, *Siemens*, *Compaq*, *ICP Electronics Inc.*, *1-0 Data* и др. Серверы компании *Hewlett-Packard* обладают рядом функциональных достоинств, среди которых функции предотвращения отказов, масштабирования ресурсов и функции удаленного управления ресурсами. Компания *Hewlett-Packard* выпускает серверы начального уровня — HP L1000 и L2000, среднего уровня — HP N4000, LT6000 и другие, серверы разработки Web-приложений.

Фирма *Compaq* выпускает 4-х процессорные серверы ProLiant 6500 на базе процессоров Pentium III с ОС Windows NT и др. Серверы начального уровня PRIMERGY серии TX и RX выпускает компания *Fujitsu Siemens Computers*. Серверы серии TX150 с ППЦ Intel Pentium 4, TX — 2 ППЦ Intel Xeon, TX300 — 2 ППЦ Intel Xeon выполнены в напольном исполнении. Серверы RX100, RX200 и RX300 используются в качестве Web-серверов и выполнены в шкафном исполнении. Компания *1-0 Data* выпускает сетевой накопитель типа HDL-xxxU различной емкости (250 Гбайт и более). Все накопители работают под управлением ОС Windows 98/ME/NT/2000/XP.

Рядом фирм (*Sun Microsystems*, *Motorola*, *Siemens* и др.) выпускаются модульные или сверхплотные (blade) серверы в виде отдельных плат с возможностью «горячей» замены. Blade-

серверы реализуют переход от концепции множества территориально распределенных серверов к единому центру обработки, где каждый сервер выполняет свои функции.

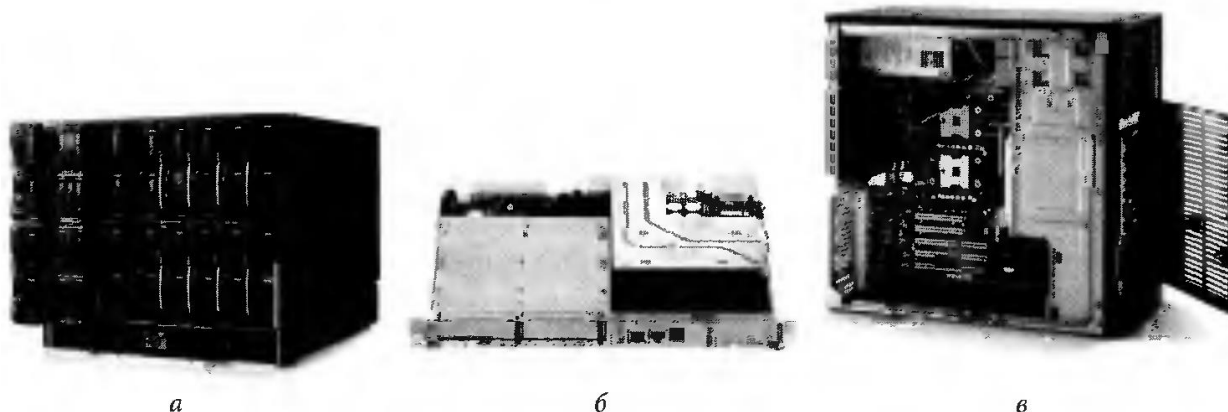


Рис. 5.11

Линейка blade-серверов компании Hewlett-Packard HP ProLiant BL используется в корпоративных вычислительных центрах.

В последние годы получили применение blade-серверы на основе спецификаций ATCA A (Advanced Telecommunications Computing Architecture) и MicroTCA [5.38]. Эти серверы используют лучшие характеристики платформы PICMG — компактный корпус для плотной установки процессорных и коммуникационных модулей, удобную объединительную панель с реализацией протоколов Ethernet (ATCA 3.1). На рис. 5.11, а приведен общий вид blade-сервера, на рис. 5.11, б — встраиваемый сервер и на рис. 5.11, в — серверный корпус Intel SC5200.

Корпусное оборудование для систем ATCA и microTCA предлагают фирмы Rittal (RiTCA) в форматах 2U...5U, 12U, 13U и Schroff (microTCA). С созданием архитектуры ATCA появился новый класс мезонинов — Advanced Mezzanine Cards (AMC). Таким образом, уровень масштабируемости серверов может быть представлен следующим образом: «стойка (Rack) — шасси (Shelf) — модуль (Blade) — мезонин (AMC)». На базе новых модулей AMC создана спецификация microTCA.

К числу новых blade-серверов по спецификации ATCA компании *Hewlett-Packard* относится сервер B5700 с 14 слотами для двухпроцессорных модулей на базе процессоров Xeon. Семейство blade-серверов компании *Motorola* Avantellis 3000 обеспечивают уровень готовности «5 девяток». Коммуникационные серверы Centellis 4000 компании *Motorola* имеют интерфейс Ethernet с пропускной способностью 10 Гбит/с.

В 2007 г. корпорация *IBM* представила новую систему BladeCenter HT с пропускной способностью внутренней подсистемы ввода/вывода одного сервера до 40 Гбит/с. Суммарный показатель пропускной способности этого сервера с системной объединительной панелью достигает 1,2 Тбит/с.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ПО ТЕМЕ №4.3.4. ПРОМЫШЛЕННЫЕ СЕТИ: АРХИТЕКТУРА, ОБОРУДОВАНИЕ, ХАРАКТЕРИСТИКИ**

### ВОПРОСЫ

1. Архитектура промышленных сетей.
2. Активное оборудование промышленных сетей.
3. Открытые промышленные сети.
4. Беспроводные сети систем управления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Харазов В.Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами. – СПб.: Профессия, 2009. – 592 с. (418-458).

### ◆ **Архитектура промышленных сетей**

Промышленная сеть — это среда передачи данных, включающая набор стандартных протоколов обмена данными, связывающих воедино оборудование различных производителей, а также обеспечивающих взаимодействие нижних и верхнего уровней системы управления предприятием.

Основные требования, предъявляемые к промышленной сети:

- 4.1.30 Высокая производительность и помехоустойчивость.
- 4.1.31 Предсказуемость времени доставки информации.
- 4.1.32 Доступность и простота организации физического канала передачи данных.
- 4.1.33 Максимально широкий сервис для приложений верхнего уровня.
- 4.1.34 Минимальная стоимость устройств аппаратурной реализации.
- 4.1.35 Максимальный доступ к каналу с минимальным временем ожидания в очереди.
- 4.1.36 Возможность резервирования сети и сетевых устройств.

Вопросам рассмотрения протоколов, стандартов и интерфейсов промышленных сетей посвящено много работ [6.1-6.12, 6.14, 6.16].

#### **6.1.1. Модель ISO/OSI**

Стандартный цифровой протокол должен отвечать следующим требованиям:

- 4.1.37 возможности подключения нескольких приборов к одной полевой шине;
- 4.1.38 возможности совместного функционирования приборов разных производителей;
- 4.1.39 равноправной связи между интеллектуальными приборами, подключенными к полевой шине;
- 4.1.40 расширению возможностей передачи данных по сравнению с аналоговой связью (увеличение производительности и скорости передачи);

В 1994 г. организацией *Fieldbus Foundation*, объединяющей более 125 компаний, введен стандарт Fieldbus (IEC- 61158-2), включающий восемь подстандартов на сети Foundation Fieldbus, Control Net, Profibus, F-Net, Interbus и др.

Сети с информационными потоками между контроллерами, датчиками сигналов и исполнительными механизмами объединяются общим названием «промышленные сети» (Fieldbus, или «полевая» шина). К настоящему времени в мире насчитывается свыше 300 типов сетей различного назначения.

В 1979 году подкомитет Международной организации по стандартизации (*ISO*) TC97/SC16 для разрешения проблемы взаимодействия сетевых систем с различными видами вычислительного оборудования и различающимися стандартами протоколов подготовил отчет с описанием эталонной «Модели взаимодействия открытых систем» (OSI — Open System Interconnection или открытая семиуровневая модель). В литературе часто используется термин «модель ВОС» — модель Взаимодействия Открытых Систем.

В табл. 6.1 представлены уровни и функции модели OSI.

*Таблица 6.1 Уровни модели OSI*

Уровень	Наименование уровня	Функции
7	Прикладной (Application)	Обеспечивает связь программ пользователя с объектами сети
6	Представление данных (Presentation)	Определяет синтаксис данных, управляет их отображением на виртуальном терминале
5	Сеансовый (Session)	Управляет ведением диалога между объектами сети
4	Транспортный (Transport)	Обеспечивает прозрачность передачи данных между абонентами сети
3	Сетевой (Network)	Определяет маршрутизацию «пакетов» сети и связь между сетями
2	Канальный (Data Link)	Передача данных («кадров») по каналу, контроль ошибок, синхронизация данных
1	Физический (Physical)	Установление и поддержка физического соединения

Большинство промышленных сетей поддерживают 1-й, 2-й и 7-й уровни OSI- модели — физический, канальный и прикладной.

Физический уровень обеспечивает необходимые механические, функциональные и электрические характеристики для установления, поддержания и размыкания физического соединения (стандарт X.21 ICCTT- Международный консультативный комитет по телефонии и телеграфии).

Канальный уровень гарантирует передачу данных между устройствами. Этот уровень управляет не только сетевым доступом, но и механизмами защиты и восстановления данных в случае ошибок при передаче (стандарт HDLC ISO).

Сетевой уровень определяет функции маршрутизации «пакета» через несколько логических каналов по одной или нескольким сетям. Принадлежностью пакета является сетевой адрес (стандарт X.25 ICCTT).

Транспортный уровень решает задачи прокладки маршрута в сети и продвижения пакета данных по маршруту. Используется механизм «окна» с подтверждением получения данных от отправителя (стандарт Европейской организации производителей ЭВМ ECMA-72).

Сеансовый уровень определяет синхронизацию информационного взаимодействия прикладных процессов обмена данными, т. е. поддержание диалога между процессами определенного типа (стандарт ECMA-75).

Уровень представления данных обеспечивает представление данных в требуемом формате. Хранение и обработка данных осуществляется СУБД (стандарт ECMA- 84, -86, -88).

Прикладной уровень обеспечивает поддержку прикладных процессов и программ конечного пользователя и управление взаимодействием этих программ с различными объектами сети передачи данных.

Протокол модели OSI представляет набор правил, определяющих начало, сам процесс связи и его окончание между одноранговыми объектами.

Уровням 1 и 2 модели OSI соответствуют стандарты ШЕЕ 802.x. В стандарте IEEE уровень 2 разделен на два подуровня: подуровень управления доступом к среде — MAC (Medium Access Control) и подуровень управления логическим каналом — LLC (Logical Link Control). Стандарты, описывающие физический уровень и MAC- подуровень:

4.1.41 Стандарт ШЕЕ 802.3 на физическом уровне представляет собой стандарт сети Ethernet, основанный на множественном доступе с прослушиванием несущей и обнаружением коллизий — CSMA/CD. Сюда также относятся Fast Ethernet (стандарт 802.3u) и Gigabit Ethernet (стандарты 802.3z и 802.3ab — Gigabit Ethernet на витой паре категории 5).

4.1.42 Стандарт ШЕЕ 802.4 — на физическом уровне маркерная шина (Token Ring).

4.1.43 Стандарт ШЕЕ 802.5 — на физическом уровне это маркерное кольцо (Token Ring).

### **6.1.2. Топология промышленных сетей**

Сетевая топология описывает способ (тип) сетевого соединения различных устройств. Существует несколько видов топологий, отличающихся друг от друга по трем основным критериям: режим доступа к сети, средства контроля передачи и восстановления данных и возможность изменения числа узлов сети. Основными сетевыми топологиями являются звезда, кольцо и шина. Известны также древовидная/ иерархическая (tree/hierarchical) топология, ячеистая (mesh) и смешанная (mixed) топологии.

#### **Структура «звезда» (star)**

В данной топологии (рис. 6.1), называемой также радиальной структурой, вся информация передается через центральный узел. Каждое устройство имеет свою собственную среду соединения. Все периферийные станции могут обмениваться друг с другом только через центральный узел. Преимущество этой структуры в том, что никто не может влиять на среду передачи. С другой стороны, центральный узел должен быть исключительно надежным устройством как в смысле логического построения сети (отслеживание конфликтных ситуаций и сбоев), так и физического, поскольку каждое периферийное устройство имеет свой физический канал связи и, следовательно, все они должны обеспечивать одинаковые возможности доступа. Дополнительное устройство может быть включено в сеть только в том случае, если организован порт для его подсоединения к центральному узлу.

#### **Структура «кольцо» (ring)**

В кольцевой структуре (рис. 6.2) информация передается от узла к узлу по физическому кольцу. Приемник копирует данные и регенерирует их вместе со своей квитанцией подтверждения следующему устройству в сети.

Когда начальный передатчик получает свою собственную квитанцию, это означает, что его информация была корректно получена адресатом.

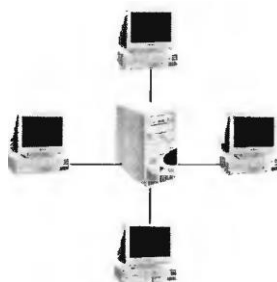


Рис. 6.1

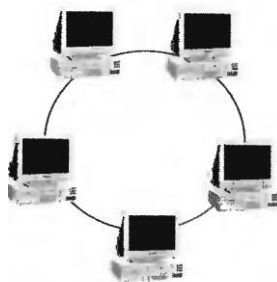


Рис. 6.2

В кольце не существует определенного централизованного контроля. Каждое устройство получает функции управляющего контроллера на строго определенный промежуток времени. Отказ в работе хотя бы одного узла приводит к нарушению работы кольца и, следовательно, к остановке передачи. Существует также структура «двойное кольцо», в котором одна ветвь является рабочей, другая — резервной.

### Структура «шина» (bus)

В шинной структуре (рис. 6.3) все устройства подсоединены к общей среде передачи данных или к шине. В отличие от «кольца» адресат получает свой информационный пакет без посредников. Процесс подключения дополнительных узлов к шине не требует аппаратных доработок со стороны уже работающих узлов сети, как это имеет место в случае топологии «звезда». Однако шинная топология требует жесткой регламентации доступа к среде передачи. Данная структура также носит название «общая шина» и «магистраль». Существуют магистральные структуры разомкнутая и типа «петля».

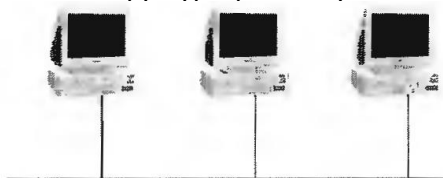


Рис. 6.3

### 6.1.3. Методы организации доступа к линии связи

Метод доступа — это набор правил, позволяющий пользователям работать с локальной сетью, не мешая друг другу. Метод доступа реализуется на физическом уровне. Если несколько устройств коммутируются между собой через общую линию связи (шину), то должен быть определен ясный и понятный протокол доступа к ней.

Существуют два метода упорядоченного доступа: централизованный и децентрализованный.

*Метод MASTER-SLAVE* (централизованный метод) находит свое применение в промышленных сетях как на контроллерном уровне (field level), так и на уровне датчиков и исполнительных механизмов (sensor/actuator level). Право инициировать циклы чтения/записи на шине имеет только MASTER-узел. Он адресует каждого из пассивных участников (SLAVE-узлы) и обменивается с ними данными. В рамках протокола решаются такие задачи, как защита данных, обнаружение ошибок при передаче, восстановление данных. На скорость и объем передаваемой информации естественным образом влияет среда передачи.

Если на Мастере произошла авария, то и циклы обмена по шине останавливаются. Именно по этой причине децентрализованный контроль с переходящими функциями мастера от одного участника (узла сети) к другому получил наибольшее распространение. Здесь права Мастера назначаются группе устройств сети.

Приняты и широко используются две модели децентрализованного доступа: модель CSMA/CD и модель с передачей маркера.

*Модель CSMA/CD (Ethernet, стандарт IEEE 802.3).* Наиболее известным механизмом управления локальной сетью шинной конфигурации является метод множественного доступа с контролем несущей и обнаружением конфликтов (CSMA/CD — Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect). Наиболее широко известная реализация этого метода — спецификация Ethernet. Все станции на шине имеют право передачи данных. Каждая из них постоянно прослушивает шину. Если шина свободна, любая из станций сети может занять шину под свой цикл передач. В том случае, когда несколько станций претендуют на шину одновременно, это приводит к так называемому конфликту (коллизии), и тогда станции снимают свою заявку на случайный промежуток времени, задаваемый случайным генератором, и затем через удвоенный промежуток времени вновь выходят в сеть.

Одним из реальных способов определения наличия коллизий при передаче, например по коаксиальному кабелю, является способ определения коллизий по повышенному уровню постоянной составляющей сигнала. Детектор коллизий определяет превышение уровнем сигналов определенного порога (около 1,5 В.), что означает, что на кабель работает более одного передатчика. Метод CSMA/CD получил широкое распространение и наиболее эффективен в условиях относительно низкой общей загрузки канала (менее 30%). В условиях большей загрузки канала выгоднее использовать сети, реализующие модель с передачей маркера.

*Модель с передачей маркера (Token Passing Model, стандарт IEEE 802.4).* Сети с передачей маркера относятся к детерминированным сетям с предсказанием времени передачи. Наиболее известными сетями являются Token Ring и FDDI (Fiber Distributed Data Interface). Право на доступ к шине передается в цикле от устройства к устройству. Порядок передачи зависит от прикладной задачи и определяется на стадии планирования системы. Этот метод предлагает каждому участнику сети «справедливое» разделение шинных ресурсов в соответствии с их запросами. Принцип передачи маркера используется в системах, где реакция на события, возникающие в распределенной системе, должна проявляться за определенное время.

#### **6.1.4. Физические каналы передачи данных**

Основными достоинствами промышленных сетей являются недорогие линии и надежность передачи данных. Данные передаются последовательно бит за битом, как правило, по одному физическому каналу. Такой режим передачи не только экономит кабельное оборудование, но и позволяет решать задачи по надежной передаче данных на большие расстояния. Время передачи, однако, увеличивается пропорционально длине битовой строки.

Асинхронный режим передачи данных осуществляется через COM-порт (Communication Port — коммуникационный порт) персонального компьютера по стандарту RS-232C. Компьютер может иметь до 4-х COM-портов с поддержкой на уровне BIOS. Если необходимо большее число COM-портов, то устанавливается специальный адаптер-мультиплексор на 4, 8, 12, 16 и более COM-портов. Если порты на системной плате конфигурируются через BIOS Setup, то порты на плате расширения — с помощью джамперов. Базовые адреса COM1-COM4: 3F8h, 2F8h, 3E8h и 2E8h. К COM-порту компьютера могут подключаться коммуникационные и другие внешние устройства с последовательным интерфейсом. Асинхронный режим передачи является байт-ориентированным.

Для организации сетевого обмена в промышленности используются следующие физические каналы: коаксиальный кабель, витая пара, оптоволокно, радиоканал и ИК-канал.

*Коаксиальный кабель.* Первые сети Ethernet были построены на протоколе 10base5, использующей в качестве среды передачи данных «толстый» коаксиальный кабель (ThickNet). Марки кабеля — RG-8 и RG-11, волновое сопротивление 500 Ом, диаметр кабеля — 12 мм, диаметр внутреннего проводника — 2,17 мм. Использовать его оказалось не слишком удобно, и практически сразу появился более простой и дешевый вариант 10base2, использующий «тонкий» коаксиальный кабель ThinNet.

Марки кабеля: RG-58/U, RG-58A/U и RG-58C/U. Кабель RG-58A/U — многожильный, остальные имеют сплошной гибкий проводник диаметром 0,89 мм. Волновое сопротивление — 50 Ом. Известны также телевизионный коаксиальный кабель марки RG-59 с волновым сопротивлением 75 Ом и марки RG-62 с волновым сопротивлением 93 Ом, используемый в сетях ArcNet. К достоинствам коаксиального кабеля следует отнести сравнительно большое расстояние передачи информации (до 10 км), к недостаткам — сложность в монтаже и высокую стоимость.

*Витая пара.* Является сегодня наиболее популярной физической средой для построения современных сетей. Это недорогой и универсальный кабель для создания локальных коммуникаций практически любого уровня сложности. Витая пара — это изолированные проводники, попарно

свитые между собой некоторое число раз на определенном отрезке длины, что требуется для уменьшения перекрестных наводок между проводниками. Как правило, кабель имеет 4 пары в одной оболочке. Реже встречаются двухпарные варианты, которые можно применять с ограниченным числом сетевых протоколов. Проводники изготовлены из медной проволоки толщиной 0,5-0,65 мм. Материал изоляции — поливинилхлорид (PVC), для более качественных образцов 5-й категории — полипропилен (PP), полиэтилен (PE). Особенно высококачественные кабели имеют изоляцию из вспененного (ячеистого) полиэтилена, который обеспечивает низкие диэлектрические потери, или из тефлона, работающего в широком диапазоне температур. Внешняя оболочка кабеля имеет толщину 0,5 - 0,6 мм и обычно изготавливается из поливинилхлорида. Конструкция кабельного сердечника достаточно разнообразна. Высококачественные кабели имеют парную (по две пары между собой) или четверочную скрутку (все четыре пары вместе). Последний вариант позволяет уменьшить толщину сердечника и достигнуть лучших электрических характеристик. Форма внешней оболочки также может быть различна. Чаще других применяется круглая, а для 2-х парных кабелей — овальная. Для напольной прокладки, по очевидной причине, используется плоский кабель. Кабели для наружной прокладки имеют влагостойкую оболочку из полиэтилена, которая наносится вторым слоем поверх обычной, поливинилхлоридной. Кроме этого, возможно заполнение пустот в кабеле водоотталкивающим гелем и бронирование с помощью гофрированной ленты.

По наличию или отсутствию экрана различают следующие типы кабелей:

- UTP (Upscreen Turn Pair — незащищенная витая пара) — кабель, витые пары которого не имеют индивидуального экранирования;
- FTP (Foil Turn Pair — фольгированная витая пара) — кабель имеет общий экран из фольги, однако у каждой пары нет индивидуальной защиты;
- STP (Screen Turn Pair — защищенная витая пара) — каждая пара имеет экран;
- ScTP (Screen Turn Pair — экранированный кабель) — кабель может как иметь, так и не иметь защиту отдельных пар.

Экран выполняется либо плетеным из медной проволоки (хорошо защищает от низкочастотных наводок), либо из токопроводящей фольги (пленки), которая блокирует высокочастотное электромагнитное излучение. Также на практике часто используют двойные экраны (HIGHT Screen), в которых используются оба способа.

Неэкранированный медный кабель UTP в зависимости от электрических и механических характеристик подразделяют на семь категорий в зависимости от диапазона частот передаваемых сигналов. Категория 1.. 4 использует диапазон частот от 20 кбит/с до 20 МГц; категория 5 — 100, 155 и 1000 Мбит/с; категория 6 — до 200 МГц; категория 7 — до 600 МГц.

Кабели на основе экранированной витой пары (ЭВП) типа STP применяются для передачи данных по стандарту фирмы *IBM*. Кабель подразделяется на следующие типы:

- *Type 1* (стандарт EIA-568A). Состоит из 2-х пар скрученных проводов (до 12 витков на 1 м), экранированных оплеткой. Электрические параметры соответствуют кабелю UTP 5-й категории, волновое сопротивление равно 150 Ом. Применяется в сетях Fast Ethernet.
- *Type 2*. Состоит из 2-х пар экранированных проводов для передачи данных (STP) и 2-х пар неэкранированных проводов для передачи голосовых сообщений (UTP).
- *Type 3*. Состоит из 2-х, 3-х или 4-х пар неэкранированных проводов UTP (телефонный кабель).
- *Type 5*. Оптоволоконный кабель (ВОК).
- *Type 6*. 2 пары экранированных проводов (STP).

*Оптоволоконный кабель.* Волоконно-оптические<sup>1</sup> линии связи (ВОЛС) имеют следующие преимущества: нечувствительность к внешним магнитным полям, колебаниям температуры и влажности, высокая пропускная способность (> 30 Ебит/с), малое затухание в полосе частот (до 0,2 дБ/км), отсутствие коротких замыканий, малые габариты и масса.

К недостаткам следует отнести более высокую стоимость волоконно-оптического кабеля (ВОК) и различной коммутационной аппаратуры (оптические коннекторы, соединительные розетки, аттенюаторы, адаптеры, разветвители и др.).

Формирование светового потока на передающем конце ВОК осуществляется полупроводниковым лазером (для больших расстояний) или светодиодом, на приемном конце — фотоприемником. При эффективной длине волны  $\lambda = 0,8-0,9$  мкм. используются кремниевые фотодиоды, при  $\lambda = 1,3-1,5$  мкм — германиевые фотодиоды. Основой световода является оболочка из

плавленного кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) и сердцевина из кварцевого стекла, легированного оксидами ( $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{GeCl}_4$ ,  $\text{POCl}_3$ ).

В зависимости от распределения показателя преломления и диаметра световода различают 3 типа волоконных световодов:



Рис. 6.4

- многомодовый световод со ступенчатым изменением показателя преломления (ПП);
- многомодовый световод с плавным изменением ПП;
- одномодовый световод.

В многомодовых световодах (MMF — Multi Mode Fiber) стандарт определяет два типа кабелей: с диаметром сердцевины 62,5 и 50 мкм, и диаметром оболочки 125 мкм. Полоса пропускания многомодовых световодов — от 500 МГц/км и более, одномодовых — до десятков и сотен ГГц/км.

<sup>1</sup> Первое кварцевое волокно, пригодное для оптической связи, было получено фирмой «Corning Glass Inc.» (США) в 1970 г. В 1975 г. разработан передатчик светового потока в виде светоизлучающего диода, работающего на длине волны 0,85 мкм. В 1978 г. появились одномодовые диодные лазеры на 1,3 мкм, а в 1982 г. — на длине волны 1,55 мкм. 1988 г. ознаменовался вводом в действие первой трансатлантической ВОЛС TAT-8. В 2000 г. введена в действие ВОЛС национального масштаба длиной 45 тыс. км.

Основная характеристика световода — показатель степени затухания (логарифм отношения интенсивностей сигналов на входе и выходе) в дБ. Современные технологии производства ВОЛС переходят с длины волны  $\lambda = 0,85$  мкм и  $\lambda = 1,3$  мкм на длину волны  $\lambda = 1,55$  мкм. В табл. 6.2 приведены основные характеристики волоконных световодов.

ВОК включает от 2 до 36 и более волокон, помещенных в резиновую и свинцовую оболочки и прокладывается в трубах или траншеях. Для повышения механической прочности в центре ВОК имеется силовой элемент (металлический трос и др.). На рис 6.4 показан общий вид волоконно-оптического кабеля.

Таблица 6.2. Характеристики световодов

Тип волокна	Диаметр сердцевины/ оболочки, мкм	Длина волны, мкм.	Полоса пропускания, МГц/км	Потери (затухание), дБ/км
Одномодовый	9,5/125	1,3	—	0,35
	9,5/125	1,55	до 10 ГГц/км	0,25
Многомодовый	50/125	0,85	400	2,7
	50/125	1,3	500	0,75
	62,5/125	0,85	160	2,7
	62,5/125	1,3	500	0,75

Для передачи и приема сигналов по оптическому кабелю применяются различные волоконно-оптические соединительные изделия: коннекторы, соединительные и переходные розетки, адаптеры, аттенуаторы, разветвители и пр.

Коннекторы различаются способом фиксации оптического кабеля в аппаратуре, условиями эксплуатации (стойкость к вибрации и ударам, диапазон температур) и др.

Стандарты коннекторов следующие: БТ (байонетное соединение), SC и LC (соединение защелкой), FC (резьбовое соединение). Соединительные розетки применяются для обеспечения надежного физического контакта соединяемых коннекторов. Многомодовые розетки имеют высокоточный центратор из бронзы, одномодовые — из керамики. На рис. 6.5 показаны коннекторы и розетки стандартов ST (рис. 6.5, а), SC (рис. 6.5, б) и FC (рис. 6.5, в).

Переходные адаптеры применяются для перехода от коннекторов одного стандарта к коннекторам другого стандарта. На рис. 6.6 представлены переходные адаптеры FC-SC (рис. 6.6, а), FC-ST (рис. 6.6, б) и SC-ST (рис. 6.6, в).

Аттенюаторы используются для снижения мощности оптического сигнала. Затухание сигнала достигается за счет калиброванного воздушного зазора между стыкуемыми коннекторами (рис. 6.7, а) или промежуточного световода с заданным коэффициентом затухания (рис. 6.7, б).

Оптические кабели, к числу которых относят кабели для внутриобъектовой прокладки и магистральные оптические кабели, выпускаются многими зарубежными фирмами (*Corning, Nokia, Samsung, Fujikura, Nexans, FinMark* и др.), а также «Союз-кабель» (Белоруссия), «Одескабель» (Украина).

Среди отечественных производителей оптических кабелей отметим ЗАО «Севка-бель-Оптик», «Саранскабель-Оптик», ООО «Оптен», ЗАО НФ «Электропровод», ЗАО «ТрансВок», ЗАО «Лусент Текнолоджис Связьстрой-1» и др.

Оптические параметры оптических кабелей должны удовлетворять требованиям и рекомендациям Международного союза электросвязи (МСЭ-Т).

ЗАО «Севкабель-Оптик» производит оптические кабели марок ОПС, ОПУ ДПС, ДПО, ДПЛ, ДНО, ДПН и др. (более 15 марок). Диаметр кабелей от 10 до 20 мм, количество волокон в одном кабеле от 2-х до 144-х и более, температура эксплуатации  $-60...+70$  °С. Кабели марок ДНО и ДПН применяются для прокладки внутри зданий по стенам, в вертикальных и горизонтальных кабель-проводах, в тоннелях и коллекторах. Кабели ОПС, ОПУ, ДПС — для прокладки непосредственно в грунте, ДПО и ДПЛ - в защитных полиэтиленовых трубах.

ЗАО «ПТ Плюс» — официальный дистрибьютор фирмы *Corning Cable Systems GmbH&Co.KG* предлагает оптические кабели для внутриобъектовой прокладки *Corning FutureLink*. Тип волокна в кабеле — одномодовое OS1 (9 мкм), многомодовое OM2 и OM3 (50 мкм) и многомодовое OM1 (62,5 мкм). По числу волокон кабели делятся на одноволоконные (диаметр внешней оболочки 2 и 2,9 мм), двухволоконные (2,9x5,8 или 2x4 мм) и многоволоконные. Многоволоконный (распределительный) внутриобъектовый кабель (*Distribution Cable*) используется при прокладке в кабельных каналах внутри помещений. Число волокон — от 2 до 24, наружный диаметр от 4,5 до 10,6 мм соответственно.

Также для использования в волоконно-оптических линиях связи применяются различные кабельные сборки. На рис. 6.8 показаны оптические патч-корды с коннекторами различных стандартов. Стандартные одномодовые и многомодовые оптические патч-корды представляют одножильный кабель диаметром 2 и 3 мм, а также дуплексный кабель сечением 1,8x3,6, 2,0x4,0 и 3,0x6,0 мм. Многоволоконная кабельная сборка представляет собой отрезок многожильного оптического кабеля заданной



Коннекторы



Розетки

Рис. 6.5



Переходные адаптеры

Рис. 6.6

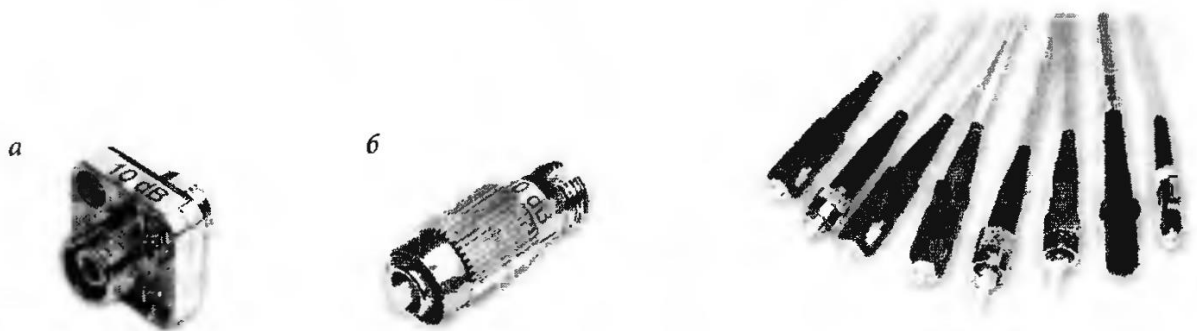


Рис. 6.7

Рис. 6.8

длины с коннекторами необходимого стандарта. С обеих сторон кабельной сборки имеются металлопластиковые рукава, защищающие коннекторы при прокладке кабеля. К числу магистральных оптических кабелей ЗАО «ПТ Плюс» предлагает кабели ОКГ, ДПО, ДПТ, ОКТ, ОПС, ОКБ и другие, производства Российских предприятий, в том числе кабели с броней из стальной проволоки (ОКБ, ОПС, ТОС, ДПС) и стальной ленты (ОКК, ДПТ).

#### ◆ Активное оборудование промышленных сетей

В сети активные устройства осуществляют формирование, преобразование, коммутацию, а также прием сигнала с использованием внешнего источника энергии.

Активные устройства можно (с некоторой долей условности) разделить на рабочие станции (источники и приемники сигнала), повторители, концентраторы, коммутаторы, мосты и маршрутизаторы.

Рабочими станциями в промышленной сети могут быть как ПЭВМ, ПЛК, так и другие интеллектуальные устройства.

#### 6.2.1. Повторители и концентраторы

Одной из основных задач, которая стоит перед любой технологией транспортировки данных, является возможность их передачи на максимально большое расстояние. Физическая среда накладывает на этот процесс свое ограничение — уровень сигнала падает и прием становится невозможным. Поскольку для распознавания сигнала важно соотношение сигнал/шум применяют не усиление, а повторение (регенерацию) сигнала. При этом устройство на входе принимает и восстанавливает сигнал (его мощность, амплитуду, фронты), а затем генерирует на выходе его точное подобие.

Первоначально в сетях использовался коаксиальный кабель с топологией «шина», и нужно было соединять между собой всего несколько протяженных сегментов. Для этого в сети использовались повторители (repeater), имевшие два порта при расстоянии между повторителями до 185 м. Многопортовые сетевые устройства принято называть концентраторами (concentrator). Их физический смысл такой же, как и повторителя, но восстановленный сигнал транслировался на все активные порты, кроме того, с которого поступил сигнал (исключение составляет концентратор сети Token Ring, который повторяет сигнал только на том порту, к которому подключен следующий в кольце компьютер). С появлением протокола ЮbaseT (витой пары) многопортовые повторители для витой пары стали называться хабами (hub), а для коаксиального кабеля — репитерами. Необходимо отметить, что концентраторы работают на физическом уровне модели OSI. Все порты концентратора равноправны, логической обработке сигнал не подвергается, не буферизируется, коллизии не обрабатываются (только фиксируются их наличие на индикаторах некоторых типов).

В автоматическом режиме концентраторы выполняют следующие функции:

- Автосегментация (network integrity) — автоматическое включение или отключение порта. Порт, к которому подсоединена неисправная линия, или не подключено какое-либо активное устройство, считается свободным и находится в неактивном режиме. При обнаружении устройства работоспособность порта восстанавливается.

Отображение состояния портов (или устройства в целом) на светодиодных индикаторах. Индицируются состояние порта (Port Status), наличие коллизий (Collisions), активность канала передачи (Activity) и наличие питания (Power);

Обнаружение ошибки полярности (перепутаны проводники внутри пары) при использовании витопарного кабеля и автоматическое переключение полярности.

По скорости различают хабы ЮbaseT и ЮbaseT. Часто встречаются смешанные конструкции, которые работают на полную скорость только в том случае, если соединены с оборудованием ЮbaseT. Встречается разделение повторителей на классы I и II. Повторители I класса полностью декодируют входящий сигнал, преобразуют его в логическую форму и передают на активные порты (задержка в районе 0,7 мс). При этом возможно использование нескольких технологий одновременно, например, 100BaseT4, 100BaseTX или 100BaseFX. Повторители II класса восстанавливают форму сигнала без его явного преобразования в логический вид. Соответственно, в этом случае задержка передачи заметно меньше (менее 0,46 мс по стандарту), но можно использовать только один протокол. Основное назначение концентраторов (хабов) — это объединение территориально сосредоточенных рабочих станций в группу или использование хабов в качестве ретрансляторов (повторителей) для связи нескольких рабочих групп.

Концентраторы делят на следующие классы:

Начальный уровень (5- или 8-портовые концентраторы). Часто концентраторы имеют порт для подсоединения коаксиального кабеля BNC (Bayonet Neill Concelman), реже — порт AUI (Attachment Unit Interface). При невысокой стоимости являются простым и дешевым решением для сети небольшого размера.

Средний уровень. Это 12-, 16- и 24-портовые устройства. Имеют 19-дюймовое исполнение, BNC или AUI порты. Используются для построения средних и малых сетей.

### 6.2.2. Мосты и коммутаторы

Если два (или более) сегмента сети слишком велики для объединения их в один коллизионный домен и к тому же территориально удалены друг от друга, применяют мост (Bridge). Как и повторители, мосты принимают данные на входящий порт и передают их на исходящий с восстановленным уровнем и формой сигнала.

Мост принимает входящий пакет данных в свой буфер, определяет его целостность и анализирует заголовок кадра на предмет MAC-адреса отправителя и получателя. При этом каждая половина моста, анализируя поле адреса отправителя, ведет таблицу адресов узлов, находящихся на своей стороне. На другую сторону моста передаются только пакеты широковещательной рассылки (Broadcast) и пакеты, не имеющие получателя на своей стороне. Таким образом, в отличие от повторителей, коллизии не транслируются. Буферизация данных перед их отправкой (store and forward) приводит к возникновению большей по сравнению с концентраторами задержки, что несколько снижает скорость работы сети. С другой стороны, количество устройств, которые разделяют между собой физическую среду, снижается. В результате обычно реальная скорость передачи данных возрастает. Первые мосты были, подобно повторителям, двухпортовыми. Но с появлением технологии ЮbaseT, построенной на многопортовых хабах, получили применение многопортовые мосты. Многопортовый мост представляет собой коммутатор (switch).

Коммутаторы выполняют те же функции, что и мосты, но используются как средство уменьшения числа узлов в доменах коллизий. Коммутаторы имеют число портов до 24..30, а модульные коммутаторы — до сотни портов. Переход от концентраторов (хабов) к коммутаторам (switch) и от полудуплексных каналов связи к дуплексным решил вопрос о возможности блокировки обмена по сетевому каналу из-за наличия коллизий в сети Ethernet.

Тем не менее совсем из сетевого лексикона мосты не исчезли. Так называют устройства, предназначенные для связи ЛВС с другой физической средой, например, по радиоканалу, модемной связи или другими способами. При этом с одной стороны моста пакеты будут преобразованы в какой-либо иной протокол канального уровня, а с другой — восстановлены обратно. Однако мосты не могут выполнять фрагментацию и повторную сборку пакетов более высокого (сетевого) уровня. Как следствие, многие мосты имеют ограничение по размеру передаваемого пакета данных и слишком большой пакет может быть отброшен как поврежденный.

### 6.2.3. Маршрутизаторы и шлюзы

Маршрутизатор (роутер, router) — это устройство, связывающее три нижних уровня и устанавливающее соединение на четвертом (транспортном) уровне. Задача маршрутизатора — выбор маршрута передачи данных. Соответственно, если мосты для передачи кадров используют адреса физического уровня (MAC), то маршрутизаторы (роутеры) обычно используют IP-адреса глобальной сети Интернет. Для этого им, как минимум, нужно развернуть пакет данных, извлечь из его поля данных дейтаграмму IP, и по ее заголовку направить пакет. Однако большинство маршрутизаторов работает по еще более сложному алгоритму, используя для передачи данных протоколы следующих уровней модели OSI: TCP, UDP, Novell IPX, AppleTalk II и др. Подобно повторителям, маршрутизаторы используют буферизацию сигнала, затем восстанавливают уровень и форму передаваемого сигнала. Так же, как и мосты, маршрутизаторы не передают адресату коллизии или поврежденные кадры, и из-за буферизации имеют задержку при передаче.

Маршрутизаторы могут соединять сети с различными протоколами доступа, например Ethernet и ArcNet. В случае установления связи с помощью маршрутизатора верхние уровни модели OSI (5,6 и 7) отправителя и получателя должны быть одинаковыми.

Шлюз (gateway) — устройство, служащее для объединения разнородных сетей, т.е. сетей с различными протоколами. Шлюз выполняет протокольное преобразование для всех семи уровней модели OSI. Они обычно применяются для соединения локальных сетей, преобразования протоколов обмена и передачи пакетов информации между двумя различными сетями. Также шлюз может выполнять функции маршрутизатора (роутера), однако скорость обмена будет невысокой.

### 6.3. Открытые промышленные сети

Открытые промышленные сети — это сети, на которые распространяются международные стандарты промышленных сетей [6.6-6.12]. Только при использовании принципов открытых систем интеграция изделий разных производителей в одну сеть может быть решена без особых проблем. Предпочтительность того или иного сетевого решения как средства транспортировки данных можно оценить по следующей группе критериев:

- ◆ объем передаваемых полезных данных;
- ◆ время передачи фиксированного объема данных;
- ◆ удовлетворение требованиям задач реального времени;
- ◆ максимальная длина шины;
- ◆ допустимое число узлов на шине;
- ◆ помехозащищенность;
- ◆ денежные затраты в расчете на узел.

В зависимости от области применения весь спектр промышленных сетей можно разделить на два уровня:

- ◆ контроллерные сети (Field level) — промышленные сети, решающие задачи по управлению процессом производства, сбором и обработкой данных на уровне промышленных контроллеров;
- ◆ сенсорные сети (Sensor/actuator level) или сети низовой автоматики, решающие задачи опроса датчиков и управления работой различных исполнительных механизмов.

Промышленные сети контроллерного уровня: PROFIBUS (Process Field Bus): -DP, -PA, -FMS; BITBUS; ControlNet; CAN (Controller Area Network).

Сенсорные сети (сети низовой автоматики): ASI (Actuator/Sensor Interface); HART; Modbus; Modbus Plus; Interbus-S; DeviceNet;

Универсальные сети: LON (Local Operating Network); FIP (Factory Instrumentation Protocol), Foundation Fidelis, Ethernet.

### 6.3.1. Сенсорные сети (сети низовой автоматики) 6.3.1.1. AS-Interface (ASI)

Основная задача ASI — интерфейса нижнего уровня — связать в единую информационную структуру устройства нижнего уровня, а именно датчики и разнообразные исполнительные механизмы, имеющие соответствующий сетевой интерфейс. Название описываемой сети раскрывает ее назначение: Actuators Sensors Interface (ASI) — интерфейс исполнительных устройств и датчиков.

Впервые ASI-протокол вышел на рынок в конце 1989 г. и сегодня поддержан рядом известных фирм: *IBM, Siemens, Pepperl+Fuchs, Allen-Bradley, Limberg* и др. Существует и одноименная ассоциация по поддержке этой сети — ASI. С помощью ASI можно строить системы, в которых датчики и контроллеры связаны одной сетью, причем ASI имеет шлюзы в другие промышленные сети: ModBus, Profibus, Interbus, Device Net и др.

Каждый узел ASI-сети должен иметь специальную интерфейсную микросхему с поддержкой ASI-протокола. ASI-интерфейс позволяет передавать как данные, так и питание к узлам сети по одной паре проводов.

Топологией ASI-сети может быть шина, кольцо, дерево или звезда. Общая длина сегмента составляет не более 100 м, а с использованием репитеров до 300 м. Максимальное время цикла составляет 5... 10 мс. MASTER-узел ASI-сети контролирует работу сети, организует обмен данными с PLC. Зачастую ASI-MASTER оформляется в виде отдельной платы контроллера или компьютера. Максимальное число ведомых устройств (SLAVE), подключаемых к одному MASTER-узлу, до 62 устройств. В качестве физической среды передачи данных используется 2-проводной кабель ASI-кабель (питание и данные передаются по одному кабелю), представляющий собой кабель, в котором оба проводника упакованы в специальную мягкую резиновую оболочку, которая делает этот кабель гибким и устойчивым к многократным изгибам. Скорость передачи ограничена до 156 кбит/с, дальность передачи — 300 м.

#### 6.3.1.2 HART

*HART-протокол* (Highway Addressable Remote Transducer), разработанный фирмой *Fisher Rosemount Inc.* в середине 80-х годов, реализует принцип частотной модуляции для организации цифровой передачи, основанной на технологии 4-20 мА (рис 6.9). На аналоговый сигнал 4-20 мА накладывается частотно модулированный цифровой сигнал с амплитудой колебаний +0,5 мА. Логической единице соответствует частота 1200 Гц, логическому нулю — 2200 Гц. Физический канал — экранированная витая пара.

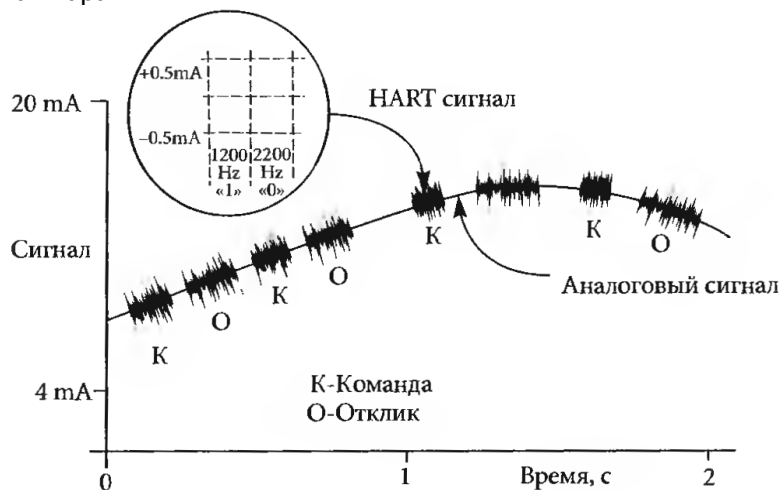


Рис. 6.9

HART-протокол позволяет передавать данные со скоростью до 1200 бит/с. В нем реализована схема отношений между узлами сети по принципу MASTER/SLAVE. В сети может присутствовать до 2-х MASTER-узлов (обычно один). Второй MASTER, как правило, освобожден от поддержания циклов передачи и занят под связь с какой-либо системой контроля/отображения данных. Стандартная топология организована по принципу «точка-точка» или «звезда».

Для передачи данных по сети используются два режима:

- по схеме «запрос/ответ», т.е. асинхронный обмен данными (один цикл укладывается в 500 мс);
- все пассивные узлы непрерывно передают свои данные на MASTER-узел (время обновления данных в MASTER-узле 250-300 мс).

Возможно построение топологии типа «шина» (до 15 узлов), когда несколько узлов подключены на одну витую пару. Питание осуществляется по шине. Наличие международной организации «HART Communication Foundation» позволяет активно продвигать эту промышленную сеть в среде пользователей.

### 6.3.1.3 MODBUS.

Протокол сети разработан фирмой Modicon (в настоящее время входит в группу Schneider Electric, Франция) для сбора данных контроллерами Modicon. Специальный физический интерфейс для него не определен. Эта возможность предоставлена самому пользователю: RS-232C, RS-422, RS-485 или же токовая петля 4-20 мА.

Однако, чаще других используется интерфейс RS-485. Протокол MODBUS работает по принципу MASTER-SLAVE или «ведущий-ведомый». Конфигурация на основе этого протокола предполагает наличие одного MASTER-узла и до 247 SLAVE-узлов. MASTER-узел инициирует циклы обмена данными.

Существует два типа запросов:

- запрос/ответ (адресуется только один из SLAVE-узлов);
- широковещательная передача (broadcast message); MASTER через выставление адреса 0 обращается ко всем SLAVE-узлам сети одновременно без квитирования.

Протокол MODBUS описывает фиксированный формат команд, последовательность полей в команде, обработку ошибок и исключительных состояний, коды функций. Для кодирования передаваемых данных используются форматы ASCII (American Standard Code for Information Interchange) и RTU (Remote Terminal Unit).

Каждый запрос со стороны ведущего узла включает адрес абонента (адрес 0 используется для широковещательной передачи), код команды ведомому устройству (чтение, запись и т. д.), размер поля данных (собственно данные или буфер под данные) и контрольный CRC-код. Функция обслуживания тайм-аута реализована для фиксирования коллизий при приеме/передаче данных.

В режиме ASC II информация передается в виде последовательности символов. Структура передаваемого символа: 1 стартовый бит, 7 бит данных, 1 бит контроля четности, 1 стоповый бит (при контроле четности) или 2 стоповых бита (без контроля четности). Символы передаются с интервалом (паузой) до одной секунды.

В режиме RTU структура символа следующая: 1 стартовый бит, 8 бит данных, 1 бит контроля четности (при отсутствии контроля четности бит отсутствует), 1 стоповый бит (при контроле четности) или 2 стоповых бита (без контроля четности). Сообщение представляет собой последовательность символов, передаваемых без пауз. Сообщение включает адрес в диапазоне 1-247 (1 символ), код функции в диапазоне 1-255 (1 символ), данные (п символов) и контрольная сумма (2 символа). Скорость передачи данных в сети Modbus — 19,2 кбит/с.

Протокол MODBUS является наиболее распространенным в мире. Хотя ограничения этого протокола достаточно очевидны, он привлекает простотой логики и независимостью от типа интерфейса.

*Modbus Plus.* Спецификация Modbus Plus является модификацией протокола Modbus. Скорость передачи данных по сети Modbus Plus до 2 Мбит/с. Сетевая шина использует одиночный или для улучшения надежности системы двойной кабель. В качестве физической среды используется экранированная витая пара. До 32 узлов может быть подключено к кабелю сети длиной 450 м без повторителя и до 1800 м с повторителем, а количество узлов сети с повторителем до 64. Сети соединяются между собой с помощью мостов. В этом случае сообщения из узла в одной сети могут быть переданы узлу в другой сети.

В отличие от сети Modbus сеть Modbus Plus является одноранговой, т. е. любое устройство может инициировать транзакцию, являясь как ведущим, так и ведомым.

Передача данных внутри сети использует механизм передачи маркера. В каждый момент передачу запросов осуществляет только один узел. Узел, получивший запрос, сразу отправляет подтверждение его получения. После завершения сеанса опроса узлов активный узел передает маркер следующему узлу с большим адресом и т. д. Протокол Modbus Plus реализует функцию маршрутизации до 6 сетей.

### 6.3.1.4. Interbus.

Сеть Interbus — одна из первых промышленных шин, получивших широкое распространение, разработана фирмой *Phoenix Contact* в 1984 г. Interbus остается популярной и сегодня благодаря дальности охвата, гибкости, быстрдействию, диагностическим средствам и автоадресации. Физический уровень Interbus основан на стандарте RS-485 и напоминает обычную сеть с многоотводными соединениями, однако в действительности представляет собой последовательное кольцо на базе сдвиговых регистров. Каждый подчиненный узел имеет два коннектора: через один коннектор данные принимаются, через другой передаются в следующий узел. Информация об адресе в протоколе отсутствует, данные в сети пересылаются по кругу, и главное устройство всегда способно определить, из какого узла считывается или в какой узел передается информация по положению этого узла в кольце.

Благодаря необычной сетевой топологии Interbus имеет два дополнительных преимущества. Во-первых, кольцевая топология дает главному устройству возможность самому себя конфигурировать, причем в некоторых случаях данный процесс не требует вмешательства со стороны пользователя. Во-вторых, точность сведений о сетевых отказах и месте их возникновения значительно упрощает процесс их поиска и устранения. Максимальное число узлов в сети — 512, длина соединения (расстояние между узлами) до 400 м. Общая дальность охвата сети до 12,8 км, скорость передачи — 500 кбит/с. Размер сообщения — 512 байт данных на узел, число передаваемых блоков не ограничено.

#### 6.3.1.5. DeviceNet

Протокол DeviceNet, разработанный фирмой *Allen-Bradley* (США) в 1994 г, имеет шинную топологию, физический канал — 4-проводный кабель. Помимо функции чтения состояния дискретных датчиков и управления пусковыми устройствами, сеть позволяет передавать значение температуры и тока нагрузки пусковых устройств, изменять скорость приводов и регулировать порог срабатывания датчиков.

К сети могут быть подключены 64 узла (всего до 2048 устройств — по 32 на узел). Для связи используется комбинация ответвителей и экранированной витой пары. Ответвители DevicePort — пассивные, многопортовые, поставляются с 4-мя или 8-ю герметичными микропортами быстрого отключения. Данные посылаются по необходимости короткими пакетами. Определены три значения скорости передачи данных: 125, 250 или 500 кбит/с. Длина магистрали (толстый кабель диаметром 12,2 мм) соответственно 500, 250 и 100 м (длина одиночных отводов — 6 м).

### 6.3.2. Контроллерные сети

#### 6.3.2.1. Сеть BITBUS

Протокол BITBUS разработан фирмой *Intel* в 1984 г. для построения распределенных систем, в которых должны быть обеспечены высокая скорость передачи, детерминизм и надежность. За основу был взят широко известный протокол управления каналом передачи данных, разработанный фирмой *IBM* — SDLC (Synchronous Data Link Control). Сеть использует принцип MASTER/SLAVE. Физический интерфейс основан на стандарте RS-485 и представляет собой экранированную витую пару.

Институтом инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) BITBUS- протоколу был присвоен статус стандарта (IEEE 1118).

Максимальная длина локальной сети BITBUS составляет 13,2 км, общее число абонентов в сети — до 240. Длина одного сегмента (гальванически изолированный участок сети) составляет 1,2 км. Число абонентов и ретрансляторов в одном сегменте — 28.

Протокол не дает возможности построения сложных систем — структура его информационных пакетов проста. Все это позволяет говорить о BITBUS как о протоколе относительно простом и не требующем больших аппаратных затрат на его реализацию. Использование многоуровневой сетевой структуры оправдано тогда, когда нужно состыковать несколько BITBUS-сетей, использующих различные скорости передачи данных.

Информационный обмен организован по принципу «MASTER — SLAVE». Функции MASTER-узла могут концентрироваться в одном узле и распределяться по нескольким MASTER-узлам. В этом случае необходима организация механизма передачи телеграммы-маркера (права доступа к шине) от одного MASTER-узла к другому. Протокол BITBUS определяет два режима передачи данных по шине:

- синхронный режим. Используется при необходимости работы на большой скорости, но на ограниченных расстояниях. В этом случае топология сети включает до 28 узлов, а длина шины до 30 м. Скорость передачи от 500 до 2400 кбит/с. Синхронный режим передачи предполагает использование двух дифференциальных сигнальных пар — одной для данных, другой для синхронизации.

- режим с самосинхронизацией. Использование этого режима позволяет значительно удлинить шину. Стандартом определены две скорости передачи: 375 кбит/с (до 300 м) и 62,5 кбит/с (до 1200 м). Используя шинные репитеры, можно объединять последовательно несколько шинных сегментов (до 28 узлов на сегмент). В этом случае общее число узлов до 240, длина общей шины — 13,2 км. При этом в режиме передачи используются две дифференциальные пары: одна для данных и одна для управления репитером.

### 6.3.2.2. Сеть PROFIBUS

Протокол PROFIBUS (PROcess Field BUS) разработан группой немецких компаний: *Siemens*, *Bosch*, и *Klockner-Moeller*. Основные задачи сети:

- организация связи с устройствами, гарантирующими быстрый ответ;
- создание простой и экономичной системы передачи данных, основанной на открытых стандартах;
- реализация интерфейса между уровнями 2 и 7 OSI-модели.

Стандарт протокола описывает уровни 1, 2 и 7 OSI-модели. В PROFIBUS используется гибридный метод доступа в структуре MASTER/SLAVE и децентрализованная процедура передачи маркера. Сеть может состоять из 122 узлов, из которых 32 могут быть MASTER-узлами. Адрес 0 зарезервирован для режима широкого вещания («broadcast»). Общая схема PROFIBUS-сети представлена на рис. 6.10.

В среде MASTER-узлов по возрастающим номерам узлов передается маркер, который предоставляет право ведения циклов чтения/записи на шине. Все циклы строго регламентированы по времени, организована продуманная система тайм-аутов. Протокол хорошо разрешает разнообразные коллизии на шине. Настройка всех основных временных параметров определяется пользователем. Говоря о PROFIBUS, необходимо иметь в виду, что под этим общим названием понимается совокупность

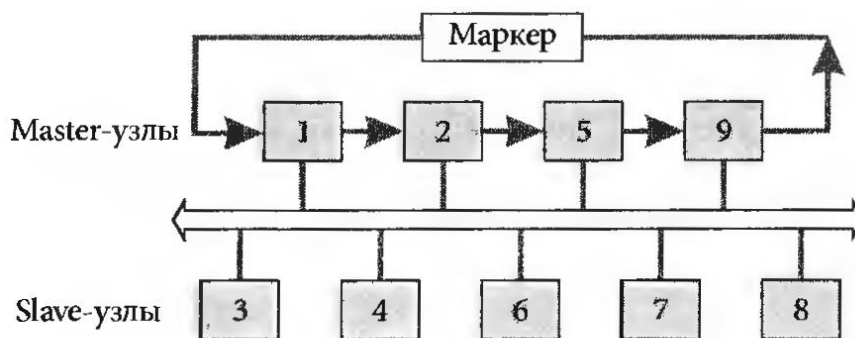


Рис. 6.10

трех различных, но совместимых протоколов: PROFIBUS-DP, PROFIBUS-FMS и PROFIBUS-PA.

### Сеть PROFIBUS-DP

Сеть PROFIBUS-DP применяется на нижнем уровне для высокоскоростного обмена данными с оконечными устройствами. Протокол физического уровня базируется на стандарте RS-485. Длительность цикла опроса зависит от числа узлов в сети и для скорости обмена 1,5 Мбит/с и числа станций 32 составляет не более 6 мс. Физическая среда — витая пара (RS-485) или оптоволоконный кабель. Скорость обмена от 9,6 кбит/с (на длине 1200 м) до 12 Мбит/с (достигается на длине сегмента 100 м.). На шине может быть до 124 ведомых устройств. DP-протокол представляет функциональное подмножество 2-го уровня протокола PROFIBUS-FMS. Уровень 7 в PROFIBUS-DP не описан. Стандарт — EN 50170.

### Сеть PROFIBUS-PA

Этот протокол используется в устройствах, работающих в опасных производствах, и позволяет подключать к одной шине датчики и преобразователи изолированно друг от друга. В основе протокола PA (Process Automation) лежит протокол ISP (Interoperable Systems Project). Физический уровень (уровень 1 OSI- модели) реализует стандарт IEC 61158-2 (с внутренней защитой данных). Уровень 2 — это функциональное подмножество стандарта DIN 19245. Структура протокола Profibus-PA сравнима с Profibus-DP (формат данных одинаковый). Сегмент PROFIBUS-PA имеет длину до 1900 м, длина ответвлений — 120 м; в одном сегменте может подключаться до 31 устройства (на опасных участках рекомендуется до 10 устройств). Скорость обмена между узлами сети — 31,2 кбит/с. За счет идентичности коммуникационных протоколов возможно объединение сетей

Profibus-DP и Profibus-PA. Для этого используется интерфейс DP/PA, позволяющий объединять до 5 шин Profibus-PA.

### Сеть PROFIBUS-FMS

Этот протокол общего назначения разработан для связи контроллеров и интеллектуальных устройств. Он описывает уровни 1, 2 и 7 OSI-модели. Основное его назначение — передача больших объемов данных. Распределенная система управления может состоять из устройств, реализующих все три типа стандарта, однако PA-устройства необходимо подключать к PROFIBUS-PA через разделительные мосты.

#### 6.3.2.3. Сеть ControlNet

Сеть ControlNet (*Allen-Bradley*) основана на топологии общей шины, однако ее можно сконфигурировать как в виде звезды, так и в виде древовидной структуры.

Сеть ControlNet — управляющая сеть, удовлетворяющая требованиям приложений реального времени с высокой пропускной способностью. Сеть объединяет функции сети ввода/вывода и сети обмена «точка-точка», обеспечивая высокую производительность для обеих функций. Все устройства ControlNet имеют прямой доступ к данным в сети Foundation Fieldbus. Сеть ControlNet обеспечивает избыточность носителя, что позволяет поддерживать функционирование системы при повреждении кабеля и взрывобезопасность при использовании оптоволоконного канала передачи. Скорость передачи данных 5 Мбит/с. В любом месте шины сегмента можно установить через ответвитель до 99 адресуемых узлов.

#### 6.3.2.4. Сеть CANbus

Протокол сети CANbus разработан компанией *Bosch* (Германия). CAN (Control Area Network) — протокол, получивший статус международного стандарта ISO 11898-1. Он отвечает требованиям задач реального времени и способен обнаруживать и исправлять ошибочные сообщения с высокой степенью вероятности. Для сети CAN определены 1-й и 2-й уровни модели OSI. Многие разработки седьмого уровня для CAN оформлены как самостоятельные протоколы: SDS (фирма *Honeywell*), DeviceNET (фирма *Allen Bradley*), CAL (ассоциация *CiA*) и др.

CANbus — это последовательная шина, механизм работы которой описывается моделью децентрализованного контроля за доступом к шине, так называемой моделью CSMA/CM (модернизированный вариант модели CSMA/CD). Возможные коллизии, связанные с одновременным запросом шины, разрешаются на основе приоритетности передаваемых сообщений. В CANbus каждый блок данных содержит дополнительный 11-битовый идентификатор, который является, по сути, приоритетом данного сообщения. Каждый узел-приемник в сети CANbus выбирает предназначенные для него сообщения. Возможные коллизии, связанные с одновременным запросом шины, разрешаются на основе приоритетности сообщений: право на работу с шиной получит тот узел, который передает сообщение с наивысшим приоритетом. В каждом сообщении может быть передано от 0 до 8 бит данных. Большие блоки можно передавать за счет использования принципа сегментации.

Фирма *Bosch* предоставила следующим компаниям лицензионное право на выпуск микросхем для CANbus: *Intel*, *Intermetall*, *Motorola*, *National Semiconductor*, *NEC*, *Philips*, *SGS-Thompson*, *Siemens*, *IAM* и *Inicore*.

### 6.3.3. Универсальные сети

#### 3.6.3.1. Сеть WorldFIP

Протокол WorldFIP (World Factory Instrumentation Protocol) был разработан на основе французского стандарта, известного как NFC46-600 или FIP (Fieldbus Internet Protocol). В состав его разработчиков входят *Honeywell*, *Cegelec*, *Baily Controls*, *Allen Bradley*, *Telemecanique* и др., производящие полевые устройства, в которых используется система сообщений. Протокол FIP нацелен на высокие скорости передачи и строго определенные интервалы обновления данных.

Протокол организован посредством централизованного/децентрализованного доступа к шине и для передачи данных использует режим широкого вещания (broadcast) путем отправки broadcast-пакетов. При помощи широкополосного канала связи могут быть соединены до 256 станций, расположенных на расстоянии до 2 км.

Контроль передачи осуществляется центральным узлом сети — «арбитром». Арбитр имеет три рабочих цикла. Продолжительность каждого цикла устанавливается самим пользователем:

##### 1. Циклический трафик

Арбитр сети имеет таблицу циклического опроса, состоящую из поименованных переменных. Порядок опроса устанавливается в соответствии с этой таблицей. Арбитр имеет доступ более чем к одной таблице опроса, но только одна из них может иметь активный статус. В конце Цикла эта таблица может быть модифицирована. Такой трафик применяется в приложениях, ориентированных на пакетную обработку данных.

### 2. Периодический трафик

Арбитр обращается к отдельным переменным из каждого узла сети по запросу. Запросы на работу с переменными генерируются во время циклического трафика. Данный трафик используется наиболее часто.

### 3. Обслуживание сообщений

Арбитр предоставляет право на передачу любому устройству сети, запросившему эту функцию во время циклического графика. Получив это право, устройство может передать свое сообщение (с подтверждением или без) одному или всем устройствам, подсоединенным к шине. Функции управления процессом обмена данными могут быть распределены на шине между различными устройствами. Это возможно потому, что, с одной стороны, все «приемники» принимают одинаковые переменные одновременно, а с другой — время обновления данных и их передача подчиняются строгому контролю.

Основной поток данных организован как набор отдельных переменных, каждая из которых идентифицирована своим именем. Любая переменная, обработанная в одном узле-передатчике, может быть прочитана всеми узлами-приемниками одновременно. Режим широкого вещания добавляет от процесса присваивания каждому устройству уникального сетевого адреса. Результаты обработки каждой переменной узлом-передатчиком доступны для чтения всеми узлами-приемниками, входящими в состав сети.

Таким образом, WorldFIP это система fieldbus, функционирующая как распределённая база данных реального времени.

Для построения сети полевых устройств на основе WorldFIP разработан спектр специализированных коммуникационных чипов:

4.1.44 FULLFIP2 — для оконечных устройств и контроллеров;

4.1.45 FIPU2 — для организации сети на основе интеллектуальных устройств;

4.1.46 FIPCO1 — для простых fieldbus-устройств.

Чипы поддерживают скорости передачи 31,25 Кбод; 1; 2,5 и 5 Мбод.

Физическая среда WorldFIP — витая пара или оптоволоконный кабель по стандарту IEC 1158-2. Сеть WorldFIP применяется в нефтехимической, электротехнической, газовой, металлургической и ряде других отраслей промышленности.

### 6.3.3.2. Сеть LON Works

Протокол LON был разработан американской компанией *Echelon Corp.* для построения систем с большим числом каналов данных, получаемых на основе коротких сообщений. Сеть Lon Works поддерживает международная организация «The LonMark Interoperability Association», объединяющая свыше 100 компаний по всему миру.

В основе LON-технологии лежит использование специального интерфейсного Neuron-кристалла, разработанного и производимого компаниями *Toshiba* и *Motorola* (типы 3120 и 3150). Этот однокорпусный кристалл содержит три микропроцессора:

MAC-процессор — поддерживает первый и второй уровни OSI-модели;

NET-процессор — реализует функции с третьего по шестой уровень;

APP-процессор — обрабатывает функции прикладного уровня.

Тактовая частота микропроцессоров 10 МГц. Скорость передачи данных в сети от 4,88 Кбод до 1,25 Мбод (чаще используются скорости 78 кбод и 1,25 Мбод).

Lon-сеть может состоять из сегментов, имеющих различные физические среды передачи: витая пара, коаксиальный и оптический кабели, радиочастотный и инфракрасный каналы. Для каждого типа физического канала существуют трансиверы, обеспечивающие работу сети на различных по длине каналах, скоростях передачи и сетевых топологиях. При разрешении коллизий используется предсказывающий алгоритм их предупреждения, т. е. доступ к каналу упорядочивается на основе знания о предполагаемой нагрузке канала. Передающий узел получает доступ к каналу со случайной задержкой из некоторого диапазона. Для предотвращения снижения пропускной способности сети величина задержки представлена как функция числа незавершенных заданий (backlog), стоящих в очереди на выполнение. Способность предсказывающего алгоритма, реализованного на MAC-уровне, основана на оценке числа незавершенных заданий.

Все данные, передаваемые по LON-сети, имеют стандартный сетевой тип (Standard Network Variable Type, SNVT). Отдельные узлы посылают свои SNVT-переменные в центральный узел, который хранит у себя их местоположение в сети.

Метод доступа к среде передачи данных — CSMA/CD (используется в сети CAN-bus). Максимальный размер LON-сети — 32 000 узлов, соединенных различными физическими средами в произвольной сетевой конфигурации (в основном «шина»),

### 6.3.3.3. Сеть Foundation Fieldbus

Один из самых молодых (1997 год) и динамично развивающихся стандартов на промышленную сеть. Foundation Fieldbus представляет собой открытый протокол, позволяющий использовать программно-аппаратные средства различных производителей. Fieldbus Foundation является ассоциацией, появившейся в результате слияния североамериканских компаний *ISP-Foundation (Fisher Rosemount, Yokogawa, Foxboro, Siemens)* и *WorldFIP (Honeywell, Groupe Schneider, Allen-Bradley* и др.).

Foundation Fieldbus представляет собой двухуровневый сетевой протокол, сочетающий черты мощной информационной магистрали для объединения компьютеров верхнего уровня и управляющей сети, объединяющей контроллеры, датчики и исполнительные механизмы.

Стандарт определяет два уровня сети. На нижнем уровне (H1) в качестве физической среды передачи данных за основу взята модифицированная версия стандарта IEC 61158-2. Уровень H1 предназначен для объединения устройств, функционирующих во взрывоопасных газовых средах. Скорость передачи на уровне H1 составляет 31,25 кбит/с.

На верхнем уровне (протокол H2) в настоящее время используется Foundation Fieldbus HSE (High Speed Ethernet), основанный на сети Fast Ethernet со скоростью передачи 100 Мбит/с (стандарт IEC 61158).

Особенностью стандарта Foundation Fieldbus является то, что в нем определен дополнительный пользовательский уровень (User Level), позволяющий применяя определенные функциональные блоки (например, аналоговый ввод или вывод, ПИД-регулятор и др.) строить промышленные сети с распределенным интеллектом.

Максимальное число узлов составляет 240 на сегмент (поддерживается до 65000 сегментов), длина соединения до 1900 м (для H1).

Методы обмена сообщениями: клиент/сервер (Client/Server), издатель/подписчик (Publisher/Subscriber), уведомление о событиях (Event Notification).

Сеть Foundation Fieldbus может быть использована в качестве полной замены аналогового стандарта токовой петли 4...20 мА.

Основная область применения этой сети — нижний уровень распределенной системы автоматизации с объединением устройств, работающих во взрывоопасных средах и использующих сеть как для информационного обмена, так и для питания датчиков.

### 6.3.4. Сеть Ethernet / Industrial Ethernet

*Сеть Ethernet* в силу ее широкого применения на разных уровнях иерархии систем управления можно отнести к универсальным сетям. Число сетей Ethernet (стандарт IEEE 802.3) в настоящее время превышает несколько миллионов, а число пользователей — десятки и сотни миллионов и непрерывно увеличивается. Технологию Ethernet называют DIX-технологией по начальным буквам фирм-разработчиков: *DEC, Intel* и *Xerox*. Спецификация Ethernet была опубликована в 1980 г. (стандарт IEEE 802.3). В 1995 г. опубликован стандарт IEEE 802.3u (Fast Ethernet), в 1997 г. — IEEE 802.3z (Gigabit Ethernet), в 1999 г. — IEEE 802.3ab (Gigabit Ethernet на витой паре категории 5).

Протокол Ethernet — открытый промышленный сетевой стандарт, который поддерживает неявный обмен сообщениями (обмен сообщениями ввода/вывода в реальном времени), явный обмен (обмен сообщениями) и использует широко распространенные чипы связи Ethernet и физические носители. Поскольку технология Ethernet используется с конца 70-х годов XX века и широко распространена во всем мире, продукты Ethernet поддерживают большое число поставщиков оборудования для автоматизации. Использование Ethernet обеспечивает доступ ко всем устройствам уровня данных из Internet [6.6, 6.10-6.12, 6.14].

Сеть Ethernet использует двухуровневый протокол стандарта Ethernet TCP/IP (Transmission Control Protocol/ Internet Protocol) — протокол управления и передачи/ протокол Интернета. Поскольку технология Ethernet и стандартные блоки протокола TCP/IP опубликованы для общественного использования, стандартизированные сервисные программы и физические носители производятся массово и легко доступны. Стандарты TCP/IP являются открытыми и постоянно совершенствуются. Протокол TCP/IP является двухуровневым.

IP-протокол является базовым протоколом нижнего уровня стека TCP/IP. Напомним, что протоколом принято называть формализованные правила, определяющие последовательность и формат сообщений, которыми обмениваются сетевые компоненты, находящиеся на одном уровне, но в разных узлах (отправителя и получателя). Иерархически организованный набор протоколов взаимодействия узлов в сети называется стекком коммуникационных протоколов, одним из которых является стек TCP/IP.

IP-протокол — это протокол сетевого уровня, который отвечает за передачу информации по сети, т. е. за правильность доставки сообщения (message) по указанному адресу. Информация передается блоками, которые называются дейтаграммами. Протокол IP не исключает потерь данных или доставки дейтаграмм с ошибками.

При передаче дейтаграмм IP-протокол выполняет фрагментацию дейтаграмм на передающей стороне и их сборку на приемной стороне, если размер кадров в сети отличается от размера исходных дейтаграмм. Дейтаграмма состоит из заголовка и поля данных. Размер дейтаграммы, способной быть принятой устройствами в сети, составляет 576 байт. Именно поэтому при большой длине дейтаграммы производится ее фрагментация, т. е. разделение на части. После передачи фрагментов дейтаграммы маршрутизатором эти фрагменты на приемной стороне объединяются.

По своим функциям IP-протокол, являясь протоколом сетевого уровня, образует с протоколом межсетевых управляющих сообщений отдельный межсетевой уровень. Модуль IP подготавливает заголовок дейтаграммы, подсоединяет к нему данные, получаемые от протоколов верхнего уровня TCP и UDP, определяет подсетевой адрес и передает их модулю, реализующему протокол сетевого уровня подсети отправителя. Последний создает заголовок пакета подсети, присоединяет к нему в качестве данных дейтаграмму и передает пакет через подсеть отправителя. Затем вызывается модуль протокола сетевого уровня подсети получателя, который в свою очередь создает заголовок пакета, присоединяет к нему в качестве данных дейтаграмму и отправляет пакет получателю. Станция-получатель освобождает дейтаграмму от заголовка пакета и передает ее модулю IP, определяющему какой прикладной программе предназначена дейтаграмма. После этого, в ответ на системный вызов, данные передаются прикладной программе получателя вместе с адресом отправителя и др. параметрами. В настоящее время используется 32-битная адресация IP-адреса (IP v.4). Версия IP v.6 способна расширить адресное пространство до 128 бит.

Для определения локального или физического адреса по IP-адресу используется протокол разрешения адресов ARP (Address Resolution Protocol), описанный в документе RFC 826. Обратная задача представляет нахождение IP-адреса по известному физическому адресу и решается с помощью реверсивного протокола разрешения адреса RARP (Revers Address Resolution Protocol). Протокол ARP работает, когда модуль IP посылает пакет на уровень сетевых стандартов по известному IP-адресу станции назначения, по которому определяется MAC-адрес получателя.

Протокол TCP является основным транспортным протоколом стека TCP/IP, располагается над межсетевым протоколом IP и обеспечивает передачу пакета данных. Протокол TCP предоставляет возможность передачи непрерывного потока октетов, упакованных в сегменты. Данные перед отправкой поступают в буфер, откуда для передачи на сетевой уровень отбирается определенная часть, называемая сегментом. Размер сегмента должен быть таким, чтобы при упаковке в IP-дейтаграмму мог поместиться полностью. На приемной стороне модуль протокола TCP помещает полученные данные сегмента в буфер прикладной программы получателя. С модулем протокола TCP связан модуль протокола IP, обеспечивающий передачу пакета по сети. Протокол TCP позволяет восстанавливать данные при их искажении или потере. Это достигается путем проверочного суммирования и присвоения последующего номера каждому передаваемому октету данных и требования положительного подтверждения приема данных от TCP получателя.

Для связи двух процессов их протоколы TCP должны установить соединение, т. е. получить информацию о состоянии сторон. Информация включает адреса сторон, последовательные номера передаваемых данных, размер окна, определяющего диапазон разрешенных для передачи номеров.

В структуре протокола, естественно, отсутствует сеансовый уровень, а прикладной и представительный уровни объединены. Таким образом, протоколы TCP/IP охватывают верхние уровни модели OSI, начиная с 3-го. На сетевом уровне, помимо протокола IP, используются протоколы ARP, RARP, ICMP и др. На транспортном уровне используются протоколы UDP и TCP. На объединенном уровне представления данных и прикладном уровне используются протоколы TELNET, FTP, SMTP, SNMP, OSPF и др. протоколы сети Internet.

Важным протоколом канального уровня по стандарту ISO является протокол HDLC (Highlevel Data Fink Control — протокол управления каналом передачи данных). Протокол HDLC применяется для выделенных линий связи (каналы могут быть выделенными или коммутируемыми). Основные функции протокола — присвоение и управление IP-адресами, формирование пакета данных, восстановление искаженных и утерянных кадров, управление потоком кадров. Типичные устройства, обменивающиеся данными по сети Ethernet, — ПЛК, персональные компьютеры, роботы, устройства человеко-машинного интерфейса, адаптеры входов/выходов, устройства ввода/вывода.

Сеть Ethernet использует различные физические среды: витые пары, волоконно-оптический кабель, реже коаксиальный кабель. Основная топология — звездообразная с центральным узлом (hub или switch). Допустимые размеры сети Ethernet определяются ограничениями на длину кабельного сегмента, связанную с затуханием и искажениями формы сигнала. Для среды 10Base2 допустимая длина сегмента 185 м (в отдельных случаях до 300 м), для среды 10Base5 — 500 м, 10BaseT (100BaseTX, 100BaseT4) — 100 м. К другим ограничениям относятся ограничение числа узлов в домене коллизий (до 1024). Число повторителей между любой парой узлов в сетях Ethernet — не более 4-х, Fast Ethernet — 1 или 2, Gigabit Ethernet — 1.

Для Fast Ethernet стандарт 100BaseT4 предусматривает 4 витых пары для кабеля 5 категории; 100BaseTX — 2 витых пары для кабеля категории 5; 100BaseFX — 2 волоконных световода (62,5/125 мкм.)

Обычно сеть Ethernet использует топологию «активная звезда», в которой группы устройств связаны непосредственно с коммутатором. Преимущество такой топологии заключается в поддержке скоростей как 10 Мбит/с, так и 100 Мбит/с. При этом коммутаторы Ethernet согласуют скорость передачи данных. Сеть Ethernet предназначена для работы с большими объемами данных (1518 байт в пакете). В структуре сети используются концентраторы (hubs), коммутаторы (switches), трансиверы (transceivers), маршрутизаторы (routers) и повторители (repeaters).

В табл. 6.3 приведены стандарты сети Ethernet.

**Таблица 6.3. Стандарты сети Ethernet**

Ethernet		Fast Ethernet		Gigabit Ethernet	
Тип среды	Характеристики	Тип среды	Характеристики	Тип среды	Характеристики
10Base2	Сетевая среда с использованием тонкого КК, 10 Мбит/с. Топология — шина	100BaseTX	Сетевая среда с использованием неэкранированной витой пары, 100 Мбит/с, топология — звезда	1000Base-SX	850 нм лазерный источник, многомодовое оптоволокно, длина до 300 м (62,5 мкм) и до 550 м (50 мкм)
10Base5	Сетевая среда с использованием толстого КК, 10 Мбит/с. Топология — шина				

*Окончание табл. 6.3*

Ethernet		Fast Ethernet		Gigabit Ethernet	
Тип среды	Характеристики	Тип среды	Характеристики	Тип среды	Характеристики
10BaseT	Сетевая среда с использованием неэкранированной витой пары, 10 Мбит/с, топология — звезда	100BaseFX	Сетевая среда с использованием ВОК, 100 Мбит/с, топология — звезда	1000Base-LX	1300 нм лазерный источник, одномодовое оптоволокно (до 3000 м)
10BaseFL	Сетевая среда с использованием ВОК, 10 Мбит/с, топология — звезда			1000Base-CX	Двухпроводный экранированный кабель STP (экранированная витая пара) (до 25 м)

### Сеть Industrial Ethernet

Наметившаяся тенденция интеграции систем управления на базе единой широко распространенной сети Ethernet привела к необходимости разработки специального программного и аппаратного обеспечения, способного работать в жестких условиях эксплуатации, характерных для нижних уровней систем управления.

Лидером на мировом рынке сетевых технологий по исследованиям RSI стала технология Industrial Ethernet, объем которой среди всех полевых шин составил 32,1% в 2003 г., эта доля увеличилась до 70% к 2006 г., а к 2008 г. составила около 95% [6.10,6.14,6.16].

Промышленный Ethernet, разработанный на базе офисной сети Ethernet и используемый в промышленности, должен удовлетворять ряду требований:

Возможность работы в тяжелых промышленных условиях (температура от -40 °С до +75 °С, электромагнитные помехи, вибрация и пр.).

Устойчивость к сбоям и возможность резервирования, в том числе «горячее резервирование».

Низкие требования к обслуживанию сети и сетевого оборудования.

Соответствие международным стандартам по электромагнитной совместимости, помехоустойчивости, взрывобезопасности и др. показателям.

Возможность интеграции с программно-техническими комплексами разных производителей, а также с другими промышленными сетями, используемыми на производстве.

Возможность интеграции с системами верхнего уровня (MES-, ERP-, EAM- системами).

Работа в сети должна осуществляться в режиме жесткого реального времени. Industrial Ethernet появился на рынке промышленной автоматизации в 1985 г и принят основными производителями средств автоматизации (Siemens, Schneider Electric, Rockwell Automation и др). Industrial Ethernet использует технологию множественного доступа к шине с прослушиванием несущей и обнаружением коллизий. Пересылка данных ведется кадрами. Хотя стандарта Industrial Ethernet пока «де-факто» не существует, предварительные рекомендации совместимы со стандартами ASI, Profibus, SimaticNet и др.

Для работы в режиме РВ (технология RTPS — RealTime Publisher Subscriber) в жестких промышленных условиях разработаны и предлагаются следующие сети Industrial Ethernet:

EtherCAT компании Beckhoff (EtherCAT Technology Group);

PROFINET компании Siemens (PNO);

EtherNet/IP (ODVA);

Modbus TCP (Schneider Electric, Modbus-IDA User Group) [6.18].

Сеть EtherCAT (Ether for Control Automation Technology) — сеть стандарта Ethernet, топология сети — кольцо, структура сети — ведущий/ведомые. Пакет с данными (фрейм) обходит последовательно по кольцу ведомые устройства, которые дополняют пакет своими данными. Собранные от всех ведомых устройств данные возвращаются к ведущему контроллеру, связанному с компьютером, где осуществляется их обработка, архивирование и визуализация. За счет задержки всего в несколько наносекунд реализуется поддержка режима реального времени. Некритичные ко времени данные передаются во временные промежутки передачи данных в РВ.

Сеть PROFINET (Profibus+Ethernet) v2 и v3, разработанная на основе сетей Profibus и Ethernet, представляет собой промышленный вариант сети Ethernet 100 Base TX. Существуют 3 модификации сети: Profinet NRT (Non-Realtime), Profinet RT (Realtime), Profinet IRT (Isochronous Realtime). Сеть Profinet позволяет интегрировать полевые сети (Profibus, Interbus, DeviceNet и др.) в открытую сеть на базе Industrial Ethernet. Физический канал — экранированная витая пара категории 5 класса D (стандарт IEEE 802.3 ab), длина сети 100 м, скорость передачи 100 Мбит/с. Используются также сети распределенного ввода/вывода PROFINET Ю и модульные системы управления PROFINET CBA (Component Based Automation).

EtherNet/IP (Industrial Ethernet Protocol) базируется на протоколах TCP, UDP, IP 5-го и 4-го уровней модели OSI. Протокол Ethernet/IP был разработан в 2000 г. группой ODVA (Open DeviceNet Vendor Association) и совместим с протоколом DeviceNet. Этот протокол поддерживают помимо ODVA также организации IAONA (Industrial Automation Open Network Alliance), IDA (Interface for Distributed Automation) и CI (Controlnet International).

Помимо этих протоколов на 5...7 уровнях модели OSI используются протоколы FTP, HTTP, SNMP, SMTP и др.

Повышение скорости передачи в сетях Industrial Ethernet достигается применением стандарта сетей Fast Ethernet. Industrial Fast Ethernet базируется на стандарте Ethernet для витой пары со скоростью до 100 Мбит/с.

Общими для этих сетей являются формат данных (минимальный пакет 64 байта, максимальный — 1518 байт, длина адресного поля — 48 байт), технология доступа к сети CSMA/CD, возможность использования в сети повторителей (в сети Fast Ethernet не более двух повторителей). С целью повышения надежности время доставки пакета в сети Fast Ethernet ограничено, что при высокой скорости передачи 100 Мбит/с привело к уменьшению длины сети. Так, при использовании

витой пары размер сети Fast Ethernet составляет 205 м, а при использовании оптоволокна — 320 м (в то же время длина сегмента сети Ethernet составляет 4520 м).

Все большее применение в системах промышленной автоматизации находят сети Gigabit Ethernet (10GE) со скоростью передачи данных до 10 Гбит/с в дуплексном режиме. Спецификация 10GBase-X предусматривает в качестве физического канала экранированную витую пару, 10GBase LX4 — оптический кабель (1300 нм), 10GBase-SR, -LR, -ER — оптический канал передачи данных на длинах 850, 1300 и 1550 нм соответственно (стандарт IEEE 802.3az).

Производителями сетевого оборудования стандарта Industrial Ethernet на мировом рынке являются компании *Hirschmann* (Германия), *Siemens*, *Moxa Technologies Co Ltd* (Тайвань), *Harting* (Германия), *Westermo* (Швеция), *Korenix* (Германия), *Phoenix Contact* (Япония), *Cisco Systems Inc.* и др.

В состав сетевого оборудования Industrial Ethernet входят трансиверы, хабы, коммутаторы (управляемые, неуправляемые, модульные).

Основные отличительные особенности оборудования Industrial Ethernet:

- повышенная надежность, связанная с отсутствием вентиляторов охлаждения (время наработки на отказ безвентиляторных устройств повышается до 15 лет);
- расширенный диапазон рабочих температур от -40 до +60 °C (вместо +10...40 °C);
- повышенная механическая прочность (установка в шкафах, крепление на DIN- рейку, зажимы «под винт», отсутствие разъемов и др.);
- пониженное напряжение электропитания (в основном 24 VDC), применение резервированного питания и источников бесперебойного питания (ИБП);
- резервирование сетей и оборудования (применение высокоскоростных технологий восстановления работоспособности оборудования: сетей HIPER Ring, Super- Ring, протокола RSTR и др.).

Среди сетевого оборудования Industrial Ethernet находят применение неуправляемые и управляемые коммутаторы, конвертеры и концентраторы.

Сети Industrial Ethernet используют топологии шина, звезда и кольцо, в том числе двойное кольцо с резервированием каналов.

Например, сеть HIPER Ring компании *Hirschmann* с кольцевой резервированной топологией включает до 80-ти двухпортовых коммутаторов со временем переключения сети в случае отказов до 50 мс. Физический канал передачи данных по гигабитному сегменту — кабель с 4-мя витыми парами 5-й или 6-й категории, из них две витых пары служат для передачи сигнала, а две — для цепей питания.

В последнее время находит развитие технология передачи сигнала и питания по одной витой паре PoE (Power over Ethernet), что приводит к сокращению проводов и повышению надежности канала связи.

Приведем краткую характеристику оборудования Industrial Ethernet.

Компания *Hirschmann* производит промышленные неуправляемые коммутаторы серии Spider II для Fast Ethernet (8 портов для витой пары и 2 порта 10/100 Base-FX для оптического кабеля) и для Gigabit Ethernet (5 портов 10/100/1000 Base-T). Все коммутаторы поддерживают автоматическое определение типа соединения, полярности и скорости передачи по витой паре. Диапазон рабочих температур -40...+70°C. К управляемым коммутаторам относятся промышленные коммутаторы семейства R340, имеющие 9 портов Ethernet 10/100/1000 Base-T для подключения витой пары или оптического кабеля. Диапазон рабочих температур -40...+70 °C.

Компания *Siemens* выпускает несколько типов коммутаторов [6.17]:

- неуправляемые коммутаторы SCALANCE X005/X100 с числом портов от 4-х до 24-х для сетей Ethernet 10/100 Base-T;
- управляемые коммутаторы SCALANCE X200/X200 IRT для сетей Ethernet 10/100 Base-T с временем реконфигурации сети до 0,3 с.
- управляемые коммутаторы SCALANCE X300 для сетей Ethernet 10/100/1000 Base-T;
- модульные коммутаторы SCALANCE X400, в состав которых входят коммутаторы, конвертеры, модули расширения для сетей Ethernet 10/100/1000 Base-T.

Коммутаторы SCALANCE X005/X100 применяются в линейных и звездообразных топологиях сетей, остальные также и в кольцевых топологиях сети.

Беспроводная связь обеспечивается с помощью точек доступа SCALANCE W78x (скорость обмена до 54 Мбит/с на частотах 2,4 ЕГц и 5 ЕГц) и модулей Ethernet- клиентов, в том числе мобильных. Число подключаемых модулей Ethernet-клиентов — от одного до восьми.

Компания *Phoenix Contact* выпускает неуправляемые коммутаторы FL SWITCH SFN и FI, SWITCH SF с поддержкой Gigabit Ethernet, управляемые модульные коммутаторы FL SWITCH MMS (2...24 порта) и компактные коммутаторы FL SWITCH MCS (16 портов витой пары или 14 портов витой пары и 2 порта для оптического кабеля). Новые коммутаторы Factory Line серии GT имеют не 2, а 8 адресуемых гигабитных портов (коммутатор FL SMCS 8GT). Управляемые коммутаторы поддерживают протокол SNMP.

Компания *Korenix* производит неуправляемые коммутаторы JetNet 30Ю (10 портов, из них 7 портов Ethernet 10/100 TX и 3 порта Gigabit Ethernet) и неуправляемые коммутаторы начального уровня JeNet 3000 и JetNet 3500, а также управляемые многопортовые коммутаторы JetNet 4500 и JetNet 5010 G по технологии Super Ring.

Линейка коммуникационного оборудования компании *Moxa Technologies* включает различные коммутаторы, полнофункциональные преобразователи Industrial Ethernet в оптоволокно, промышленные Ethernet серверы, устройства беспроводного Industrial Ethernet, программируемые коммуникационные шлюзы для связи сетей с Ethernet, многопортовые интеллектуальные платы и др.

Построение разветвленных сетей требует применения многопортовых коммутаторов. Модельный ряд коммутаторов фирмы *Moxa Technologies* включает как управляемые, так и неуправляемые коммутаторы серий EDS-205, -305, -308, -405A, -508A, -726 и ED6008.

EDS-205 — 5-ти портовые неуправляемые коммутаторы (5 портов Ethernet 10/100 BaseT), относящиеся к офисным устройствам. Применяются в основном в сетях при автоматизации зданий. Питание 12...48 VDC или 18...30 VAC.

EDS-305 и -308 — 5-ти или 8-ми портовые неуправляемые коммутаторы. Отличаются возможностью оповещения о сбоях питания и обрыва линий связи, подключения резервного питания 24 VDC. Обладают защитой от «широковещательного шторма» (исключение ошибочных широковещательных Ethernet пакетов, способных вывести из строя сетевое оборудование).

EDS-405A — 5-портовые управляемые резервируемые коммутаторы. Применяются для построения магистральных резервируемых Ethernet-сетей по технологии Turbo Ring (двойное кольцо). Время восстановления сети после сбоев, а также время переключения на резервную линию составляет не более 300 мс. Также имеется возможность подключения резервного источника питания и функция оповещения о сбоях питания и обрыве линий связи.

EDS-508A — 8-портовые управляемые коммутаторы. Поддерживают все функции предыдущих серий и дополнительно выполняют функции управления приоритетами трафика, гарантированное время доставки (функция QoS), сегментацию (разделение на независимые участки) сетей (функция VLAN) и управления данными (функция IGMP).

EDS-726 — современный 26-портовый управляемый модульный коммутатор стандарта Gigabit Ethernet. Помимо модулей Gigabit Ethernet по стандартам 10/100/1000 BaseT(X) или 1000 BaseSX/LX поддерживаются модули Fast Ethernet по стандарту 10/100 BaseT(X) и 100 BaseFX. Коммутатор позволяет установить (по заказу) три вида однопортовых модулей Gigabit Ethernet и 8 видов 4-х портовых модулей Fast Ethernet для витой пары или оптоволокна. Управление работой коммутатора осуществляется в режиме PB, поддерживается управление сетью по протоколам SNMP v1/v2C/v3 и RMON, а также управление сетью при помощи WEB-браузера, Windows- утилиты или Serial/Telnet-консоли.

EDS-6008 — 8-портовый управляемый коммутатор. Разработан для применения в жестких условиях эксплуатации (взрывоопасность среды, температуры - 40... +75 °C). Остальные характеристики аналогичны EDS-508.

С целью повышения живучести сети и надежности передачи информации протокол Industrial Ethernet предусматривает резервирование сетей Industrial Ethernet.

Среди методов построения резервированных сетей Industrial Ethernet известны следующие:

- Быстрое связующее дерево (STP — Spanning Tree Protocol) — коммутаторы автоматически настраиваются на дополнительные соединения; время реконфигурации <5 с (стандарт IEEE 802.1w). Используется в основном для офисных систем верхнего уровня.
- Объединение звеньев («группообразование») — четыре физических звена и одно логическое звено с использованием одного MAC-адреса (стандарт IEEE 802.1d); время реконфигурации <1 с.

- Двойное подключение (избыточное звено) — основной и резервный порты коммутатора настраиваются независимо; время переключения < 1 с.
- Отказоустойчивое дублирование — соединение двух сетей помимо основного звена с помощью добавочного (избыточного) звена; время реконфигурации < 1 с.

На рис. 6.11 показан Ethernet-коммутатор EDS 508, на рис. 6.12 — коммутатор EDS 726 фирмы MOXA Technologies и на рис. 6.13 — коммутатор T200 фирмы Westermo. Коммутатор T200 используется в диапазоне температур -40...+65°C. Время реконфигурации избыточного звена в кольцевой топологии менее 50 мс. Число коммутаторов в кольце достигает 200.

При необходимости беспроводного соединения Ethernet-устройств (контроллеры, системы сбора данных, приборы) используются преобразователи (адаптеры) для подключения этих устройств к беспроводной сети Wireless Ethernet (протокол 802.11b).

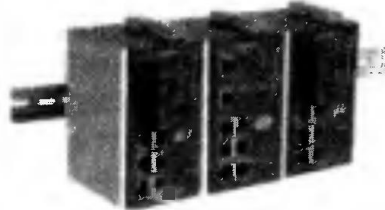


Рис. 6.11



Рис. 6.12

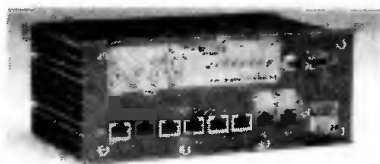


Рис. 6.13



Рис. 6.14

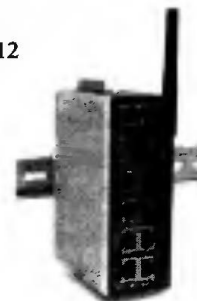


Рис. 6.15

Применяются преобразователи проводного Ethernet (10 BaseT) в беспроводной Ethernet и преобразователи последовательных интерфейсов RS-232/RS-422/ RS485 в беспроводной Ethernet.

На рис. 6.14 показан преобразователь Ethernet 10 BaseT в беспроводной Ethernet типа AWK-1110, а на рис. 6.15 — четырехпортовый преобразователь RS-232/RS-422/ RS-485 в беспроводной Ethernet — NPort W2004 фирмы *Moxa Technologies*.

### 6.3.5. Сети верхнего уровня

**Сеть Token Ring.** Разработана фирмой *IBM* в 1985 г. (стандарт IEEE 802.5). Поставщиками сетевого оборудования являются фирмы *Protean* и *3COM*, программного обеспечения — *Novell*, *3COM*, *Univation*. В сети используется метод передачи маркера по кольцу (кольцевая топология сети). Перемещаясь по кольцу маркер предоставляет последовательно каждой рабочей станции право на передачу сообщения. Станция, получив пустой маркер, может его заполнить сообщением любой длины (frame-кадр), но в течение определенного времени, определяемого специальным таймером. Кадр перемещается по кольцу и каждая станция регенерирует его. Станция, которой предназначено сообщение, копирует его, отмечая как принятый, но не выводит сам кадр из кольца. Эту функцию выполняет передающая станция, когда кадр возвращается к ней обратно.

Достоинством сети является возможность проверки достоверности кадра и работоспособности принимающей станции. Кроме того, сеть имеет механизм приоритета, когда отдельные станции могут получать маркер быстрее других и дольше его удерживать.

При использовании звездообразной кольцевой топологии станции связаны с концентратором, а последние соединяются по кольцевой схеме. Это дает возможность отключить неисправную станцию без нарушения работы всей сети. Максимальное расстояние между станцией (узлом) и концентратором — 300 м, а между концентраторами — 2000 м. Число станций, подключаемых к одному концентратору — 8. Максимальное число станций для сети с IBM-кабелями — 260, с ветвями на витой паре — 72. Скорость передачи в сети Token Ring от 4 до 10 Мбит /с.

**Сеть ARCNET.** Сеть разработана фирмой *Datapoint Corp.* в 1977 г. Основными поставщиками оборудования являются фирмы *Datapoint*, *Standard Microsystems* и *Pure Data*. В сети используется метод доступа с эстафетной передачей для сетей со звездообразной топологией.

Каждая станция подключается к концентратору, являющемуся центральной точкой звезды. Концентраторы соединяются между собой шиной. Число станций, подключаемых к одному концентратору, может составлять 4, 8, 16 или 32. Станция может передавать сообщение только тогда, когда получит маркер (token). Маркер представляет собой последовательность битов данных, созданную одной из станций. Всем станциям сети присвоены номера или адреса от 0 до 255 (максимально е число станций в сети — 256). Маркер перемещается по сети от станции к станции строго в порядке возрастания сетевых номеров независимо от того, в каком сегменте сети расположена станция. От станции 255-й маркер переходит к 0-й, создавая таким образом логическое кольцо. При получении маркера станция формирует пакет данных объемом до 512 байт путем добавления к маркеру адреса станции назначения, собственного адреса и до 508 байтов информации. Сформированный таким образом пакет переходит от станции к станции, пока не достигнет адресата, где данные вы водятся из пакета, а маркер переходит к следующей станции. Для передачи большего объема информации (чем 508 байт) может потребоваться несколько проходов маркера по сети.

Преимуществом эстафетной передачи является возможность расчета ее производительности (времени и объема передач). Недостатком — необходимость регенерирования маркера каждой станцией, а в случае неисправности станции — искажение или потеря маркера. Поэтому применяются специальные меры для регенерации (восстановления) маркера.

К каждому концентратору возможно подключение до 8-ми станций, каждая из которых может быть удалена от концентратора на расстояние до 600 м. Скорость передачи информации в сети составляет 2,5 Мбит/с.

Технические характеристики промышленных сетей приведены в табл. 6.4 на с. 459. Общее число промышленных сетей к настоящему времени достигает около 250. В таблице приведены наиболее часто применяемые сети в распределенных системах управления.

#### **6.4. Беспроводные сети систем управления.**

Беспроводные сети в последние годы находят все большее применение в распределенных системах управления. Стандартизация сетей, унификация и большой выбор сетевого оборудования, высокое качество связи и высокая скорость передачи информации, надежная защита от несанкционированного доступа, широкий диапазон охвата территории, интеграция с проводными промышленными сетями, простота обслуживания и, конечно, отказ от дорогостоящих кабельных сетей — основные причины широкого использования беспроводных технологий связи [6.18-6.29]. Беспроводные сети подразделяются в зависимости от признаков:

- 4.1.47 по способу обработки информации — на аналоговые и цифровые;
- 4.1.48 по местонахождению абонентов — на подвижные (мобильные) и неподвижные (стационарные);
- 4.1.49 по ширине полосы передачи данных — на узкополосные, широкополосные и сверхширокополосные;
- 4.1.50 по территориальной протяженности — на персональные, локальные, региональные (городские) и глобальные;
- 4.1.51 по виду передаваемой информации — на системы передачи голоса, видео и данных.

Беспроводные сети широко применяются для мониторинга и управления удаленными объектами, которые характеризуются следующими особенностями:

4.1.52 удаленные объекты могут быть необслуживаемыми, т. е. на этих объектах отсутствует постоянный обслуживающий персонал;

4.1.53 доступ этих объектов к кабельным трассам затруднен или отсутствует; объекты характеризуются жесткими условиями эксплуатации (повышенная влажность, большой диапазон температур, сильные электромагнитные поля и т. п.);

- объекты могут быть мобильными;
- объекты имеют ограниченный объем данных для контроля и управления.

Новой тенденцией применения беспроводных сетей является создание беспроводных приборов контроля температуры, давления, расхода и др. Беспроводные решения Smart Wireless от компании Emerson Process Management позволяют передавать значения параметров от беспроводного датчика температуры Rosemount 648 или беспроводного датчика давления Rosemount 3051S в беспроводную сеть к беспроводному шлюзу 1420. Питание беспроводных приборов осуществляется от искробезопасного модуля питания и, таким образом, эти приборы могут устанавли-

ливаться во взрывоопасных средах. Собранные шлюзом 1420 данные передаются по проводным линиям связи (Ethernet, RS-485) к рабочей станции или ПЛК.

К организациям, участвующим в разработке стандартов беспроводных сетей, относятся: Международный телекоммуникационный союз (ITU — International Telecommunications Union), Международная организация по стандартизации (ISO), созданная на базе Международной электротехнической комиссии (IEC — International Electrotechnical Commission), Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Беспроводные системы связи делят на системы первого поколения, второго (2G), третьего (3G) и четвертого (4G). Системы первого поколения представляли собой системы с аналоговыми каналами. Сетью первого поколения в США была сеть AMPS (Advanced Mobile Phone System — усовершенствованная система мобильной телефонной связи). Для этой сети были выделены две полосы частот по 25 МГц: (869-894 МГц) — для передачи сигналов от базовой станции до мобильных устройств (прямой канал) и (824-849 МГц) — для передачи сигналов от мобильных устройств на базовую станцию (обратный канал). Оператору выделялось по 12,5 МГц в каждом направлении, разбитом на полосы по 30 кГц. Таким образом, оператор может поддерживать 416 каналов. Сети первого поколения эксплуатировались в различных странах в период 1983-85 гг.

К сетям второго поколения (2G) относят сети GSM, IS-136, IS-95 и др.

В конце 90-х годов компанией Bell System предложен принцип сотовой беспроводной связи, который заключается в использовании большого числа маломощных передатчиков. Поскольку зона действия передатчика мала, общая площадь разбивается на ячейки или соты (cell), каждая со своей антенной. Каждой ячейке выделяется своя полоса частот, обслуживаемая базовой станцией. В состав базовой станции входят передатчик, приемник и модуль управления (контроллер).

Основные достоинства сотовой связи:

- радиопомехи не связаны с расстоянием между сотами, а определяются отношением расстояния между сотами с одной и той же частотой и радиуса соты; радиус соты определяется мощностью передатчика и высотой антенны;

2) Первые подвижные передатчики и система двусторонней подвижной связи для департамента полиции были созданы в 1930 г. в США. К 1940 г. полицейские системы США использовали принцип частотной модуляции сигналов. Концепция сотовых сетей сформулирована в 1947 г. инженером компании Bell System Д.Х. Рингом. В 1978 г. введена система сотовой связи NMTS, а в 1983 г. AMPS (США), в 1985 г. - TACS (Великобритания), в 1986 г. — NETZ-C (Германия) и др. В 1981 г. компания Ericsson (Швеция) ввела в эксплуатацию стандарт NMT-450 (Nordic Mobile Telephone — мобильная телефония для северных стран). В 1992 г. в Финляндии началось внедрение стандарта 2-го поколения - GSM. В 1993 г. разработан стандарт на основе метода CDMA. В 2001 г. в Японии впервые запущен стандарт 3-го поколения W-CDMA оператором связи NTT DoCoMo.

- принцип дробления соты, заключающийся в том, что при ослаблении сигнала большая сота может быть преобразована в соты меньшего радиуса.

Для удобства графического изображения соты изображаются в виде шестиугольника (гексагональная структура) с базовой станцией в центре соты. Каждая станция соединяется проводной или беспроводной связью с коммутатором мобильной телекоммуникации MTSO (Mobile Telecommunications Switching Office) или по другим источникам с центром коммутации подвижной связи MSSC (Mobile Services Switching Center) [6,18, 6,26]. Один коммутатор обслуживает несколько базовых станций.

Между мобильным устройством и базовой станцией существуют каналы связи двух типов: каналы управления (поддержка звонка, установление связи и пр.) и информационные каналы (передача речи и данных). Включенное мобильное устройство в результате сканирования каналов выбирает наиболее мощный настроечный канал (как правило, от ближайшей к нему базовой станции). Затем осуществляется процедура квитиования для опознавания пользователя и определения его местоположения в пределах соты. Каждое мобильное устройство имеет модуль идентификации абонента SIM (Subscriber Identity Module). Дальнейший порядок соединения двух абонентов начинается с отправки номера вызываемого абонента по выбранному каналу на базовую станцию,

которая в свою очередь отправляет запрос на коммутатор MTSO. Последний устанавливает связь с вызываемым, отправляя адресное сообщение той базовой станции, в зоне которой находится вызываемый абонент. При распознавании своего номера в настроечном канале вызываемый абонент оповещает свою базовую станцию, которая соединяется с коммутатором MTSO. После этого коммутатор устанавливает канал связи между базовыми станциями двух абонентов. В течение этого соединения происходит обмен речевыми сообщениями и данными двух мобильных устройств по каналу между базовыми станциями и коммутатором. При переходе абонентов в др. зоны (соты) осуществляется автоматическое переключение каналов (и базовых станций) без прерывания связи. Основным параметром при переключении является интенсивность сигнала от мобильного устройства к базовой станции.

Поскольку коммутатор MTSO подключен к коммутатору телефонной сети, то возможно установление соединения между мобильным пользователем и стационарным абонентом телефонной сети.

Методы доступа к среде передачи данных в беспроводных сетях следующие:

- множественный доступ с частотным разделением FDM (Frequency Division Multiplexing), когда каждое устройство работает на строго определенной частоте;
- множественный доступ с временным разделением TDM (Time Division Multiplexing), когда радиостанции работают на одной частоте, но в различные промежутки времени;
- множественный доступ с кодовым разделением CDM (Code Division Multiplexing), когда все радиостанции передают сигналы на одной и той же частоте, но с разной кодировкой.

На механизме разделения каналов (CDMA — CDM Access) основаны стандарты сотовой связи IS-95a, cdma 2000 и др.). В схеме CDM передатчик заменяет каждый бит данных на CDM-символ в виде кодовой последовательности длиной 11, 16, 32, 64 и т. д. бит (эта последовательность называется чипом). Приемник настроен на прием CDM-кода передатчика, при этом сигналы других передатчиков с другими CDM кодами воспринимаются этим приемником как аддитивный шум. Используется метод частотного уплотнения, когда в определенной последовательности центральная частота каждого передатчика дискретно изменяется (метод частотных скачков). Приемник при этом синхронно перестраивается на частоту передатчика.

Достоинством кодового уплотнения является повышенная помехозащищенность.

Известен также метод временных скачков, при котором момент передачи пакетов информации изменяется по псевдослучайному закону.

Для схемы уплотнения при TDM-доступе используются два алгоритма: фиксированное распределение центральной станцией времени начала передачи между абонентами и метод случайного доступа к сети. Усовершенствованием последнего метода является метод множественного доступа с детектированием несущей — CSMA (Carrier Sense Multiple Access). Детектирование несущей означает, что канал прослушивается устройством и если канал занят, то передатчик переходит в ждущий режим. Все устройства в этой схеме являются равноправными. Разновидностью метода CSMA является метод CSMA/CA (CA — Collision Avoidance — предотвращение конфликтов), который используется в беспроводных сетях стандарта IEEE 802.11.

Применяются также методы множественного доступа с распределением по запросу DAMA (Demand Assigned Multiple Access), схемы TDMA с резервированием и др.

#### 6.4.1. Сети GSM

Стандарт GSM (Global Mobile System for mobile communication - глобальная система мобильной связи), введенный в 1990 г., представляет собой стандарт сотовой связи на частотах 900, 1800 и 1900 МГц. Стандарт DCS 1800 для частот 1800 МГц используется в Европе, а стандарт PCS 1900 для частот 1900 МГц — в США [6.18-6.19].

Стандарт GSM основан на технологии множественного доступа с разделением по времени TDMA (Time Division Multiple Access). Диапазон рабочих частот передачи сигнала мобильным устройством составляет 890..915 МГц и диапазон частот приема сигнала базовой станции — 935...960 МГц. Ширина канала 200 кГц (для GSM 1800 — 1785 и 1805...1880 соответственно), по 25 кГц на канал, число пользователей на один канал равно 8. В GSM 900 весь диапазон делится на 124 канала (124 канала на передачу и 124 канала на прием данных с частотным интервалом между каналом передачи и каналом приема данных 45 МГц). Канал разбит на 25 кадров длительностью 4,615 мкс каждый. Таким образом, мультикадр имеет длительность 115 мс. Кадр состоит из 8 канальных интервалов, каждый длительностью 577 мкс (тайм-слот для приема и передачи, выделенный каждой станции). В каждом канальном интервале данные занимают объем 57 бит. Таким образом, мобильная станция передает базовой станции информацию в течение 577 мкс каждые 4,615

мс. Базовая станция связывается с мобильной станцией так же, но на частоте на 45 МГц выше (для разноса частот передачи и приема). После передачи 148 бит передатчик «молчит» в течение защитного интервала 30,44 мкс, что по времени эквивалентно передаче 8,25 бит [6.19].

Максимальное удаление мобильной станции от базовой для GSM 900 составляет порядка 35 км (для GSM 1800 до 10 км). Радиус соты в 35 км. ограничен временной задержкой распространения сигнала.

Используя GSM-модемы операторские станции могут обмениваться с контроллером, используя SMS-сообщения или прямое соединение.

К преимуществам GSM-связи относятся:

- использование SIM-карт для доступа к каналу связи с функциями идентификации пользователя;
- использование технологии SMS (Short Message Service — служба коротких сообщений) при обмене с ПК, ПЛК и сотовыми телефонами буквенно-цифровыми и текстовыми сообщениями в объеме до 160 символов;
- аутентификация абонента и идентификация абонентского оборудования и др. GSM-телемеханика обеспечивает хорошее качество связи, простоту установки и обслуживания оборудования, автоматический роуминг (маршрутизацию) различных сетей GSM с широким охватом территории и мобильность.

Это дает возможность безлюдного обслуживания удаленных объектов нефтегазового комплекса, тепловых пунктов, насосных станций, сетей учета энергоресурсов.

Различные фирмы выпускают промышленные контроллеры с GSM-портами для подключения GSM-модема (контроллеры Alpha фирмы *Schneider Electric*, M90 фирмы *Unitronics*, ADAM 5510/SLG фирмы *Advantech*, ТЕКОНИК фирмы Текон и др.).

Для программирования контроллеров применяются различные пакеты ПО, например: GSM Control, GPRS/WAP-Tool и GSM-Dial компании *Klinkmann*; Micro TRACE MODE GSM+ фирмы AdAstra Research Group (предустановлено в контроллеры ТЕКОНИК и ADAM 5510/SLG); SMS RTD Mobile ToolKit для встраиваемого модема COM 17035 формата PC/104 корпорации RTD (Real Time Devices); Empty Profile для модуля MM-7188 (на основе модуля 1-7188) и модуля MM-7188 Ethernet компании ICPDAS [6.20-6.23].

Для объединения различных устройств в мобильную сеть GSM предназначены GSM-модемы. Применяются GSM-модемы двух типов: законченные (аппаратные) модемы с последовательным портом для связи с ПЛК или ПК (GSM-модемы *Siemens MI*, M20T и TC35T) и модульные малогабаритные модемы на печатной плате (GSM- модуль *Siemens TC35* или *Siemens MC35* на плате формата PC/104).

Ряд фирм выпускает аппаратно-программные комплексы для построения сетей GSM на общей платформе (шасси) которых размещены базовая станция, контроллер, коммутатор, модемы (например, комплекс WAVE Express компании *interWAVE Communications Inc.*).

К сетям стандартов 2-го поколения помимо GSM (900 и 1800 МГц) относятся сети стандарта CDMA (Code Division Multiple Access — множественный доступ с кодовым разделением каналов). Спецификация IS-95 (cdmaOne) стандарта GSM использует частотный диапазон 824...840 и 869...885 МГц (интервал 45 МГц). Для увеличения скорости передачи по спецификации IS-95b разработана широкополосная сеть WCDMA. Скорость передачи в сети WCDMA до 64 кбит /с. Дальнейшим развитием спецификации IS-95 является проект cdma2000, использующий утроение спектральной полосы канала cdmaOne с частоты 1,25 до 3,75 МГц, что позволяет увеличить скорость передачи до 2 Мбит/с.

В целом по данным [6.29] 70% сетей подвижной связи в 130 странах принадлежат сетям GSM, 15% — стандарту CDMA (IS-95), 9% — стандарту TDMA (IS-136) и 5% рынка занимают сети японского стандарта PDC. Число абонентов стандарта GSM непрерывно растет: 1995 г — 13 млн, 2000 г — 456 млн, 2003 г — 847 млн, 2007 г — более млрд. По прогнозам специалистов данный стандарт будет определяющим в течение ближайших 5-10 лет.

К другим системам 2-го поколения относятся системы IS-136 и IS-95.

Система IS-136 использует метод доступа TDMA. Полоса частот базовой станции составляет 869-894 МГц, мобильного устройства — 824...849 МГц, ширина канала 30 кГц, число дуплексных каналов 832, число пользователей на один канал равно 3, мощность мобильного устройства до 3 Вт.

Система IS-95 использует метод доступа CDMA. При этом методе доступа каждой ячейке выделяется полоса частот, разделенная на две части для прямого и обратного каналов. При пол-

дуплексной связи мобильное устройство использует оба канала. Передача данных осуществляется по схеме расширения спектра методом прямой последовательности (DSSS), при котором используется дробление кода для увеличения скорости передачи данных и расширения полосы частот. Полоса частот базовой станции и мобильных устройств аналогичны системе IS-136. Ширина канала составляет 1250 кГц, число дуплексных каналов — 20, число пользователей на один канал — 35.

Дальнейшим развитием стандарта и сети GSM стал стандарт GPRS.

#### 6.4.2. Сети GPRS

Стандарт GPRS (General Packet Radio Service — услуга пакетной передачи данных по радиоканалу) или сетевая служба 2,5G. Оператор GPRS предоставляет пользователю услуги связи с расчетом исходя из объема переданных данных, а не в зависимости от времени связи, как в сети GSM. Скорость передачи данных по каналу GPRS достигает 40... 115 кбит/с (с использованием GSM/GPRS модема Siemens MC35 в режиме GPRS или GPRS-модема Siemens MC35T в режиме приема данных до 85,6 кбит/с), в то время как по GSM-каналу только 10... 16 кбит/с. GPRS-модемы могут быть постоянно подключены к сети, благодаря чему не тратится время на набор номера абонента и гарантируется передача и прием данных без задержек. Повышенная скорость передачи объясняется тем, что пакетная коммутация гарантирует быстрое установление соединения и абонент занимает канал только на момент передачи. При пакетной коммутации данные передаются в интервалы, свободные от речевого трафика [6.19, 6.23].

GPRS поддерживает все основные протоколы передачи данных, в том числе Интернет-протокол IP. Без дополнительных устройств GPRS позволяет реализовать соединение через интерфейсы TCP/IP или X.25 с различными устройствами. Также GPRS позволяет осуществить многоточечную передачу данных между провайдером сети и группой мобильных GPRS-абонентов. При совместимости с GPRS/WAP возможен доступ с сотового телефона к серверу БД. Использование для доступа к данным глобальной сети Интернет позволяет получать данные и управлять удаленными объектами в любом месте и в любое время. Этим реализуется предлагаемая фирмой *Intel* концепция «обеспечения взаимодействия вычислительных и коммуникационных устройств в любом месте и в любое время между различными устройствами». Данная концепция также стимулирует применение клиентских мобильных (карманных) ПК на базе архитектуры Intel Personal Internet Client Architecture (Intel PCA).

Структура GPRS-системы включает два основных узла — узел поддержки SGSN (Serving GPRS Support Node) и шлюз GGSN (Gateway GPRS Support Node).

В функции узла поддержки SGSN входят контроль доставки пакетов данных пользователям, проверка по реестру перечня разрешенных услуг, регистраций абонентов сети. При регистрации мобильному абоненту выдается временный номер для пакетной передачи данных. При этом местонахождение абонента определяется в зависимости от его состояния: IDLE (неработающий или отключен), STANDBY (режим ожидания) или READY (готовность). В режиме IDLE абонент не отслеживается, в режиме STANDBY местоположение абонента известно в пределах области маршрутизации, а в режиме READY известно с точностью до соты.

В функции шлюза GGSN входит роуминг данных, поступающих к абоненту и от абонента, адресация данных, присвоение IP-адресов, тарификация услуг и др.

Система GPRS имеет несколько классов QoS (Quality of Service — качество сервиса), — приоритет, скорость обмена, степень надежности. В число сервисных функций входят также контроль параметров управления объектами за счет встроенных ПИД-регуляторов, сигнализация отклонений параметров от заданных значений, включение/отключение объектов, аппаратный WatchDog и др.

Сессия передачи по GPRS-каналу характеризуется типом протокола передачи (PDP — Packet Data Protocol), PDP-адресом мобильного абонента, адресом шлюза GGSN. При пакетной передаче данных предусмотрено два вида соединений: PTP (Point-to-Point — «точка-точка») и PTM (Point-to-Multipoint — «точка-многоточие»), GPRS-модемы, как и GSM-модемы, выпускаются в виде законченных устройств (рис. 6.16) и в виде встраиваемых модулей.



Рис. 6.16

Так, модемы Siemens TC35 Terminal и MC35 Terminal поддерживают все функции сотового телефона, но с управлением не с помощью клавиатуры, а по интерфейсу RS-232. Поэтому модем может быть легко включен в любую промышленную сеть с помощью соответствующих преобразователей (например, для сети на базе интерфейса RS-485 могут использоваться преобразователи RS-232/RS-485 ADAM 4521, а для включения в сеть Ethernet — ADAM 6531 и др.).

Постоянный рост числа пользователей услуг мобильной связи по каналам GSM/ GPRS и увеличение выпуска беспроводных мобильных и карманных ПК, мобильных телефонов с поддержкой протокола WAP с доступом через Интернет к БД, различным протоколам и промышленным шинам свидетельствует о развитии в ближайшие годы GSM/GPRS-телемеханики.

Помимо стандарта GPRS к сетям 2,5G относят сети, основанные на технологиях HSCSD (скорость передачи 9,6...57,6 кбит/с) и EDGE (скорость передачи 64...384 кбит/с).

#### **6.4.3. Беспроводные системы связи 3-го и 4-го поколения (3G и 4G)**

Основные отличия систем 3G (Third Generation) от систем связи 2-го поколения заключаются в том, что имеется возможность передачи больших объемов информации с высокой скоростью и доступа в беспроводный Интернет.

К другим достоинствам относятся полная унификация оборудования, предоставление полного набора услуг мультимедиа через стационарную, мобильную или спутниковую системы связи, глобальный роуминг, позволяющий абоненту пересекать границы государств, используя при обмене данными и речевыми сообщениями один и тот же номер и одно и то же мобильное устройство.

Технология 3G базируется на методе доступа CDMA (множественный доступ с кодовым разделением каналов).

Основой архитектуры является технология IP с пакетной передачей данных и оплатой за объем передаваемой информации, а не за время связи.

Системы связи 3G работают на частоте 2 ГГц со скоростью 2 Мбит/с. Существуют два стандарта системы 3G: UMTS (Universal Mobile Telecommunication Systems — универсальная мобильная телекоммуникационная система) и CDMA 2000 (Code Division Multiple Access — мультимножественный доступ с кодовым разделением каналов).

Стандарт UMTS (или W-CDMA) распространен в основном в Европе, а стандарт CDMA 2000 — в США и Азии. Международный альянс ITU в программе IMT 2000 определил следующие скорости обмена данными: для быстрых мобильных абонентов (в поездах, автомобилях и пр.), перемещающихся со скоростью до 120 км/ч, — 144 кбит/с; для медленных абонентов при скорости до 3 км/ч — 384 кбит/с; для неподвижных абонентов (в помещениях) — до 2048 кбит/с.

В России в октябре 2007 г. коммерческую сеть связи UMTS запустил оператор сотовой связи «МегаФон». Лицензии на услуги 3G получили также ОАО «МТС» и ОАО «ВымпелКом».

К числу перспективных беспроводных сетей 4-го поколения (4G) относят сети со скоростью обмена до 20, а в дальнейшем и до 100 Мбит/с, которые представляют собой комбинацию сетей 2G и аналога беспроводных локальных сетей. Сети 4G позволят получать на мобильные терминалы видеоизображения высокого качества и телевизионные программы. Данные характеристики сети связи 4G могут быть получены по прогнозам специалистов к 2010 году.

#### **6.4.4. Технология WiFi (стандарты IEEE 802.11 a/b/g)**

Первоначальный стандарт беспроводных локальных сетей IEEE 802.11 охватывает два нижних уровня модели ISO/OSI, а именно Physical (физический) и Data Link (канальный). В стандарте IEEE 802.2 канальный уровень разделен на два подуровня: LLC (Logical Link Control — управление логическим каналом) и MAC (Medium Access Control — управление доступом к среде). MAC подуро-

вень описан в стандарте IEEE 802.11. На физическом уровне стандарт определяет функциональные и электрические характеристики физического соединения и скорость передачи данных. MAC уровень управляет доступом к сети, механизмом защиты и восстановления данных. Предусмотрена передача пакетов с 48-ми битовыми адресами.

Стандарт IEEE 802.11 определяет сотовую архитектуру беспроводной сети передачи данных. Каждая сота управляется базовой станцией, в зоне обслуживания которой находятся пользовательские станции. Базовые станции связаны между собой и при переходе мобильной станции пользователя из зоны обслуживания одной базовой станции в другую распределительной системой гарантируется подсоединение этой мобильной станции к сети. Механизм защиты данных предусматривает помимо кодирования данных также аутентификацию станций передачи и приема данных. Дальнейшим развитием стандарта IEEE 802.11 являются стандарты IEEE 802.11a, IEEE 802.11b и IEEE 802.11g, которые принято относить к технологии WiFi (Wireless Fidelity — беспроводная сеть высокой точности) по аналогии с HiFi. Стандарт разработан консорциумом Wi-Fi Alliance в составе 80 компаний на базе стандарта 802.11. Связь обеспечивается в радиусе 80...300 м от точки доступа. При увеличении мощности приемно-передающих устройств и антенны расстояние может быть увеличено до нескольких километров.

Стандарт IEEE 802.11a использует диапазон частот 5,15.. 5,825 ГГц с шириной канала 20 МГц. Формирование сигнала осуществляется в частотной области методом мультиплексирования по ортогональным частотам (OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing). В зависимости от скорости кодирования передача осуществляется со скоростью 6...54 Мбит/с на расстоянии до 100 м.

Стандарт IEEE 802.11b использует частоту 2,4 ГГц со скоростями передачи до 5,5 и 11 Мбит/с.

Стандарт IEEE 802.11g также использует ту же частоту 2,4 ГГц, но скорость передачи увеличена до 54 Мбит/с. Стандарт определяет метод передачи DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum — расширение спектра методом прямой последовательности) или формирование широкополосного сигнала во временной области. Стандарт IEEE 11g совместим со стандартом IEEE 802.11b, т. е. использует метод OFDM и имеет скорость передачи до 54 Мбит/с.

Поскольку доступ к сети использует модель CSMA/CD, для предотвращения конфликтов стандартом IEEE 802.11 предусмотрен защитный механизм, предусматривающий перед началом работы в сети передачу «запроса на передачу» (RTS — Request To Send) и получение подтверждения «можно передавать» (CTS — Clear To Send). Механизм RTS/CTS используется в сетях по стандартам IEEE 802.11b и IEEE 802.11g.

#### **6.4.5. Беспроводная технология Bluetooth (стандарт IEEE 802.15)**

Основана на пакетном способе обмена информацией с разделением по времени в полосе частот 2,4.. 2,48 ГГц. Стандарт предусматривает дуплексный способ передачи, защиту данных идентификацией абонента и устройства и применяется для обмена данными на небольших расстояниях (до 100 м), например, связь беспроводных телефонов, компьютеров и др. [6.25].

Основные достоинства технологии Bluetooth: малая мощность передатчика и малое энергопотребление из-за небольшого радиуса действия; высокая помехоустойчивость; низкая стоимость. Структура устройства Bluetooth включает трансивер, контроллер связи, управляющее устройство для обмена данными с терминалом. В 2003 г. сформированы два новых стандарта — 802.15.3 (высокоскоростной) и 802.15.4 (низкоскоростной или стандарт ZigBee).

Основные характеристики радиоинтерфейса Bluetooth: вид модуляции - метод частотных скачков (до 1600 скачков в секунду); скорость обмена данными — 1, 2 и 3 Мбит/с; количество устройств в сети не ограничено; мощность передатчика — 100 мВт; радиус действия — 10... 100 м.

В 1998 г. компании *IBM, Intel, Toshiba* и *Nokia* сформировали группу Bluetooth SIG (Special Interest Group) для создания технологии беспроводного соединения мобильных устройств, куда впоследствии вошли свыше 200 фирм. В 2001 г. вышла версия Bluetooth 1.1 (стандарт IEEE 802.15.1), в 2003 г. — версия Bluetooth 1.2 и в 2004 — Bluetooth 2.0+EDR (Enhanced Data Rate) с расширенным набором скоростей передачи данных до 1, 2 и 3 Мбит/с. Стандарт описывает пакетный способ передачи данных в диапазоне частот от 2400 до 2483,5 МГц. Используется метод расширения спектра при скачкообразном изменении частоты FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum). Вся полоса частот делится на подканалы (79 для США и Европы и 23 для Испании и Франции) шириной 1 МГц каждый и интервалом между частотами 140... 175 кГц. Канал представляет собой псевдослучайную последовательность скачков по 79 подканалам. Канал делится на временные сегменты по 625 мкс (слот), каждому из сегментов соответствует свой подканал (несу-

щя). При частотных скачках передатчик синхронно с приемником со скоростью 1600 скачков в секунду «перескакивает» с несущей на несущую. При наличии шума в канале осуществляется переход на другой канал и так до тех пор, пока не будет найден свободный от шума канал [6.19, 6.25].

Bluetooth поддерживает соединения «точка/точка» и «точка/многоточка». Два и более устройств, использующих один и тот же канал, образуют пикосеть (piconet). Одно из устройств в пикосети является основным (master), а другие — подчиненными (slaves). В одной пикосети может быть до 7 активных slaves; остальные slaves находятся в режиме «парковки» (park), оставаясь синхронизированными с основным устройством. Несколько пикосетей образуют распределенную сеть, в которой master одной пикосети может быть slave в другой пикосети.

Стандарт Bluetooth определяет дуплексную передачу с временным разделением TDD (Time Division Duplexing). Время передачи пакетов может занимать до 5 временных сегментов по 625 мкс. Протокол поддерживает асинхронную передачу ACL (Asynchronous Connection Less), синхронную передачу SCO (Synchronous Connection Oriented) и одновременную асинхронную передачу данных и синхронную передачу голоса. Синхронные каналы SCO применяется для соединений «точка-точка» для передачи речевых сообщений со скоростью 432,6 кбит/с по интерфейсам USB, RS 232. ACL поддерживает соединения «точка/точка» и «точка/многоточка» со скоростью передачи 723,3/57,6 кбит/с в асимметричном режиме и 432,6 кбит/с в симметричном режиме. Для каждого из видов связи используются 12 типов пакетов и 4 контрольных пакета являются общими.

Каждому устройству Bluetooth присвоен уникальный 48-разрядный физический адрес. Формат пакета Bluetooth содержит код доступа (72 бита), заголовок (54 бита) и информационное поле (0...2745 бит). В код доступа входят биты синхронизации на основе адреса и контрольной суммы. Заголовок содержит адрес активного устройства, код типа данных, бит готовности к приему данных, бит подтверждения приема и контрольную сумму. Информационное поле содержит поле данных и поле голосовых сообщений.

Устройства Bluetooth могут находиться в трех режимах: режим Standby, режим подключения к сети и режим «парковки». В режиме Standby устройство включено и готово к работе. Из состояния Standby устройство переходит в режим сканирования адресованных ему сообщений. Приняв сообщение, устройство отправляет Мастеру идентификационный пакет. Если устройство зарегистрировано в пикосети, Мастер посылает пакет синхронизации, а подчиненное устройство в ответ посылает подтверждение приема. После этого считается, что соединение установлено и осуществляется обмен данными.

В версии Bluetooth 2.0+EDR в режиме EDR применяется дифференциальная фазовая модуляция. В результате при базовой скорости 1 Мбит/с скорость вырастает до 2 и 3 Мбит/с. Модем стандарта Bluetooth показан на рис. 6.17.



Рис. 6.17

К другим стандартам относят стандарт IEEE 802.15.3 для беспроводных сетей WPAN (частота 2,4 ГГц, скорость передачи данных 11, 22, 33, 44 и 55 Мбит/с на расстоянии до 100 м, число пользователей в сети — до 245) и стандарт IEEE 802.15.4 для сетей ZigBee (скорость передачи до 250 кбит/с на расстоянии до 10 м). Стандарт ZigBee (Zig — зигзаг, Bee — пчела) описывает низкоскоростную сеть, разработанную компаниями *Invensys*, *Honeywell*, *Mitsubishi Electric*, *Motorola* и *Philips*. Используются 3 диапазона частот: 868,0...868,6 МГц (1 канал), 902...928 МГц (10 каналов, шаг частот 2 МГц) и 2400...2483 МГц (16 каналов, шаг частот 5 МГц). Топология сети — «звезда» и «точка/точка».

#### 6.4.6. Стандарт IEEE 802.16

Дальнейшее повышение диапазона частот предусматривается в стандартах IEEE (10...66 ГГц) и IEEE 802.16.3 (2...11 ГГц). Основным механизмом управления передачей и приемом данных стандарта IEEE 802.16 служат управляющие сообщения, которые регламентируют профили пакетов, управление доступом к каналу по запросу, механизмы защиты и пр. [6.19].

Для увеличения дальности передачи до сотни и более километров используются стационарные радиосети на выделенной частоте. Передача информации организуется с использованием радиомодемов, работающих на базе GSM-технологии.

В число характеристик радиосети входят: диапазон частот (900 МГц и 2,4 ГГц); шаг сетки частот (6,25; 12,5; 25 КГц и др.); потребляемый ток и рабочее напряжение; чувствительность приемника; выходная мощность передатчика; полоса пропускания.

К характеристикам радиомодема относятся скорость передачи, вид модуляции, дальность передачи. Использование радиомодемов с выделенной частотой имеет некоторые недостатки: необходимость лицензирования частоты, а при необходимости увеличения дальности связи требуется установка репитеров. К недостаткам радиоканала относят высокую стоимость приемопередающих устройств, низкую помехозащищенность и трудности в обеспечении секретности передаваемой информации.

#### **6.4.7. Инфракрасный канал (ИК-канал)**

Инфракрасная связь IR (Infrared) Connection (стандарт IrDA 1.1) позволяет осуществить беспроводную связь между двумя устройствами, находящимися друг от друга на расстоянии до нескольких метров [6.18]. В отличие от радиоканала ИК-канал нечувствителен к электромагнитным помехам и может использоваться в производственных условиях. Различные ИК-системы позволяют обмениваться со скоростями от 115,2 кбит/с до 5 Мбит/с. В качестве передатчика используется светодиод с эффективной длиной волны  $\lambda = 880$  нм, в качестве приемника — PIN-диод. Наиболее часто используется топология — шина. Недостатками ИК-канала являются достаточно высокая стоимость передатчиков и приемников, а также трудности обеспечения секретности передаваемой информации.

Таблица 6.4. Характеристики промышленных сетей

Шина	Разработчик технологии	Топология сети	Физическая линия связи	Максимальное число устройств	Максимальная длина соединения	Скорость обмена
ASi	ASi Consortium 1993	Общая шина, кольцо, древовидная звездообразная и другие	ВП	31 подчиненное устройство	100 м, с ретрансляторами 300 м	156 кбит/с
Hart	Fisher-Rosemount Inc, 1985	Точка-точка, звезда, шина	ЭВП	15 (топология – шина)	Неограничено	1,2 кбит/с
Modbus RTU/ASCII	Schneider Electric, 1979	Общая шина, звездообразная, древовидная сеть с сегментами	ЭВП	247 узлов на сегмент	350...1200 м	75...57600 бит/с
Modbus Plus	Schneider Electric	Общая шина	ВП	32 узла на сегмент, не более 64 узлов	450 м на сегмент; общая длина — 1800 м	1 Мбит/с
Interbus-S	Phoenix Contact, 1984	Сегментированная с Т-образными отводами	ВП, ВОК, контактное кольцо	512 узлов	400 м на сегмент, общая протяженность не более 12,8 км	500 кбит/с; 2 Мбит/с
DeviceNet	Allen-Bradley, 1994	Магистральная линия с ответвлениями (6 м)	ВП (4-х проводная для передачи сигнала и напряжения питания)	64 узла (32 устройства на один узел)	100, 250, 500 м (зависит от скорости передачи); с ретрансляторами до 6 км	125, 250 или 500 кбит/с
PROFIBUS DP	Siemens, 1994	Линейная, звездообразная, кольцевая	ВП, ВОК	127 узлов (124 Slave, 4 Master), 4 сегмента	До 24 км (ВОК)	12 Мбит/с (100 м), 9,6 кбит/с (1200 м)
PROFIBUS PA	Siemens, 1995	Линейная, звездообразная, кольцевая	ВП, ВОК	127 узлов (124 подчиненных — 4 сегмента, 3 ретранслятора) и 3 главных устройства	1900 м	31,25 кбит/с
BitBus	Intel, 1984	Звезда, кольцо	ЭВП	240 (28 в сегменте)	От 1,2 км до 13,2 км	500, 2400 кбит/с
Control Net	Allen-Bradley, 1996	Линейная, древовидная, звездообразная и их комбинации	КК, ВОК	99 узлов (с ответвителями)	1000 м (КК) 2 узла; 250 м с 48 узлами; 3 км (ВОК), 30 км (ВОК с ретрансляторами)	До 5 Мбит/с
CANopen	CAN, IN Automation, 1993	Магистральная с ответвлениями	ВП + дополнительная ВП для сигнала и напряжения	127 узлов	25–1000 м (зависит от скорости передачи)	125, 250, 500 и 1000 кбит/с

Шина	Разработчик технологии	Топология сети	Физическая линия связи	Максимальное число устройств	Максимальная длина соединения	Скорость обмена
Foundation Fieldbus H1	<i>Foundation Fieldbus</i> , 1995	Звездообразная или общая шина	ВП, ВОК	240 на сегмент, 65000 сегментов	1900 м	31,25 кбит/с
Foundation Fieldbus (HSE)	<i>Foundation Fieldbus</i> , 1997	Звездообразная	ВП, ВОК	IP адресация; число устройств практически неограничено	ВП — 100 м, ВОК — 2 км	100 Мбит/с
WorldFIP	<i>WorldFIP</i> , 1988	Общая шина	ВП, ВОК	256 узлов	До 40 км	31 кбит/с; 1; 2.5; 5 Мбит/с
LonWorks	<i>Echelon Corp.</i> , 1991	Общая шина, кольцо, петля, звездообразная	ВП, ВОК, силовой кабель	32 000 на домен	2 км	78 кбит/с
Ethernet	<i>DEC, Intel, Xerox.</i> Ethernet — 1976; Fast Ethernet — 1995; Gigabit Ethernet — 1997	Общая шина, звездообразная	Тонкий КК, толстый КК, ВП, ВОК,	1024 узла, больше при установке маршрутизаторов	ВП-100 м., тонкий КК — 185 м., толстый КК — 500 м., одномодовый ВОК — 10 км., многомодовый ВОК — 2 км.	10 Мбит/с, 100 Мбит/с, 1000 Мбит/с
Token Ring	<i>IBM</i> , 1985	Кольцевая, звездообразная кольцевая топологии	IBM-кабель, ВП	260 (IBM-кабель), 72 (ВП)	60 км (IBM-кабель), 18 км (ВП)	4–10 Мбит/с
ARCNET	<i>Datapoint Corp.</i> , 1977	Звездообразная, общая шина, распределенная звездообразная	КК, ВП, ВОК	256 узлов	600 м (КК); 120 м (ВП); 3,6 км (ВОК)	2,5 Мбит/с

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ПО ТЕМЕ №4.4.3. ИНТЕГРИРОВАННАЯ СРЕДА РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА MASTER SCADA

### ВОПРОСЫ

#### 1. Основные правила, действия и определения:

- Выбор версии для разработки проектов;
- Запуск Master SCADA в режим разработки;
- Основной интерфейс программы – менеджер проектов;
- Дерево системы;
- Об OPC-технологии и OPS-серверах;
- Дерево Объектов;
- Функциональные блоки;
- Общая структура проектов;

- Выбор порядка разработки системы: от объекта или от системы;
- Базовые документы объектов;
- Запуск режима исполнения.

## 2. Работа с оборудованием:

- Использование OPC-серверов;
- Подключение приборов через Master PLC;
- Master Link.

## ЛИТЕРАТУРА

1. MASTER SCADA. Основы проектирования. Том.2. Москва. 2012.

### 1. Основные правила, действия и определения

#### Выбор компьютера

При выборе компьютера, на котором будет установлена MasterSCADA, отдайте предпочтение компьютеру с большим объемом оперативной памяти, размер 1024 Мб является минимальным. Для комфортной работы требуется 2048Мб или даже больше, если планируется крупномасштабный проект.

Процессор - важная деталь системного блока, но ему предъявляются не столь жесткие требования. Рекомендуется использовать компьютеры с процессорами не хуже, чем Core 2 Duo 2,53 GHz, LGA775 / 3MB-1066MHz или AMD Athlon64 X2 6000+, 3.0GHz, 2x512KB-1000MHz (ADV6000). Хотя также возможна работа и на Pentium-4 641 3,2 GHz, LGA775 / 2MB-800MHz (65nm) или AMD Athlon64 X2 2.4GHz.

Разумеется, MasterSCADA будет работать и при худших параметрах компьютера, но все же прислушайтесь к этим рекомендациям, если не хотите, чтобы ваше терпение подверглось испытанию в самый неподходящий момент.

Перед установкой MasterSCADA убедитесь, что на жестком диске свободны более 400 МБ. Возможно, в дальнейшем потребуется больше места для обеспечения корректной работы проектов и хранения архивов, но пока этого объема хватит, чтобы установить программу и приступить к ее изучению. Выбор диска с большим быстродействием также способствует комфорту вашей работы.

Чтобы создавать большие многофункциональные графические окна, требуется монитор с разрешением не меньше, чем 1280 пикселей на 1024. Однако, это спартанский минимум. Лучше используйте современные широкоформатные мониторы. Например, 1680x1050.

**Важно! Чтобы значительно сократить время разработки проектов разрешение монитора разработчика проекта и конечного пользователя (оператора) должны совпадать.**

#### Выбор операционной системы

MasterSCADA поддерживает работу с операционными системами **Windows XP (SP3), Windows Vista, Windows 7.**

**Важно! Windows Vista не рекомендуется к использованию из-за общего снижения производительности системы.**

При использовании Windows Vista необходимо запускать процесс установки MasterSCADA, а также режимы разработки и исполнения от имени администратора. Также для использования сетевого обмена и доступа к удаленным OPC-серверам на данной ОС потребуется частичное отключение настроек безопасности.

Часто в целях экономии приобретают портативные компьютеры (ноутбуки и нетбуки) с предустановленными версиями **Windows Home Edition**. Специального тестирования с этими модификациями не проводилось, противопоказаний к использованию этих версий нет, но, возможно, могут возникнуть сложности с опросом устройств и сетевым обменом.

**Важно! В 64-разрядных версиях Windows 7 MasterSCADA работает в режиме 32-разрядного приложения.**

MasterSCADA также может работать на серверных версиях операционной системы **Windows Server 2003 (SP1), Windows Server 2008 (R2)**. Это наиболее актуально, когда на компьютере помимо MasterSCADA будет установлена какая-либо программа, требующая именно серверного исполнения **Windows**, например, **СУДБ MS SQL**.

#### **Установка демонстрационной версии**

Перед установкой убедитесь, что на компьютере отсутствуют другие версии MasterSCADA, а также программа для программирования PC-совместимых контроллеров MasterLogic. Если они обнаружатся, их необходимо удалить перед установкой новой версии.

Установка MasterSCADA ничем не отличается от большинства типовых установок программ. Запустите файл **setup.exe**<sup>1</sup> и следуйте указаниям программы установки. Этот процесс может занять несколько минут (зависит от производительности компьютера), он несложен и интуитивно понятен, но, несмотря на это, некоторые моменты требуют дополнительных комментариев.

<sup>1</sup>Если установка осуществляется с фирменного диска, то файл **setup.exe** запускается из меню диска. *Основы проектирования в MasterSCADA. Методическое пособие.*

**Важно! Для версии MasterSCADA 3.3 и выше требуется Microsoft .Net Framework 4.0. Многие пользователи ошибочно полагают, что если на компьютере уже установлена какая-либо версия данного приложения, более ранняя или более поздняя, то этого достаточно для MasterSCADA. Однако это не всегда так.**

Если приложение **Microsoft .NET Framework** не найдется в списке программ компьютера, то инсталлятор MasterSCADA предложит установить его автоматически (Рисунок 1-1).

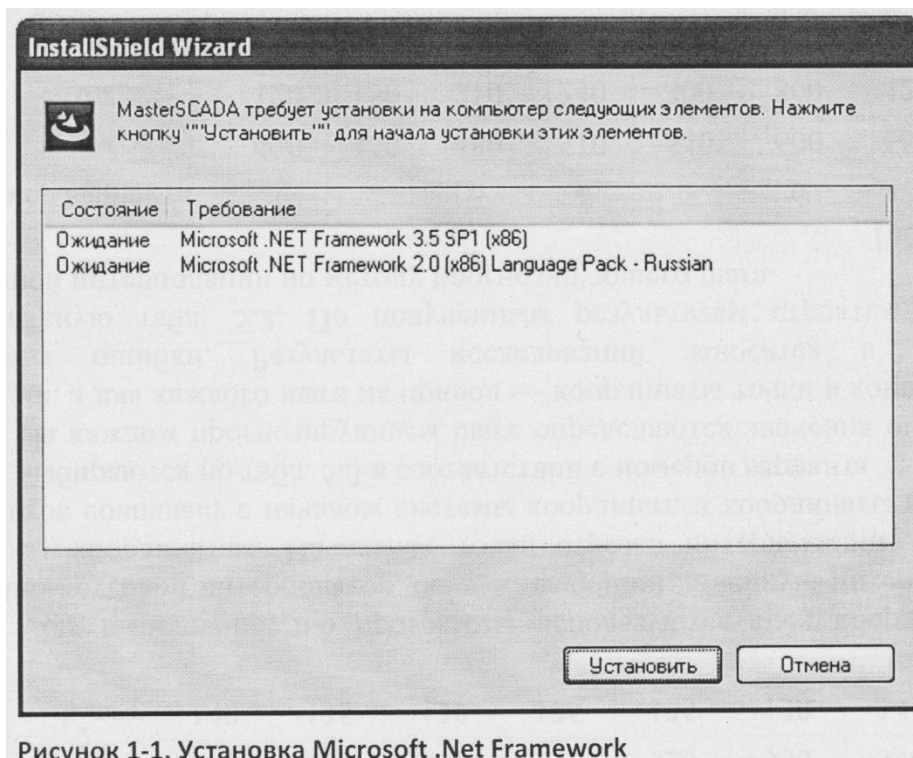


Рисунок 1-1. Установка Microsoft .Net Framework

Данное приложение распространяется бесплатно. Компания **ИНСАТ** не нарушает авторские права и правила распространения **Microsoft .NET Framework**. В этом можно убедиться, ознакомившись с лицензионным соглашением, представленном в окне инсталлятора (Рисунок 1-2)

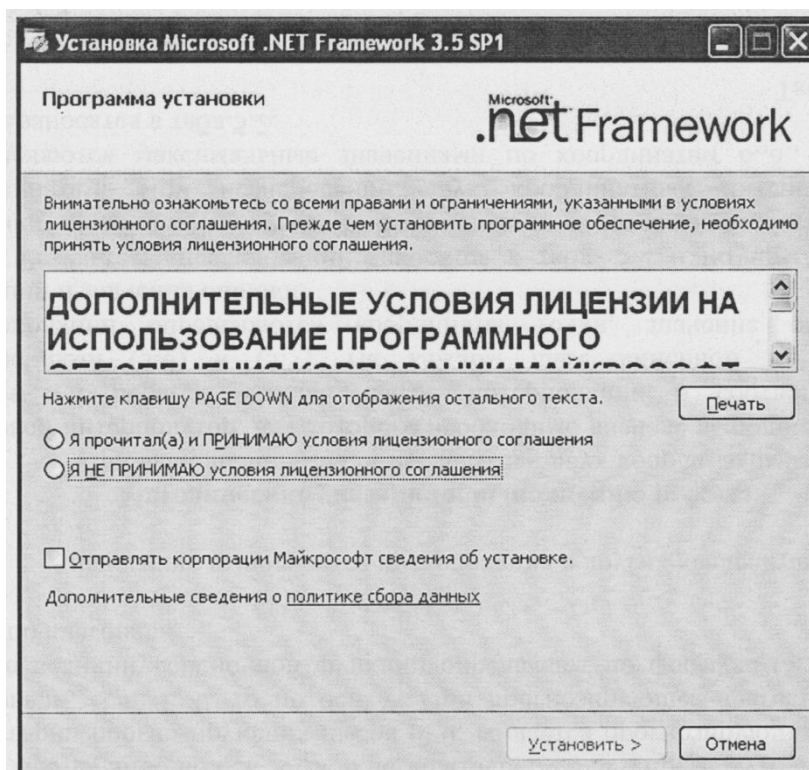


Рисунок 1-2. Лицензионное соглашение на Framework

**Важно! При деинсталляции MasterSCADA приложение Microsoft .NET Framework не удаляется.**

Перед тем как нажимать кнопку *Далее* в диалоговом окне, показанном на Рисунок 1-3,

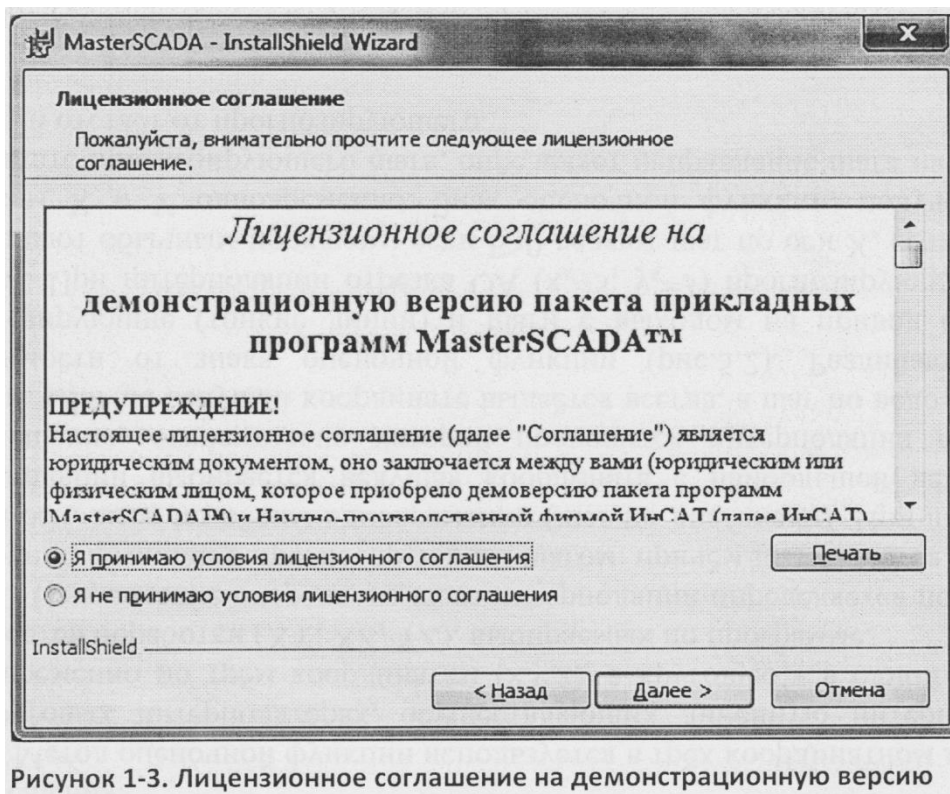


Рисунок 1-3. Лицензионное соглашение на демонстрационную версию

ознакомьтесь с текстом лицензионного соглашения на демонстрационную версию MasterSCADA. В нем содержится много полезной информации: правила использования демоверсии MasterSCADA, особенности взаимодействия со службой технической поддержки компании *ИНСАТИ* др.

Обратите особое внимание на Рисунок 1-4. Он определяет место, в котором по умолчанию будут сохраняться ваши проекты и библиотеки. Окно появляется только при первой установке MasterSCADA. В дальнейшем изменить место расположения рабочего каталога **MasterSCADA Projects** можно будет только из интерфейса MasterSCADA.

**Важно! Папка проектов не удаляется при удалении MasterSCADA с компьютера. Она не изменяется при следующих установках MasterSCADA. Благодаря этому вы можете спокойно переустанавливать и обновлять MasterSCADA, не беспокоясь за сохранность ваших проектов и библиотек.**

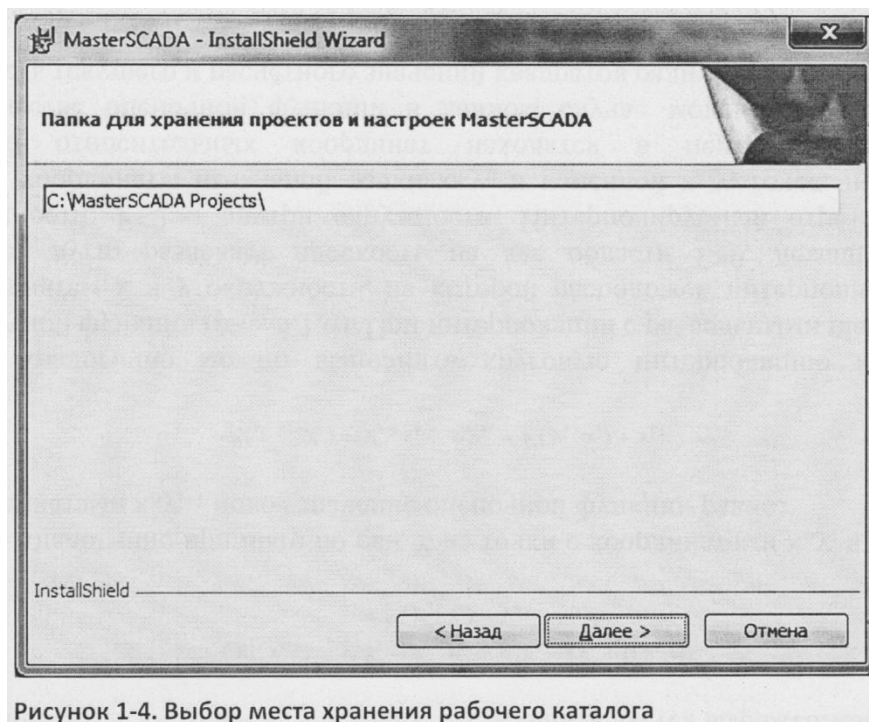


Рисунок 1-4. Выбор места хранения рабочего каталога

Задать место установки пакета программ MasterSCADA и определить, какие компоненты необходимо установить на компьютер можно в окне, показанном на *Рисунок 1-5*. Основным выбором сводится к тому, ставить или нет демонстрационные программы и дополнительные библиотеки. Если вы только начинаете работать с MasterSCADA, не пренебрегайте ими, если позволяет свободное место на диске. Оставьте лучше поле выбора компонентов программы без изменений.

В процессе установки программы папка *Insat<sup>2</sup>/MasterSCADA* по умолчанию будет создана в том каталоге, куда устанавливаются все приложения на компьютере. Вы можете изменить место установки, нажав на кнопку *Изменить* в диалоговом окне.

**Важно! Желательно не изменять имена указанных директорий. Служба технической поддержки может запросить какую-либо информацию о файлах, находящихся в папке установки MasterSCADA, стандартные названия значительно упростят поиск нужной информации.**

<sup>1</sup>. В эту директорию по умолчанию устанавливаются все программные продукты компании *ИНСАТ*, например, OPC-серверы.

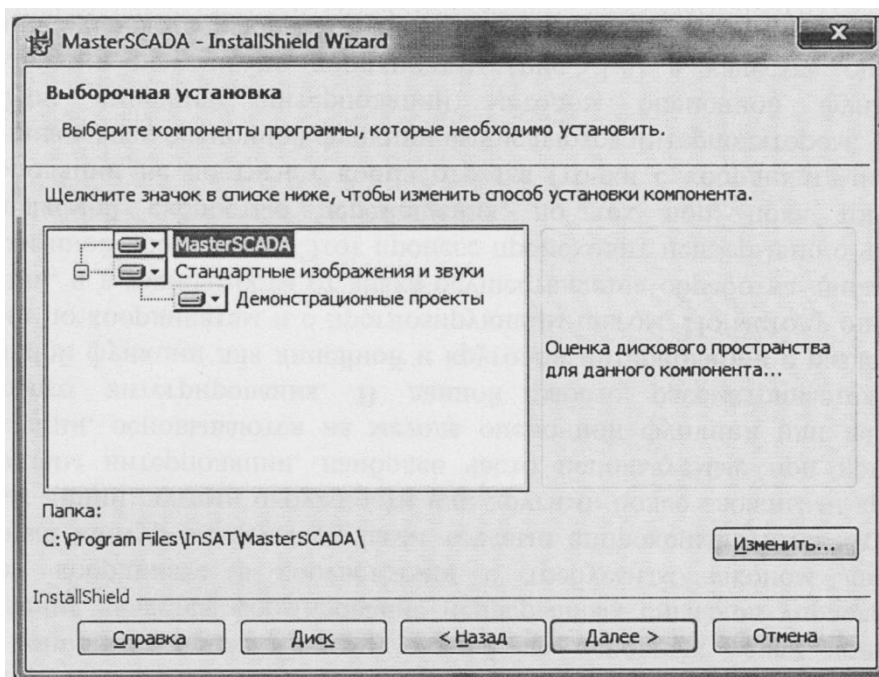


Рисунок 1-5. Выбор места установки MasterSCADA

Завершает процесс установки MasterSCADA диалоговое окно, показанное на Рисунке 1-6. После нажатия на кнопку *Готово* можно приступать к изучению MasterSCADA.

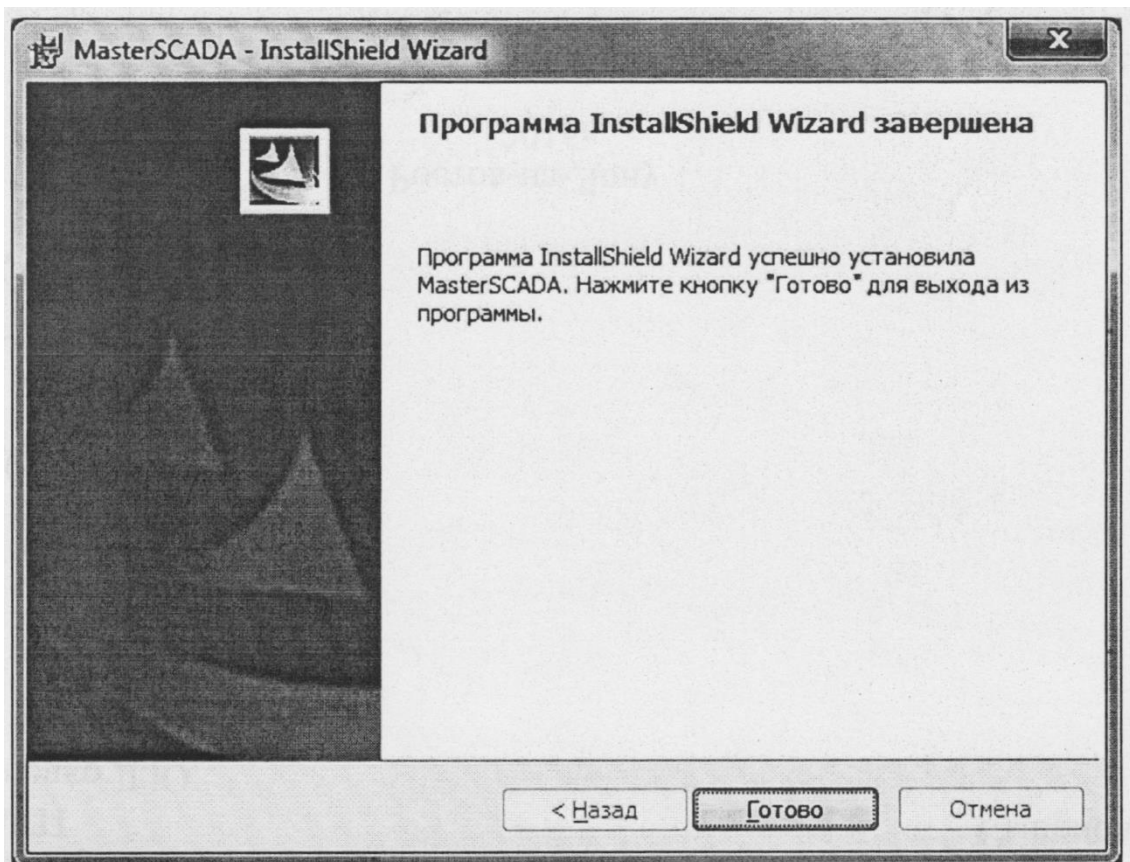


Рисунок 1-6. Завершение установки

Процесс установки коммерческой версии внешне не отличается от установки демонстрационной. Единственное визуальное отличие - текст лицензионного соглашения будет иным.

При установке лицензионной версии MasterSCADA автоматически будет установлен драйвер для ключа защиты программного обеспечения.

**Важно! Ключ защиты должен отсутствовать в USB-порту компьютера в момент установки MasterSCADA.**

### Удаление MasterSCADA

Удаление MasterSCADA происходит через **Панель Управления Windows**. Пункт **Установка/Удаление программ**.

Деинсталляция MasterSCADA не затрагивает программы драйвера ключа защиты и **Microsoft .NET Framework**. Они останутся на компьютере.

**Важно! Папка для хранения библиотек и проектов (... \MasterSCADA Projects) не удаляется при удалении MasterSCADA.**

## 2. Основные правила, действия и определения

Прежде чем приступить к изучению функций и возможностей MasterSCADA нам (разработчикам этой программы) с вами (ее будущим пользователем) необходимо научиться понимать друг друга. Очень важно научиться говорить на одном языке, в одни и те же термины вкладывать одинаковые понятия.

Неважно, какой проект вы хотите создать, используя MasterSCADA, будь то простой лабораторный стенд или сложная АСУТП на опасном производстве, в любом случае, все разработчики выполняют одни и те же действия, придерживаясь определенных правил: открывают проекты, редактируют, добавляют переменные, создают графические окна и многое-многое другое. Со временем часто повторяющиеся действия доходят до автоматизма и очень важно, чтобы с самого начала сформировались правильные привычки.

Вы узнаете о понятиях, принятых в MasterSCADA, и о тех действиях, которые выполняют все разработчики неоднократно в течение каждого рабочего дня.

### Выбор версии для разработки проектов

Проект автоматизации с помощью SCADA-системы сначала разрабатывается, а уже потом используется в реальных «боевых» условиях. Во многих SCADA-системах для этого служат отдельные программы - в одной разработчик создает проект (обычно, она так и называется, среда разработки), в другой - запускает проект на исполнение (соответственно и название - исполнительная система). В MasterSCADA для этих целей используется единая программа, для которой это просто два отдельных режима работы. В любой версии MasterSCADA (демонстрационной, коммерческой, клиентах с функциями управления и без них, за исключением интернет-клиента MasterSCADA) можно редактировать структуру существующих проектов и создавать новые. В этом случае у пользователя возникают вопросы, какая версия дает полное представление о возможностях пакета, какую версию выбрать для создания нового проекта?

Демонстрационная версия MasterSCADA - это полноценная среда разработки. В ней можно разработать любой проект любой сложности, используя все возможные модули и опции, за исклю-

чением узко специфических, поставляемых для специальных применений и отдельных отраслей. Такие редко используемые расширения не включены в демонстрационную версию просто, чтобы не загромождать ее пользовательский интерфейс. Ограничение демонстрационной версии заключается только в том, что проект в режиме исполнения проработает один час, по истечении которого выйдут сообщение о том, что время работы в режиме исполнения закончилось. Это вовсе не означает, что вы не сможете больше использовать данный экземпляр MasterSCADA, это говорит только о том, что необходимо вновь запустить проект на исполнение и продолжить его отладку.

Время создания проекта может сильно варьироваться. На это влияют многие факторы: сложность проекта, квалификация разработчика, а зачастую и финансирование. В результате получается, что за время создания проекта MasterSCADA может измениться. Развитие MasterSCADA происходит непрерывно, но пользователь видит отдельные шажки-обновления, шаги-релизы, прыжки-версии. Эти обновления отражаются в нумерации продукта. Например, номер 3. 4. SP2 означает обновление 2 релиза 4 версии 3. Обновления, так называемые «исправленные» (Service-Pack) версии, выходят с периодичностью примерно раз в полтора месяца. В каждом таком обновлении исправляются ошибки, а также учитываются некоторые пожелания пользователей, как правило, не требующие больших изменений в программе, добавляются небольшие усовершенствования функций и расширения библиотек. В релиз, выпускаемый 1-2 раза в год, могут включаться уже достаточно серьезные дополнения, а новая версия, выходящая раз в несколько лет (примерно - раз в 3 года), всегда означает очень серьезное расширение возможностей продукта, вплоть до смены технологической платформы отдельных модулей или даже ядра.

Планируя работу над проектом, важно понимать, что переход с одной версии на другую может потребовать от вас дополнительных усилий по проверке того, как то, что разработано под старые возможности, будет сочетаться с новыми. Мы делаем все от нас зависящее, чтобы любые проекты конвертировались в новые версии, однако в таких ситуациях, как полная замена одного модуля на другой, может оказаться, что вместо простой прежней функциональности реализована новая более сложная, в которой старых настроек недостаточно для формирования необходимого вам вида или поведения приложения. Пожалуйста, будьте внимательны в подобных ситуациях.

Такое подробное изложение особенностей развития MasterSCADA неслучайно. Важно, чтобы вы понимали, когда имеет смысл обновлять версию, а когда нет. Обновление программы в соответствии с графиком выхода релизов и обновлений пойдет только на пользу проекту, находящемуся в ранних стадиях разработки. В то же время переход на новую версию на последних перед внедрением этапах может потребовать определенных трудозатрат тогда, когда на использование вновь открывшихся существенных возможностей уже не хватает времени. Не забудьте также учесть, что политика компании **ИНСАТ**, как производителя MasterSCADA, - полноценная поддержка старых версий в течение года после появления новой. По окончании этого срока мы не откажем вам в советах, но обновлений уже ждать не приходится.

Если же до внедрения более года, а до вас уже дошли слухи (следите за нашими новостями) о планируемом выпуске новой версии (именно версии, а не релиза), то с приобретением можно и повременить. Это не помешает вам начать разработку, потому что пользователи демонстрацион-

ных версий получают почти такую же консультационную поддержку, как и пользователи коммерческих версий. Мало того, они могут вносить свои пожелания о развитии функциональности MasterSCADA наравне с пользователями коммерческих версий. С высокой долей вероятности эти пожелания будут удовлетворены в очередных релизах или даже обновлении. Можете смело создавать проект в демонстрационной версии. А когда убедитесь, что пакет подходит для решения вашей задачи (в этом мы не сомневаемся), приобретайте коммерческую версию, в которой уже будут удовлетворены ваши пожелания. Основное коммерческое преимущество такого подхода не отложенное расходование средств, как многие подумают, читая эти строки, а точный, без избыточности, выбор конфигурации MasterSCADA. Такой подход поможет избежать часто встречающиеся ошибки с выбором типа коммерческой Версии MasterSCADA и ее опций.

**Важно! MasterSCADA может сама определить по разработанному проекту, какой комплект вам нужно будет приобрести. К этому вопросу мы обязательно еще вернемся, но уже после знакомства с MasterSCADA.**

Демонстрационная версия MasterSCADA - это полноценный инструмент разработчика проектов, в дальнейшем все описания в этом тексте будут ссылаться именно на нее.

#### **Запуск MasterSCADA в режим разработки**

Запуск MasterSCADA в режим разработки (далее этот режим мы будем называть английской аббревиатурой DT - от термина Design Time, что в переводе и обозначает режим разработки) производится так же, как и для любой другой Windows-программы: через меню **Пуск**, с помощью ярлыка на рабочем столе или в панели быстрого запуска. Обратите внимание на то, что на рабочем столе или в панели быстрого запуска ярлык надо предварительно самостоятельно создать, перетаскив туда правой клавишей мыши значок приложения MasterSCADA из меню **Пуск**.

Итак, запускаем MasterSCADA. Нажимаем главную кнопку Windows **Пуск** и выбираем **Все программы/ MasterSCADA/ MasterSCADA**.

В открывшемся диалоговом окне (*Рисунок 2-1*) необходимо указать, с каким проектом вы будете работать: новым, учебным или иным, ранее созданным.

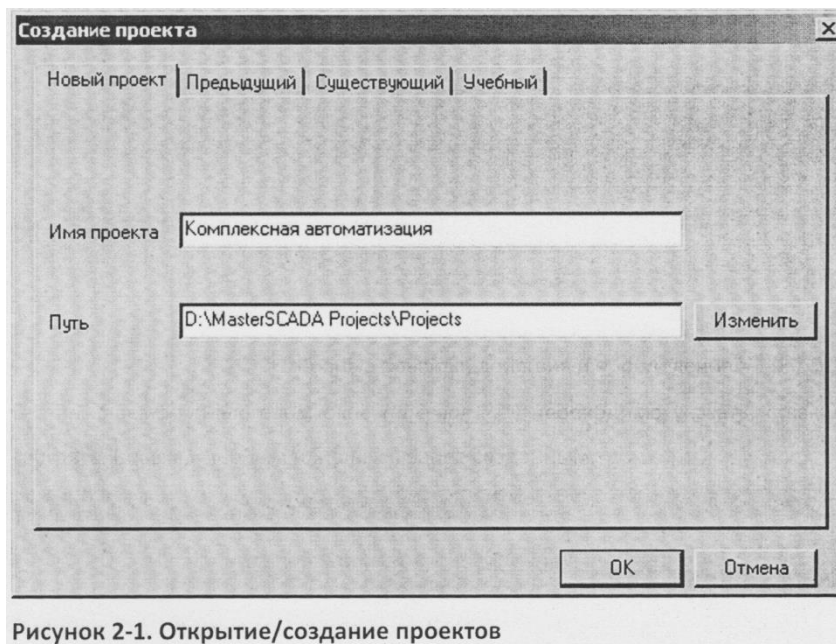


Рисунок 2-1. Открытие/создание проектов

Если вы создаете новый проект, то после создания и подтверждения его имени появится диалоговое окно, показанное на Рисунок 2-2.

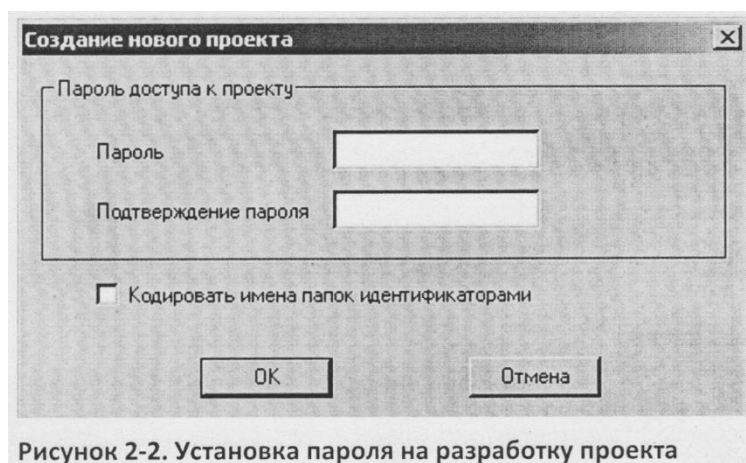


Рисунок 2-2. Установка пароля на разработку проекта

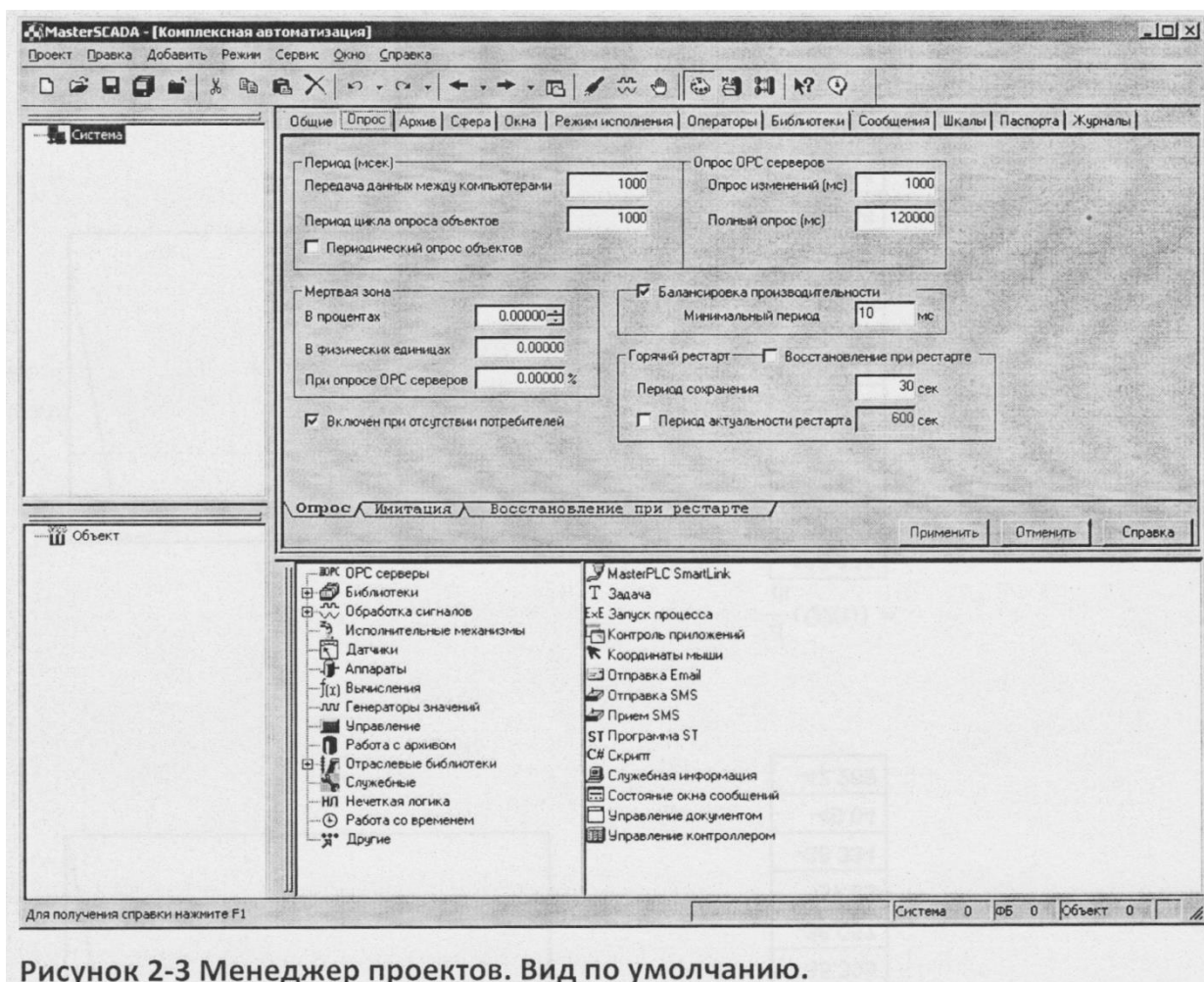
Это окно позволяет с помощью пароля запретить открытие проекта для редактирования всем, кто этого пароля не знает. Если вы оставите поля пустыми, то любой пользователь компьютера сможет открыть данный проект в режиме редактирования. При его повторном открытии окно задания пароля больше появляться не будет, поэтому если вы захотите задать пароль на дальнейших этапах разработки, например, после ее завершения, то для этого можно воспользоваться пунктом главного меню программы **Проект/ Сохранить...** Установка пароля на разработку проекта поможет защитить вашу работу от неквалифицированных действий обслуживающего персонала, операторов, а также от происков конкурентов.

**Важно! Если вы забудете комбинацию символов, вводимую в эти поля, то для восстановления данных придется переслать проект целиком в службу технической поддержки компании «ИнСАТ». Эта услуга оказывается только пользователям, у которых действует гарантийная или платная постгарантийная техническая поддержка.**

Итак, MasterSCADA готова к работе. После выполнения несложных действий, о которых мы только что рассказали, перед пользователем открывается основное поле его деятельности - менеджер проекта (*Рисунок 2-3*). В отличие от многих модульных программ MasterSCADA так устроена, что для выполнения самых разных действий и редактирования самых разных документов вам никуда не надо будет переключаться. Менеджер проекта работает по принципу единого окна в информационное пространство MasterSCADA.

Как и большинство Windows-приложений MasterSCADA имеет *главное меню программы*, а также *панели инструментов*. Они располагаются в верхней части экрана. Наверное, каждому пользователю знакомы эти понятия, и порядок работы с иконками и пунктами меню описывать не нужно. Те детали, которые отличают MasterSCADA от других программ, мы еще обсудим в дальнейшем.

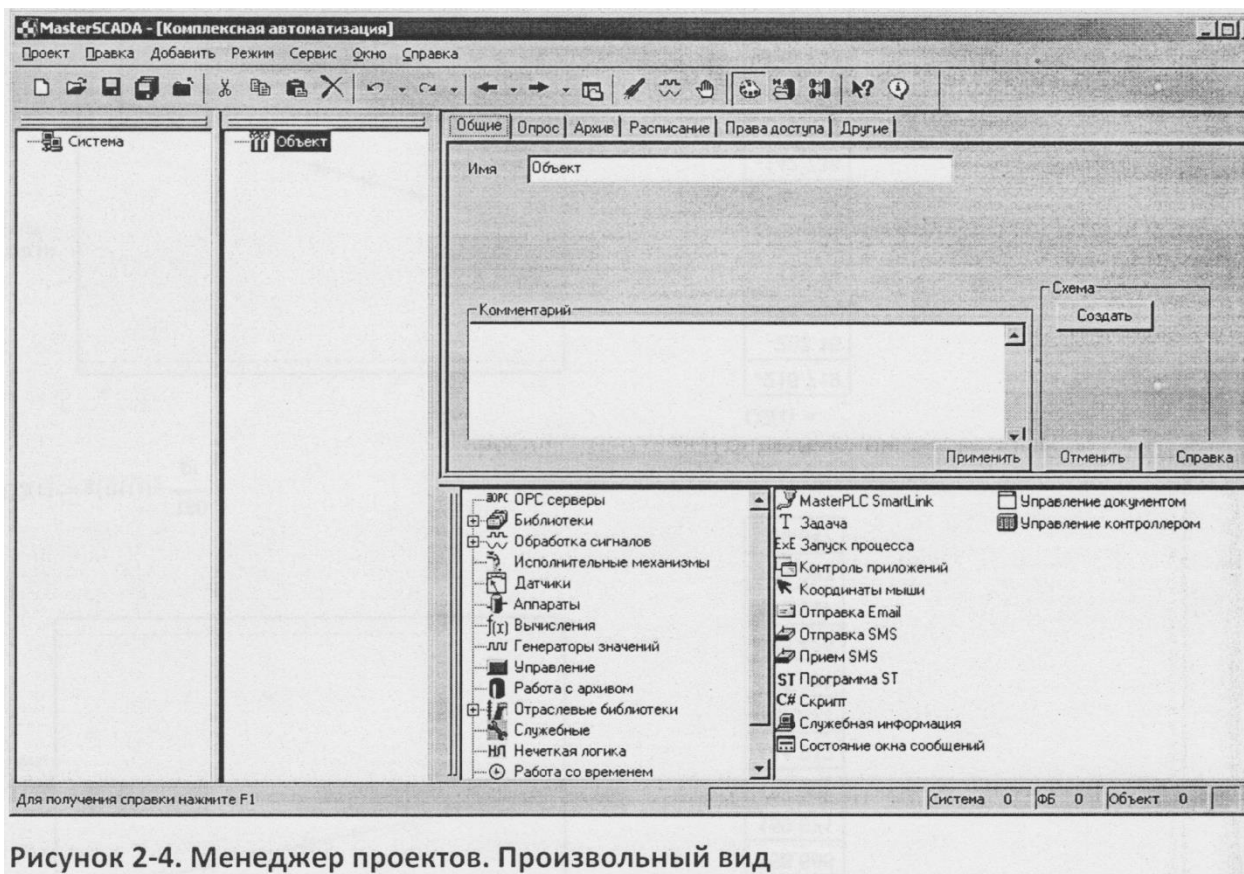
Рассматривая устройство окна программы, мы будем говорить о том расположении его частей, которое предлагается программой «по умолчанию». Но пользователь всегда может изменить их «под себя», исходя из формата своего монитора или собственных представлений об удобстве.



**Рисунок 2-3 Менеджер проектов. Вид по умолчанию.**

В левой части экрана находится главный навигатор по структуре проекта. Он состоит из двух частей - *дерева Системы* и *дерева Объектов*. Местоположение каждого из деревьев можно изменить в любой момент. Для этого нажмите ЛК<sup>3</sup> на верхней кромке рамки дерева (поле для нажатия обозначено двойной выпуклой линией) и, удерживая ее нажатой, перетащите окно.

В последнее время стали популярны широкоформатные мониторы, и все чаще пользователи выбирают способ размещения деревьев, показанный на Рисунок 2-4.



**Рисунок 2-4. Менеджер проектов. Произвольный вид**

Справа от деревьев находятся СТРАНИЦЫ СВОЙСТВ, содержимое которых относится к выбранному вами элементу дерева проекта. Состав СТРАНИЦ СВОЙСТВ будет изменяться в зависимости от того, какой элемент выделен.

«Нажмите правую кнопку мышки» - такую фразу неоднократно слышат пользователи, обратившиеся в службу технической поддержки, по различным вопросам. Действительно, это действие любой разработчик выполняет неоднократно в течение рабочего дня. Нажав правую кнопку мыши, вы открываете КОНТЕКСТНОЕ МЕНЮ ЭЛЕМЕНТОВ. Элементы MasterSCADA раскроют свои тайны быстрее, если знакомиться с ними по следующей схеме: добавьте элемент в дерево, просмотрите его СТРАНИЦЫ СВОЙСТВ и КОНТЕКСТНОЕ МЕНЮ. Как правило, этого бывает достаточно, чтобы понять назначение элемента и область его применения.

Но если это все же не помогло, то вызовите справку (функциональная клавиша *F1* на клавиатуре, либо пункт в КОНТЕКСТНОМ МЕНЮ, либо кнопка ПАНЕЛИ ИНСТРУМЕНТОВ - этой стрелкой можно щелкнуть в непонятный элемент и получить разъяснение, см. Рисунок 2-5).

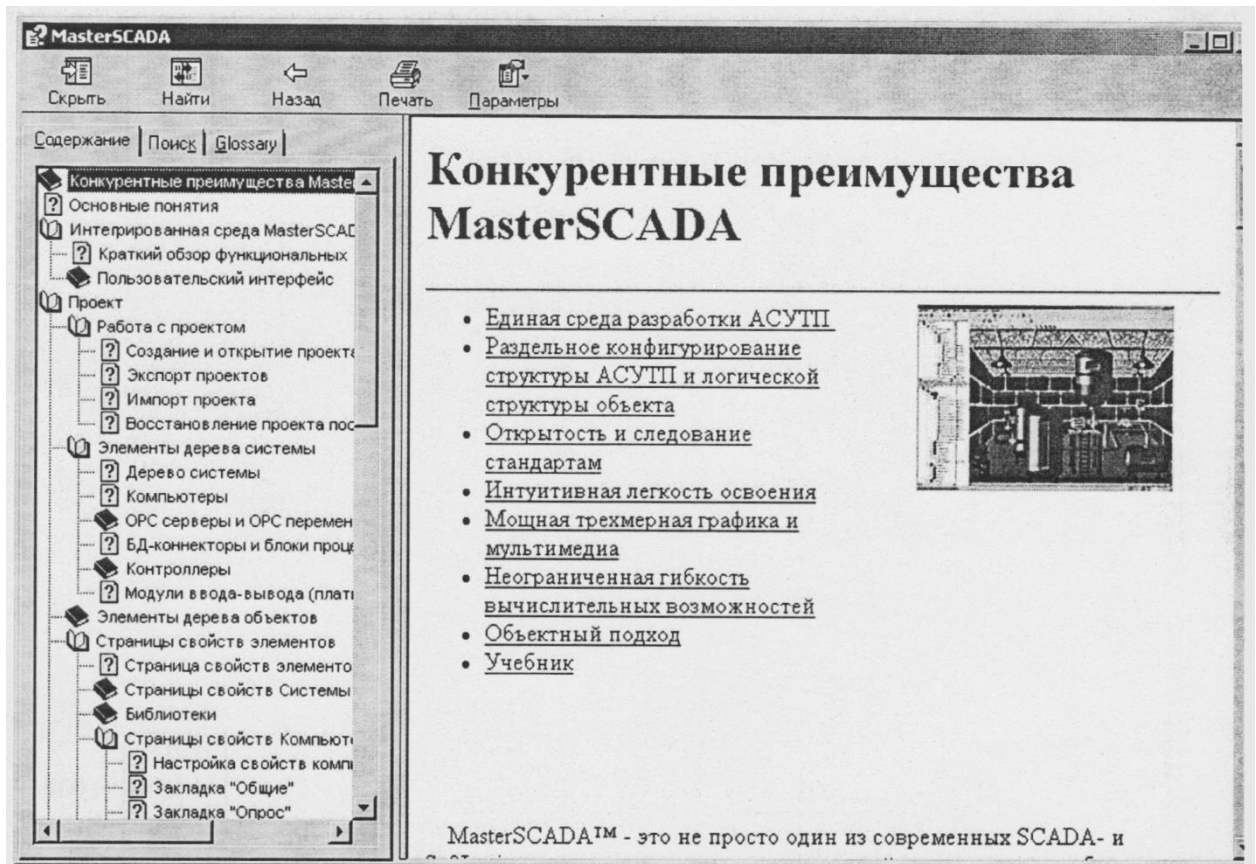


Рисунок 2-5. Окно справочной системы.

Наиболее часто контекстное меню элементов используют для формирования деревьев проекта. Пункты **Добавить** или **Вставить** подскажут, какие элементы могут быть использованы в том или ином месте. Например, если вы выделите элемент «**Система**» и нажмете правую кнопку мыши, то получите возможность добавить в проект Компьютер.

Помимо контекстного меню для формирования деревьев используют также палитру функциональных блоков MasterSCADA, которая находится под страницами свойств (Рисунок 2.6).

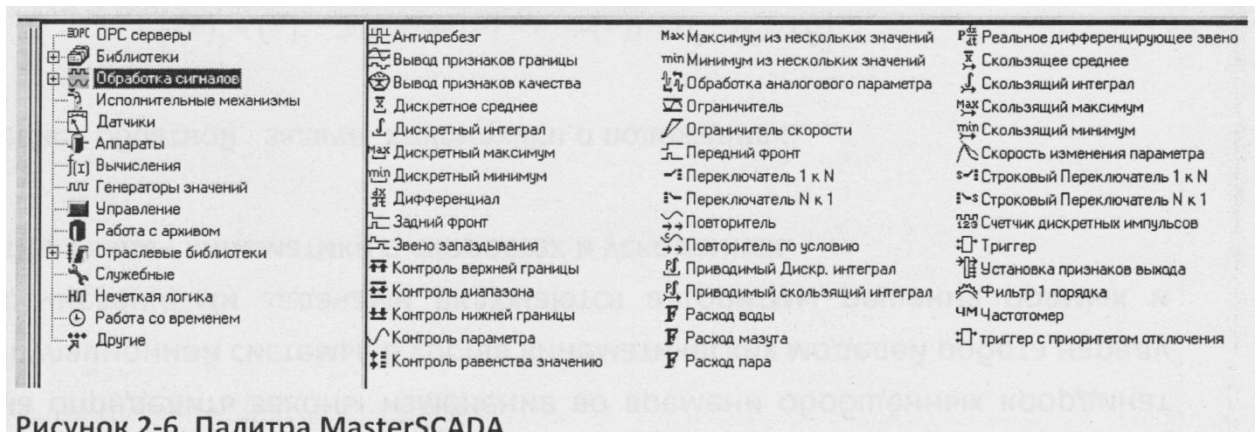



Рисунок 2-6. Палитра MasterSCADA

В ней хранятся различные ресурсы для формирования дерева проекта, как стандартные, так и создаваемые самими пользователями. Для того чтобы добавить элемент из палитры в дерево достаточно выполнить следующие действия: щелкнуть по элементу палитры и отпустить кнопку, курсор приобретет вид стрелки с иконкой выбранного элемента (  ), второй раз нужно щелкнуть на тот элемент дерева, в который должен быть вставлен выбранный элемент. Если добавить элемент в то или иное место нельзя, то система сообщит об этом диалоговым окном (*Рисунок 2-7*)

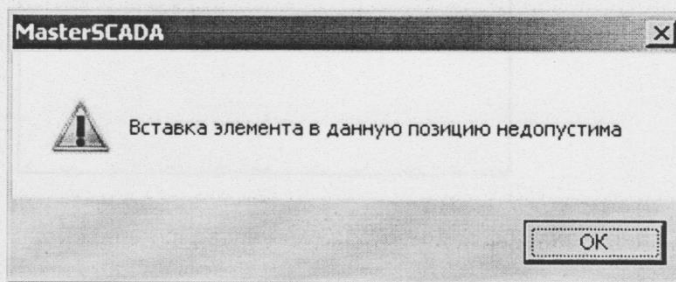


Рисунок 2-7. Сообщение о некорректной работе с палитрой MasterSCADA

Статистическую информацию о проекте можно получить в строке статуса, она традиционно располагается в самой нижней части экрана.

**Важно! Информация, находящаяся в данном поле, не указывает о том, какую коммерческую версию MasterSCADA необходимо использовать для работы проекта.**






### Дерево Системы

Изучая дерево Системы готового проекта можно определить, какую архитектуру реализовал разработчик, какое количество компьютеров будут взаимодействовать в системе, какой способ был выбран для подключения внешних устройств, модулей ввода-вывода, является ли система вертикально-интегрированной (то есть контроллеры тоже программируются в этом же проекте), какое количество внешних сигналов MasterSCADA будет обрабатывать. По сути, дерево Системы - это своеобразный вид структурной схемы автоматизации.

Построение дерева Системы начинается с элемента Компьютер. Физический компьютер даже в самом простом проекте выполняет несколько функций, например:

- к нему подключается оборудование нижнего уровня
- он является рабочим местом оператора, технолога и т. п.
- он передает информацию в приложения других компьютеров

С уверенностью можно сказать, что элемент Компьютер - это точка пересечения реальных элементов создаваемой системы автоматизации и виртуальных. Без этого элемента не может существовать ни один проект MasterSCADA.

Компьютер может содержать дочерние элементы (*Рисунок 2-8*), представляющие собой понятия внешнего мира, с которым взаимодействует MasterSCADA, установленная на данном реальном компьютере: Контроллер (  ), Модуль ввода/вывода (  ), ОПС-сервер (  ), MasterLink (  ), БД-коннектор (  ). Рассмотрим эти понятия подробнее.

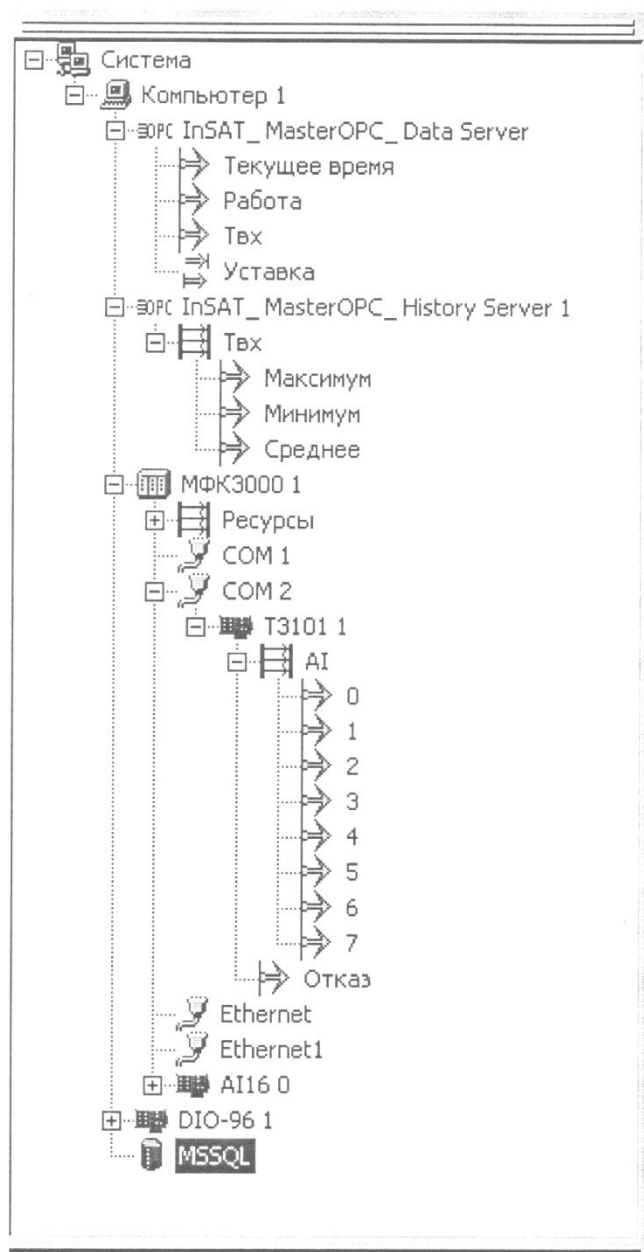


Рисунок 2-8. Дерево системы

Обращаться к пункту контекстного меню Компьютера **Вставить/Контроллер** следует, если вы планируете средствами самой MasterSCADA программировать контроллер с открытой архитектурой, совместимый с исполнительной системой для контроллеров **MasterPLC**, входящий в комплекс программ MasterSCADA. В дальнейшем, мы будем их обобщенно называть **MasterPLC-контроллерами**. Список таких контроллеров можно найти на сайте [MasterSCADA.ru](http://MasterSCADA.ru), либо уточнить в службе технической поддержки **ИнСАТа**.

**Важно! Отсутствие интересующего вас типа контроллера в списке доступных для вставки в демонстрационной или, тем более, коммерческой версии MasterSCADA, еще не означает отсутствие его поддержки. Возможно, она поставляется дополнительно.**

При использовании **MasterPLC-контроллеров** они реализуют заданную в том же проекте логику контроля и управления, а MasterSCADA в режиме исполнения будет получать по различным

каналам связи текущие и архивные данные с нижнего уровня напрямую (с помощью встроенных драйверов по фирменным протоколам), без участия других программных средств.

Для вставляемых в компьютер плат ввода-вывода в MasterSCADA предусмотрен элемент, *модуль ввода/вывода*. Список поддерживаемых плат определяется потребностями пользователей. Интерфейс для добавления новых плат открыт для самостоятельной разработки их драйверов. Однако, в MasterSCADA такой способ подключения оборудования считается второстепенным, поэтому широкого набора драйверов не предусмотрено, а в качестве примера в демонстрационной версии представлен модуль дискретного ввода-вывода **DIO-96**.

Если контроллер запрограммирован не средствами MasterSCADA (а, например, с помощью фирменного ПО производителя) или в рамках другого проекта MasterSCADA, то чтобы обеспечить его работу с MasterSCADA, потребуется OPC-сервер.

Элемент *OPC PA сервер* используется для работы с внешними физическими устройствами, модулями ввода-вывода, контроллерами, а также с различными программами по стандарту OPC DA. Этот стандарт описывает получение текущих данных. Фактически, OPC является описанием стандартного программного интерфейса для драйверов различных протоколов. Эти драйверы могут быть разработаны независимыми производителями, но, благодаря стандартизации совместимы с большинством современных SCADA-пакетов, включая, разумеется, и MasterSCADA, которая поддерживает OPC в полном объеме.

Если из прибора нужно получить архивные данные, то необходимо остановить свой выбор на OPC-сервере, который поддерживает стандарт OPC HDA.

**Важно! Передача архивных данных через OPC DA сервер потребует большое число переменных и очень трудоемкую обработку (квалификация разработчика - программист) полученных данных в проекте.**

При выборе архивного OPC-сервера в дерево системы добавляется элемент *OPC HDA сервер*. Как правило, этот элемент используется для решения задачи получения достоверных (в том числе с точки зрения точного указания метки времени события, или измерения значений) данных в системах коммерческого и технического учета.

**Важно! Некоторые OPC-серверы одновременно поддерживают стандарты DA и HDA, но в проект MasterSCADA они вставляются, как два отдельных элемента.**

Элемент *MasterLink* фактически является встроенным драйверным интерфейсом MasterSCADA, для которого реализованы драйверы, как для передачи мгновенных значений, так и архивов по различным каналам связи. Список поддерживаемых драйверов включает широко распространенные протоколы **Modbus, Dcon**, собственный протокол MasterSCADA для связи с **MasterPLC-контроллерами**, принадлежащим другим проектам, а также ряд протоколов распространённых счетчиков коммерческого учета ресурсов.

**Важно! Драйверный интерфейс MasterLink открыт, и вы можете написать собственные драйверы.**

Несмотря на то, что мы предоставляем возможность написания собственных драйверов для *MasterLink*, мы все же считаем, что в большинстве случаев правильнее использовать OPC- серверы, так как это более универсальный с системной точки зрения способ создания систем автоматизации.



**Важно! Быстродействие при обмене данными через OPC-серверы и MasterLink практически не отличается, так как OPC также является стандартным встроенным драйверным интерфейсом MasterSCADA.**


Элемент *БД-коннектор* служит для организации работы с такими базами данных как *MSSQL, Oracle, Sybase, Interbase/Firebird, MySQL, DB2* и др. В настоящий момент, используя элемент *БД-коннектор* можно реализовать следующие задачи:

- хранение архивов MasterSCADA во внешней базе данных<sup>4</sup>
- экспорт данных
- чтение и запись в базу данных значений переменных, используя хранимые процедуры
- получение данных для формирования отчетов с помощью SQL-запросов

Стоящая перед вами задача определит, какие настройки необходимо выполнить на *страницах свойств* и в *контекстном меню контроллеров, OPC-серверов* и других элементов. В результате этих настроек в *дереве Системы* появятся переменные.

Обратите внимание на маркировку переменных в *дереве Системы*. В зависимости от иконки переменной в дереве можно понять, является ли она входом или выходом.

Обозначение  в *дереве Системы* говорит разработчику о том, что данная величина является выходным параметром для внешнего источника сигналов (устройства или программы), а для MasterSCADA такая переменная будет считаться входом. Обозначение  сигнализирует об обратном - для внешнего устройства эта переменная будет входом, а для MasterSCADA выходом.

Бывают переменные, которые работают и на чтение и на запись. Такие переменные обозначены  .

Вносить изменения в *дереве Системы* можно на любом этапе разработки проекта.

### Об OPC-технологии и OPC-серверах

Понятия OPC-сервер, OPC-технология, стандарт OPC давно вошли в лексикон инженеров по автоматизации и хорошо им знакомы. OPC-сервер в его широком понимании - это Windows- приложение (иногда, служба), выполняющая функции драйвера для обмена информацией с внешними источниками или приемниками данных (контроллерами, модулями ввода-вывода сигналов, специализированными программами и др.) по какому-либо протоколу. Для каждого протокола - свой OPC-сервер. Благодаря тому, что OPC-серверы имеют одинаковый, определенный стандартом OPC, программный интерфейс (точнее, набор интерфейсов), с ними могут работать любые программные клиенты (например, SCADA-пакеты, также поддерживающие этот интерфейс). К сожалению, некоторые из серверов поддерживают не совсем полный комплект интерфейсов, заданных стандартом, что приводит к необходимости дополнительных настроек MasterSCADA для исключения из работы тех интерфейсов, которые не поддерживаются конкретным сервером.

<sup>1</sup> В настоящий момент эта возможность реализована для MSSQL, Oracle, Firebird.

Производители SCADA-пакетов, в которых имеются встроенные драйверные системы, иногда утверждают, что при опросе устройств через OPC-сервер появляется дополнительная задержка по времени, из-за того, что в работу включается лишнее приложение. По их мнению, SCADA-пакеты, которые работают с нижним уровнем через встроенные драйверы, получают данные быстрее. В их случае - это действительно так, поскольку для работы с OPC-серверами они вынуждены производить преобразование OPC-интерфейсов в интерфейс внутренней драйверной системы и конвертировать пришедшие данные во внутренний формат. Для MasterSCADA это не так, поскольку технология OPC реализована внутри самой MasterSCADA. MasterSCADA не переводит данные из стандарта OPC в собственный, поэтому и дополнительной задержки по времени практически не возникает.

**Важно! Использование OPC-серверов для опроса внешних источников данных совместно с MasterSCADA не приводит к снижению быстродействия системы.**

Будем различать два понятия: OPC-сервер, как отдельное приложение, и *OPC-сервер*, как элемент проекта MasterSCADA. Для того чтобы начать работать с данным элементом в *дереве Системы*, необходимо установить приложение на компьютер и настроить его<sup>5</sup>. При обмене данными через OPC-сервер, MasterSCADA воспроизводит данные в том виде, с теми отметками времени и с теми признаками достоверности, которые были получены из OPC-сервера.

**Важно! Если по каким-то причинам данные не приходят, то начинать искать причину неудач нужно именно с программы OPC-сервера.**

В предыдущем разделе мы говорили, что разработчик может добавлять в проект, в *Компьютер, OPC PA* или *OPC HDA серверы*. Но внимательный читатель заметит, что при первом открытии MasterSCADA пунктов **Добавить OPC-сервер** и **Вставить HDA OPC-сервер** нет. Чтобы пользователь получил такую возможность, необходимо выполнить пункт *контекстного меню Компьютера Поиск OPC DA серверов* или *Поиск OPC HDA серверов*, либо пункт *главного меню Сервис/Органайзер/OPC DA (HDA) серверов*.

<sup>1</sup> OPC-сервера разных производителей могут настраиваться по-разному. Перед использованием лучше ознакомиться с сопроводительной документацией на сервер.

**Важно! Для использования OPC-серверов, расположенных на других компьютерах сети, необходимо на этих компьютерах запустить утилиту OPC Enum и настроить протокол Microsoft DCOM. Подробнее это описано в сопроводительной документации на MasterSCADA.**

Еще раз напоминаем, что в MasterSCADA разделены элементы *OPC PA* и *OPC HDA серверов*. Даже, если вы установили на компьютер одно приложение, в котором реализованы оба эти стандарта, то в MasterSCADA необходимо добавлять два отдельных элемента.

### **Дерево Объектов**

*Дерево Объектов* расскажет о технологии. В нем, как в зеркале отражается реальный технологический объект. От мастерства разработчика зависит, будет ли это зеркало прямым или искажающим действительность, потому что в нашем субъективном мире оно показывает объект глаза-

ми разработчика проекта. Один разработчик видит объект через призму его организационной иерархии, другой опирается на последовательность технологических переделов, а третий (он, как правило, заблуждается - этот подход хуже всех) раскладывает все по формальному признаку однотипности приборов КИПиА (насосы к насосам, датчики давления к датчикам давления).

Объект в MasterSCADA — это основная единица разрабатываемой системы, соответствующая (мы в этом примере опираемся на первый, наиболее наглядный подход) реальному технологическому объекту (цеху, участку, аппарату, насосу, задвижке, датчику и т. п.), управляемому разрабатываемой с помощью MasterSCADA системой. С другой стороны, это и традиционный с точки зрения программирования объект, обладающий стандартными для программных объектов качествами.

Объект может внутри себя содержать другие объекты, а также переменные и функциональные блоки (служебные библиотечные объекты, предназначенные для контроля и управления, - иногда они соответствуют объектам реального мира, например, насос или задвижка, а иногда выполняют только одну функцию контроля или управления, например, регулятор). Любой из объектов MasterSCADA имеет свойства и документы, представляющие его для оператора. Можно создавать свои окна с динамической графикой (мнемосхемы), графики изменения параметров во времени (тренды), отчеты, журналы сообщений и другие документы.

Изучение MasterSCADA и проектирование в ее среде будет гораздо проще, если вы будете четко представлять перед собой, какой результат хотите получить. Это позволит вам вести проектирование по самой правильной методике: от общего к частному, или, как говорят программисты: «сверху вниз». На раннем этапе разработки проекта необходимо разбить реальный технологический объект на составные части, подобъекты. Например, мы автоматизируем на заводе цех, по производству продукта X. Посмотрим, какая иерархия объектов будет в этом случае. Есть главный объект — это Завод, заходим на его территорию и видим наш объект автоматизации — Цех. У этого объекта должно быть свое графическое окно - мнемосхема, куда будут вынесены все важные параметры, характеризующие ход технологического процесса и состояние оборудования. Обычно, мнемосхема отображает технологическую схему объекта, на которой оборудование представлено с помощью мнемонических или «жизнеподобных» изображений, изменение цвета, положения или формы которых характеризует их состояние, а параметры представлены в виде числовых значений или «щитовых» приборов. На уровне цеха показывается только важнейшее оборудование и основные параметры. Излишняя детализация здесь вредна. Для цеха важно также построить отчеты, чтобы отследить какое количество сырья поступило, и сколько продукции было изготовлено. Разумеется, мы должны видеть изменение этих параметров во времени, а для этого, как мы уже упомянули выше, предназначен такой документ, как тренд. Впрочем, его возможности гораздо шире, в чем мы еще в дальнейшем убедимся. В частности, он может показывать и зависимость одного параметра от другого. И, наконец, еще один вид необходимых нам документов - это журналы сообщений, с помощью которых мы можем отслеживать события на объекте: как технологические, например, начало и конец технологических циклов и операций, так и внеплановые, аварийные: выход параметра за контрольную границу, несрабатывание задвижки и т. п. Обратите внимание, что документов каждого вида может быть несколько, в зависимости от того, как вы хотите структу-

ризовать представляемую информацию. Но одна мнемосхема всегда будет главной, это лицо объекта. Ее, обычно удобно использовать для расположения на ней кнопок вызова других документов.

Двигаемся дальше. На территории цеха можно увидеть несколько технологических участков (или линий), каждый из которых отвечает за свой технологический передел. Для участка мы можем создать такой же набор документов, но уже с большей детализацией. В результате подобных рассуждений мы получаем дерево объектов, показанное на Рисунок 2-9.

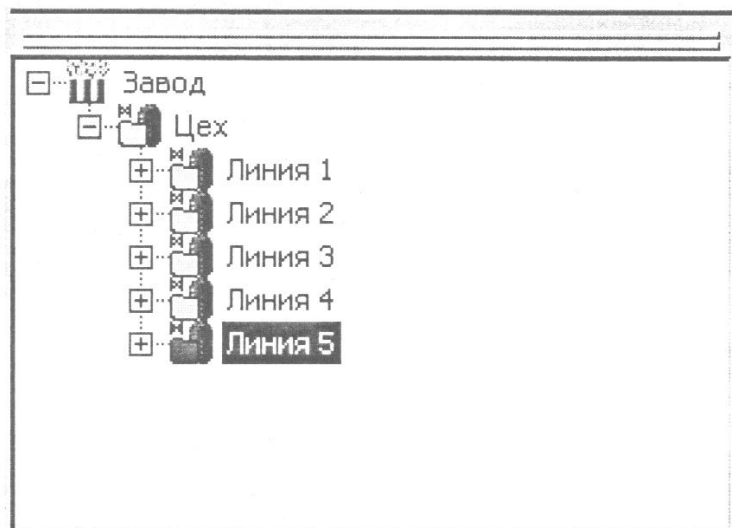


Рисунок 2-9. Дерево объектов

Итак, деление на подобъекты нужно производить до тех пор, пока соблюдаются два условия:

- Можно выделить логически связанную группу переменных и функциональных блоков
- Нужно создать для выделенной группы какие-либо документы, характеризующие ее как единое целое.

**Важно! В настройках каждого объекта (Страница свойств Общие, поле Компьютер) нужно определить на каком компьютере он будет выполняться. Если эта настройка не сделана, то это равносильно тому, что объекта в исполняемом проекте не существует.**

Если необходимо по смыслу проекта объединить несколько переменных MasterSCADA, но при этом они не требуют никаких документов и никакой совместной обработки, то в этом случае лучше создать не дополнительный объект, а группу переменных.

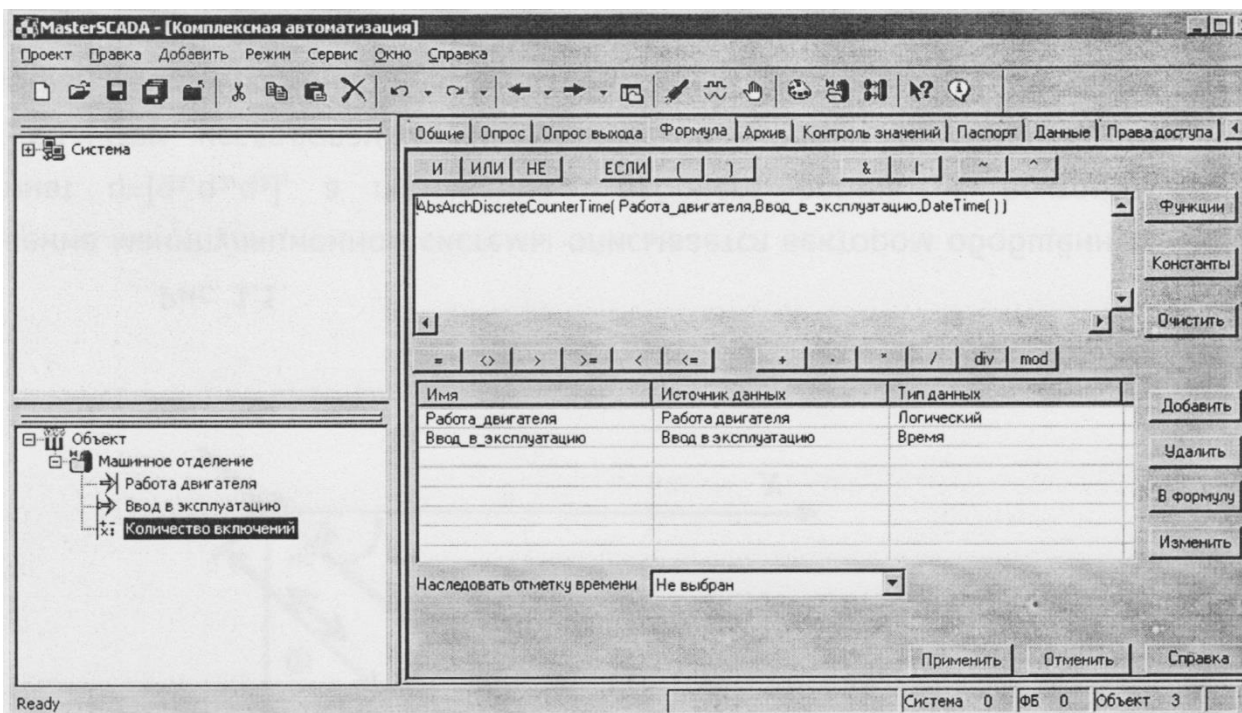
Проект, как правило, на 80 процентов состоит из переменных объектов MasterSCADA (есть еще и переменные деревя Системы). Казалось бы, их всего четыре типа:

значение (→), расчет (↔), событие (⚡), команда (→)

но, несмотря на это, они позволяют решать практически любые задачи современной автоматизации.

Расчет - используется для обработки данных с помощью математических формул, включающих, кроме действий и функции из обширной встроенной библиотеки. Наряду с выполнением ма-

тематических и логических (включая побитовые) действий над переменными (в том числе и с их архивными значениями), *расчет* позволяет работать со временем, с признаками качества и нарушения границ переменных. Формула обработки в текстовом виде и список обрабатываемых переменных визуально задаются (*Рисунок 2-10*) на странице свойств **Формула**, а у переменной *расчет* в дереве объектов в режиме исполнения показывается результат.



**Рисунок 2-10. Страница свойств "Формула"**

*Значение* - входная переменная MasterSCADA. С ней можно связать для передачи в нее данных любую выходную переменную. Это любая другая переменная MasterSCADA, кроме другого *значения* или *выхода* (переменной *дерева системы*). Применяется только для единичного использования переменной в проекте - для расчетов и отображения полученной информации на трендах и мнемосхемах. Если необходимо использовать это значение в дальнейшей обработке данных с помощью функциональных блоков, то *значение* не подойдет, так как оно не имеет «выхода», то есть не может быть соединена связью с потребителями значений. Если же перед отображением на *мнемосхеме* или *тренде*, необходимо произвести обработку данных, или использовать полученное значение в нескольких местах проекта, то данную переменную лучше заменить *функциональным блоком Повторитель*, который находится в категории *палитры* MasterSCADA **Обработка сигналов**. В отдельных случаях для этого можно использовать и переменную *расчет*.

*Команда* - переменная, предназначенная для передачи значения, заданного оператором или присвоенного ей в результате выполнения действий (об этом мы подробно расскажем позднее) в другие переменные - например, в *значения*, *выходы* (в *дерева системы*) или *расчеты*. С помощью *команды* можно вводить уставки, включать или отключать оборудование, менять коэффициенты в формулах *расчетов* и т. п. Дискретная (0 или 1) *Команда* позволяет на специальной *странице свойств* сформировать список действий, которые необходимо произвести, когда она сменит значение с 0 на 1.

Событие - отличается от расчета только тем, что результатом вычислений будет не число, а факт изменения логического значения из состояния **Ложь** (значение 0) в состояние **Истина** (значение 1). Момент перехода (как говорят в автоматике: «передний фронт сигнала») порождает необходимые действия или выдачу сообщения, заданных разработчиком на страницах свойств этой переменной. Событие имеет формулу, как расчет, страницу свойств Действия, как команда, но сообщение есть только у события. Именно поэтому основное назначение события - это порождение действий и сообщения при обнаружении какого-либо реального события в реальном мире.

Расчеты, команды и события - это выходы MasterSCADA. Их значения можно передавать по связям на входы, например, значениям, входам OPC-сервера или входам Контроллера в дереве Системы. В последних двух случаях данные из дерева объектов будут передаваться в дерево Системы и далее на нижний уровень, к устройствам.

### Функциональные блоки

Наряду с переменными MasterSCADA для создания логики работы проекта, обработки сигналов и решения других задач в дереве объектов используют функциональные блоки.

Функциональный блок имеет набор входов, выходов и встроенную логику работы, т. е. в режиме исполнения элемент обрабатывает поступившие на его входы данные по заданной программе, а результат отображается на его выходах. Некоторые функциональные блоки имеют также свое динамическое отображение в графических окнах (мнемосхемах), список генерируемых сообщений и ряд других свойств объектов - их мы будем называть визуальными функциональными блоками<sup>7</sup>. Для удобства разработчиков ФБ разделены по умолчанию на несколько категорий.

Категории **Обработка сигналов** и **Вычисления** служат для обработки аналоговых, дискретных и строковых величин. Большая часть ФБ, относящихся к категории **Вычисления** дублируют возможность вычислений, реализованные в формулах переменных расчет и событие, поэтому используются только, когда процесс вычислений требуют визуального представления в виде графической схемы функциональных блоков (об этом мы еще поговорим в дальнейшем), однако, обратите внимание на то, что формулы не поддерживают обработки строк. В этом случае соответствующие ФБ будут единственным вариантом обработки, за исключением написания программ на языках высокого уровня (и об этом тоже далее).

**Исполнительные механизмы** - в этой категории нашли свое место наиболее часто встречаемые в АСУТП исполнительные механизмы: задвижки, клапаны, насосы и т. п. Элементы представлены как в классическом мнемоническом виде, так и в псевдонатуральной графике. На первый взгляд может показаться, что данная категория немногочисленная, а перечень реального оборудования, чью логику работы должны описывать эти элементы намного шире. Однако, благодаря гибким настройкам один ВФБ MasterSCADA из категории **Исполнительные механизмы** может заменить десятки элементов. В некоторых ВФБ вид изображения выбирается из списка доступных (например, одну из разновидностей клапанов - муфтовый, фланцевый, диафрагменный и т. п.), но есть и универсальные, где выбор изображения остается целиком за пользователем - это ВФБ Двухпозиционный исполнительный механизм с выбором изображения, а также ВФБ Динамический ИМ.

**Датчики** и **Аппараты** содержат ВФБ, которые удобно использовать при создании мнемосхем. По численности и востребованности они значительно уступают другим категориям палитры MasterSCADA, так **Датчики** фактически дублируют визуальные возможности обычных переменных MasterSCADA, а **Аппараты** часто сложнее представленных простейших случаев. Реальные аппараты реализуются возможностями объектов MasterSCADA и сохраняются разработчиками в их пользовательских библиотеках.

Очень часто развитие пакета зависит от высказанных пожеланий пользователей, если у вас есть необходимость в новых элементах, то, пожалуйста, обращайтесь к нам с любыми предложениями. Не забывайте, что интерфейсы создания новых ФБ открыты, и вы можете сделать их самостоятельно. Во многих случаях проще создать и сохранить в библиотеке объекты проекта.

Бывают ситуации, когда реальный сигнал необходимо заменить значением, изменяющимся по тому или иному закону. И, хотя такая возможность предоставлена средствами формирования значений самих переменных (см. страницу свойств Опрос), тем не менее, иногда нагляднее использовать в решении этой задачи поможет категория **Генераторы значений**.

ФБ группы **Работа со временем** помогут определить метку времени переменной, выдать импульс в определенный момент времени и много другое.

В системах, где MasterSCADA выполняет функции регулирования и управления, разработчики широко используют ФБ из категории **Управление: Циклограмма, Регулятор, Задатчик**.

Возможности записи и чтения из файлов, обращения к любому значению, сохраненному MasterSCADA, реализуются ФБ из категории **Работа с архивом**.

Для решения отраслевых задач в палитре функциональных блоков имеется категория **Отраслевые библиотеки**, которая включает в себя подразделы: **Теплоэнергетика, Вентиляция и кондиционирование, Электроэнергетика**. Безусловно, эта категория еще будет развиваться и пополняться новыми разделами.

Неограниченные возможности открывает перед разработчиком категория **Служебные. ФБ** этой категории позволяют не только определить, какой оператор работает в режиме исполнения в настоящий момент, сохранить какие-либо документы проекта или запустить внешнее приложение из интерфейса MasterSCADA, но и расширить стандартные возможности при помощи языков программирования **ST**(стандарт МЭК 61131-3) или **Ctt** (ФБ Скрипт).

**Важно! Функциональные блоки Скрипт и Программа ST созданы для опытных пользователей с навыками программирования.**

Для любителей нестандартных решений или студентов ВУЗов может быть интересна категория **Нечеткая логика**.

Вспомогательные ФБ и те, которые не нашли свое место по смыслу в других категориях, будут находиться в разделе **Другие**.

**Важно! Одни и те же функциональные блоки могут находиться в нескольких категориях одновременно.**

Конечно, иногда встречаются задачи, которые сложно решить стандартными способами, но даже в этих непростых ситуациях мы не оставляем наших клиентов без поддержки. Если пользова-

тель имеет достаточный опыт в программировании и время, то мы рекомендуем создавать свои собственные *функциональные блоки*, основываясь на документации, которая устанавливается совместно с любой версией MasterSCADA. Ее можно найти по адресу **Пуск/ Все программы/MasterSCADA/ Документация/ Руководство по разработке ФБ и драйверов**. Если же у разработчика авральная ситуация, то мы можем и сами разработать под вашу задачу ФБ на доступных условиях<sup>8</sup>.

Пользователь может перераспределить элементы между категориями по своему усмотрению при помощи пункта *главного меню* программы **Сервис/Организатор/ФБ...**

**Важно! Прежде, чем задействовать в работе ФБ убедитесь, что поставленную задачу нельзя решить при помощи стандартных переменных MasterSCADA.**

### Общая структура проектов

Давайте подведем итог вышесказанному, чтобы выработать верный взгляд на разработку проектов, прежде, чем увязнем в мелких деталях. Системный подход именуется такую «правильную» разработку методикой «сверху вниз».

Как мы уже говорили, проекты MasterSCADA состоят из двух разделов.

Первый из них называется *Система* или для наглядности *дерево системы*. Он служит для описания состава, связей и настройки всех технических и системных программных средств, реализующих создаваемую нами систему автоматизации.

Второй раздел называется - *Объект* или *дерево объекта*. И хотя он практически состоит из элементов всего двух видов - папок-объектов с комплектом принадлежащих им документов и настроек и переменных, его роль в проекте является ключевой. Главное назначение *дерева объекта* - описание нашего представления об автоматизируемом объекте, логических и функциональных связях между его частями, а значит и логики контроля и управления этим объектом.

Сможем ли мы структурировать это представление - проявить настоящий системный и одновременно объектный подход? Именно от этого, в первую очередь, зависит то, хороший ли получится проект, будет ли он легко понятен кому-либо, кроме автора, насколько трудоемкой окажется его разработка.

Здесь важнее всего следовать принятому в программировании принципу самодостаточности элементов проекта (инкапсуляции), который в применении к предмету нашего разговора означает что количество внешних связей любой папки объекта следует стремиться сделать минимальным. Такая минимизация чаще всего достигается при простом следовании реальной организационной или технологической структуре нашего автоматизируемого объекта.

Рассмотрим пример организационной структуры в порядке иерархической подчиненности: завод - цех - участок (линия) - агрегат - исполнительный механизм (датчик). Попытка построить проект по функциональному признаку, например, сгруппировать все аналоговые параметры в одну папку почти всегда приводит к избыточным связям между частями проекта, а, следовательно, его неэффективности. Мало того, жизнь показывает, что функциональный подход приводит еще и к огромным сложностям в развитии и модифицировании проектов. В то же время, отдельная папка-

объект в хорошо структурированном по объектному принципу *дереве объекта* автономна в такой степени, что может быть перенесена без изменений в любой другой проект, где возникнет необходимость в работе с подобным объектом. Например, однажды реализовав в качестве элемента проекта группу насосов, мы сможем переносить ее вместе со всей логикой контроля и управления, со всеми сигналами и документами в любой другой проект, где она потребуется. Единственное, что останется сделать, - это восстановить связи с источниками и приемниками реальных физических сигналов, а также организовать вызов документов этого объекта из мнемосхем более высокого уровня.

Но подробнее обо всем этом в дальнейшем.

### **Выбор порядка разработки системы: от объекта или от системы**

Этот выбор не является жестким, но от него зависит удобство и скорость разработки проекта. Разработка структуры технических средств в проекте целесообразна только тогда, когда вы полностью определились с нею в жизни, когда известно, по каким каналам связи передаются данные, какие выбраны контроллеры и модули расширения, какой физический сигнал к какому входу или выходу подключен. Но, если все перечисленное находится еще в сыром виде, ничего страшного - вы можете начать разработку проекта, стартовав от структуры автоматизируемого объекта, его функциональных связей, логики его контроля и управления, то есть формируя *дерево объекта*.

MasterScada позволяет разрабатывать проект в любом порядке, в том числе, и параллельно. Если это делают разные разработчики на разных компьютерах, то удобнее, чтобы «головной» проект, в который будут потом копироваться отдельно разработанные части, находился у того, кто отвечает за *дерево системы*. Не забудьте, что проектирование - это итерационный процесс и «стыковать» имеет смысл только полностью законченные и отлаженные части.

**Важно! Не тиражируйте однотипные части проекта до полного окончания их разработки и отладки.**

Отдельно разработанные части проекта требуют установления связей друг с другом. О передаче данных по связям мы сейчас и поговорим.

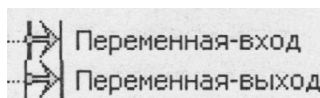
### **Особенности создания связей между деревом системы и деревом объектов**

Связи, как и большинство других действий в MasterSCADA, настраиваются «мышью». Различают два типа связей - прямые, когда данные от переменной-выхода без какой-либо обработки сразу же поступают к переменной-входу, и косвенные, например, когда одна переменная является источником для аргументов формулы *расчета* или *события*.

Итак, чтобы организовать прямую связь между переменными проекта MasterSCADA нужно перетянуть, удерживая ЛК, одну переменную на другую. В месте, где связь может быть установлена, обозначение манипулятора примет вид /, отпустив ЛК, вы увидите, что к стандартному обозначению

переменной добавится розовая вертикальная черта, это говорит о том, что связь установлена

(Рисунок 2-11).



**Рисунок 2-11. Обозначение прямых связей**

В случае, если разработчик проекта пытается установить связь, при которой возможна потеря точности, например, между вещественным двойной точности выходом дерева объекта и входом дерева системы целого типа, то MasterSCADA отследит это и выдаст предупреждение.

Для того чтобы разорвать прямую связь, достаточно нажать ПК<sup>9</sup> на переменной и в появившемся контекстном меню выполнить пункт *Разорвать связь*.

Если необходимо связать переменную любого из деревьев с аргументом формулы события или расчета, то в этом случае алгоритм будет таким:

- Выделите переменную событие или расчет в дереве объектов.

**Важно! Один вход напрямую можно соединить только с одним выходом, а один выход может быть связан с несколькими входами.**

<sup>1</sup> ПК-здесь и далее правая кнопка мыши

- Перейдите на страницу свойств Формула
- Перетащите ЛК нужную переменную в таблицу страницы свойств.

После этого вы сможете использовать значение переменной в формуле. Способ создания формул рассмотрим далее.

Удалив переменную из таблицы страницы свойств Формула вы тем самым разорвете связь.

Чтобы оперативно определить, какие связи имеет та или иная переменная, достаточно выделить ее в дереве и перейти на страницу свойств Список связей. На данной странице отображаются как прямые связи, так и косвенные.

Создание связей в проекте - очень важная задача, и, самое главное, решая ее, не допустить ошибок! MasterSCADA позволяет «перетаскивать» переменную в дерево объектов из дерева системы несколько раз. На первый взгляд, это может показаться разработчику удобным, но правильно ли это? Давайте разберем ситуацию: проект готов к внедрению. Но в момент пусконаладки отказывает какой-либо модуль ввода-вывода. Экстренно производится замена, но вместо используемого модуля устанавливают сходный по свойствам прибор другого производителя. Это повлечет за собой смену конфигурации ОПС-сервера и, как следствие, изменение дерева системы. Если каждая переменная дерева системы будет связана с несколькими переменными дерева объектов, то для того чтобы восстановить проект, потребуется значительно больше времени.

**Важно! Связь между переменной дерева Системы и переменной дерева Объектов должна быть только одна! Внутри объектов ограничений по связям нет.**

При копировании, вставке из палитры переменных или объектов, в случае если они имеют внешние связи, то автоматически появится окно восстановления связей.

Основа построения логики контроля и управления в MasterSCADA - это передача данных по связям между переменными. Например, от аналогового входа модуля (*дерево системы*), к которому подключен физический датчик уровня в баке, значение передается в блок первичной обработки параметра, принадлежащий объекту **«Бак»** (*дерево объекта*), а от этого блока формируются документы данного объекта (*мнемосхему, тренд, журнал сообщений* и т. п.).

Еще раз обратим внимание, что для успешной разработки каждого проекта очень важно как можно быстрее понять, какие связи являются устойчивыми, а какие могут меняться в процесс разработки или модификации проекта.

Вернемся к нашему примеру. Значение уровня необходимо отображать на *мнемосхеме* бака, а при его выходе за установленные границы формировать сообщения. Отсюда следует, что все вышеперечисленное должно принадлежать объекту **«Бак»**. А вот источник сигнала в виде аналогового входа модуля может меняться - сейчас мы подключились к одному входу, а при его неисправности можем «перекинуть концы» от физического датчика уровня и на соседний свободный вход. Отсюда вывод, что такая связь является внешней и должна легко устанавливаться в одном единственном месте. Если бы мы связали сигнал от аналогового входа модуля отдельно с каждой обработкой или документом, где он используется, то процедура замены стала бы трудоемкой. Но мы сделаем в рамках объекта одну единственную переменную **«Уровень»**, которая и будет отвечать за связь с реальным источником сигнала, а остальные его потребители получают значение уже от нее. Тем самым замена сигнала, используемого во многих обработках или документах, сведется к замене единственной связи, если мы изначально правильно сгруппировали объекты и переменные.

### Базовые документы объектов

На страницах учебника неоднократно говорилось, что для каждого объекта можно создавать *мнемосхемы* (графические окна), *тренды, журналы сообщений, отчеты* (рапорты). В дальнейшем мы отдельно подробнее поговорим про каждый документ. Цель этого раздела - дать вам общий обзор. MasterSCADA имеет, как predefined типы документов, так и возможность создавать на базе некоторых из них (*мнемосхем, журналов сообщений*) типизированные новые виды окон пользовательского интерфейса.

Начнем с графических окон. Поскольку в реальных проектах одному и тому же объекту необходимо для разных целей иметь несколько графических окон (мнемосхему, окно управления, окно настроек и т.п.), программа предоставляет возможность их типизации в рамках проекта. На *странице свойств Окна* корневого узла *дерева системы* (*Рисунок 2-12*) определяются полный список типов графических документов и их базовые настройки: размер по умолчанию (задается в пикселях), способы открытия и отображения окна в режиме исполнения.

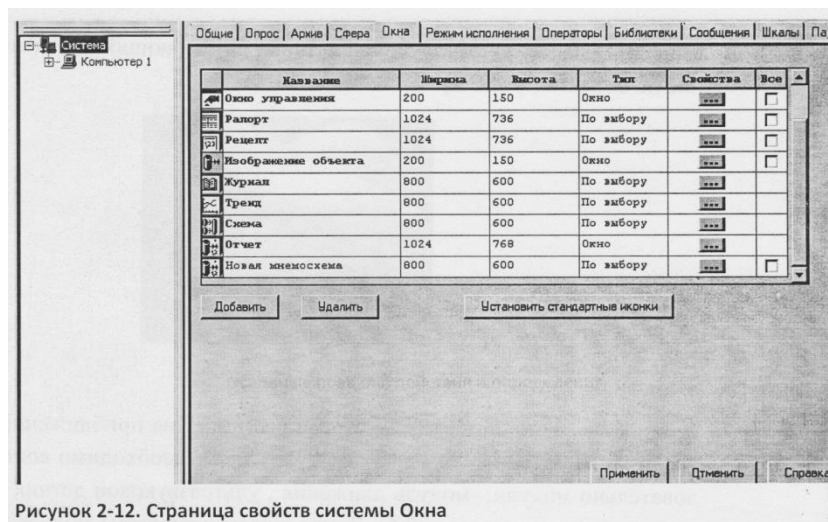


Рисунок 2-12. Страница свойств системы Окна

Когда мы захотим сделать графическое окно для конкретного объекта, то на его странице свойств **Окна** мы сможем выбрать нужный (по свойствам - размеру, способу вызова и отображения) тип окна. Изначально, для примера задано несколько типов. Это, разумеется, **Мнемосхема**, а также **Окно объекта**, **Окноуправления** и др. документы, список

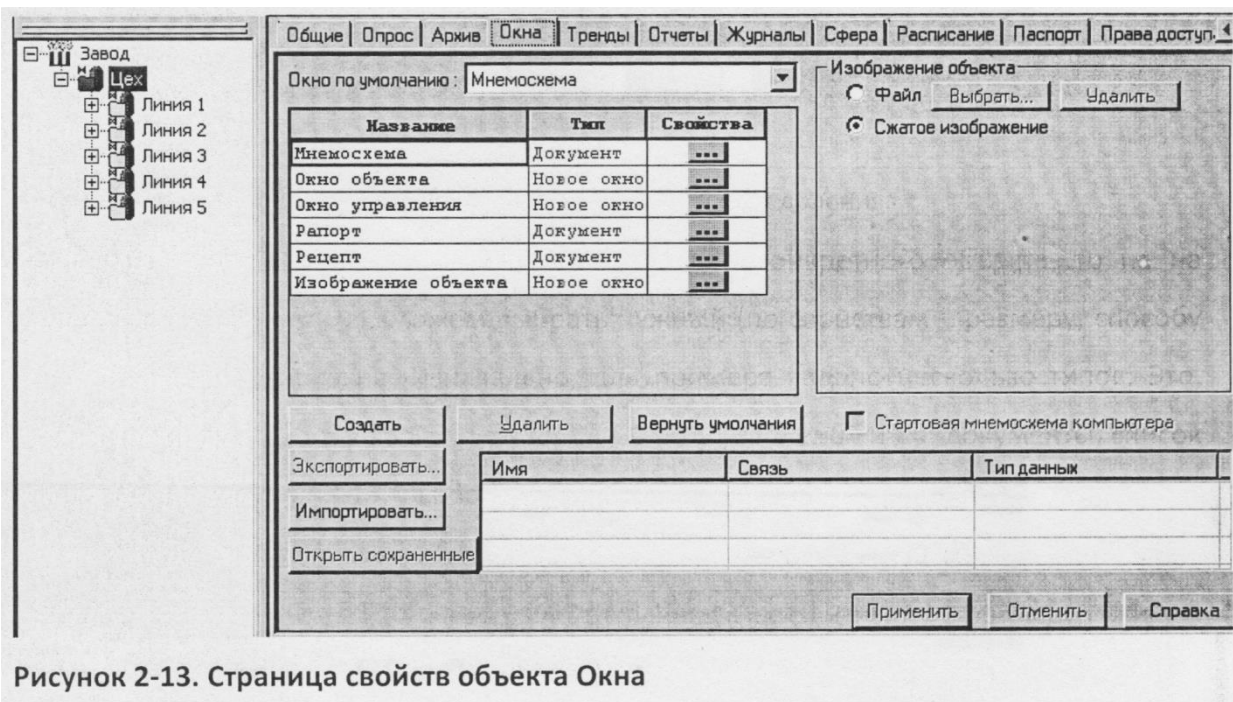


Рисунок 2-13. Страница свойств объекта Окна

Наиболее часто разработчик начинает с создания мнемосхемы. Итак, чтобы создать мнемосхему объекта, необходимо перейти на страницу свойств **Окна**, выделить ЛК в таблице нужный документ и нажать кнопку **Создать**. Если мнемосхема уже была создана ранее, то, чтобы ее открыть, нажмите кнопку **Редактировать**.

Интерфейс изменился (Рисунок 2-14) - по-прежнему видны два дерева, но вместо страниц свойств появилось белое поле, на котором и будет создаваться картинка мнемосхемы, над этим полем появилась дополнительная панель инструментов, а справа показались пять вспомогательных панелей: **Элементы**, **Входы**, **Выходы**, **Палитра**, **Свойства**.

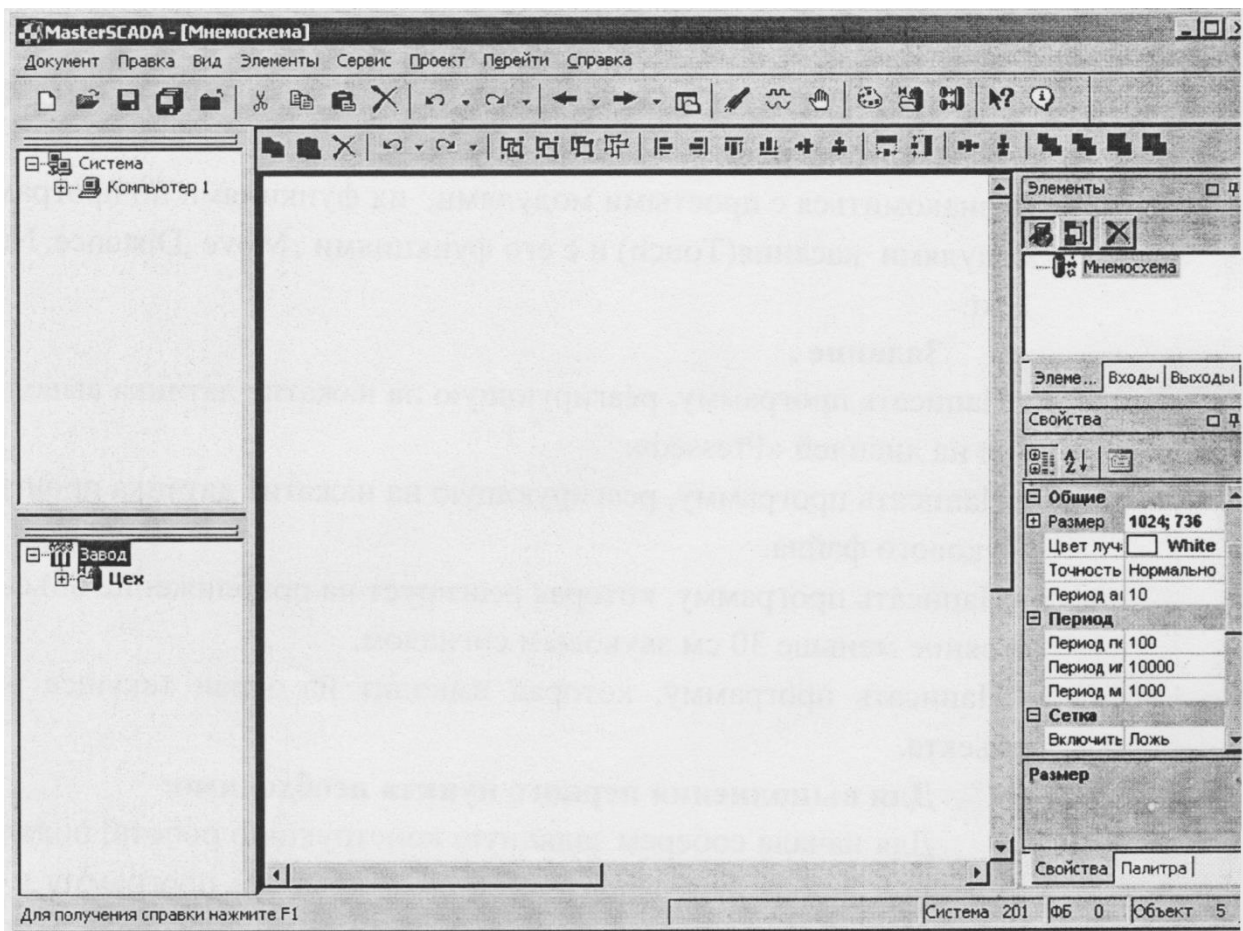


Рисунок 2-14. Интерфейс графического редактора

Особенность взаимодействия графредактора с менеджером проектов заключается в том, что в большинстве случаев для создания динамической картинке-мнемосхеме достаточно перетащить в поле редактора элементы проекта: переменные, *ВФБ, объекты*. Если выполнить перенос из дерева на мнемосхему ЛК, то тогда элемент примет вид по умолчанию. Если правой кнопкой мыши, то в зависимости от типа элемента MasterSCADA предложит выбор графического отображения. Никакой настройки после перетаскивания не требуется.

Чтобы создать полноценную мнемосхему с изображением объекта и сколь угодно сложными способами динамизации поведения элементов изображения в зависимости от изменения значения переменных воспользуемся панелью графического редактора *Палитра* и средствами динамизации любых свойств элементов мнемосхемы. Но подробнее об этом в дальнейшем.

Вернемся к вопросу типизации документов системы. Рассмотрим теперь *журнал сообщений*. Если посмотреть на список типов журналов на одноименной странице корневого узла дерева системы, где уже есть полный журнал, журналы активных и неактивных сообщений, то может показаться, что их достаточно, но фантазия заказчиков автоматизированных систем неисчерпаема, поэтому возможность создать еще несколько типов по его вкусам никогда не будет лишним. А отличие нового типа будет прежде всего в том, какие сообщения попадут в этот журнал, а какие пролетят мимо. Создав новый тип, в дальнейшем, как и в случае с новым типом окна, мы сможем использовать его в любом объекте. Как не сложно догадаться, чтобы создать для объекта журнал

сообщений нужного типа, нужно перейти на страницу свойств объекта **Журналы**, выбрать тип и нажать кнопку **Создать**. По большому счету, никаких дополнительных настроек можно больше не делать. В режиме исполнения в этот журнал будут попадать сообщения, удовлетворяющие условиям фильтрации заданным нами для данного типа журналов.

**Важно! Журналы также существуют у Системы и Компьютера. В эти журналы будет попадать информация со всех объектов. Они создаются автоматически, в отличие от журналов объектов.**

Рассмотрим еще один тип документов - тренды или графики параметров.

Чтобы создать такой график необходимо на странице свойств объекта **Тренды** нажать кнопку **Добавить** и перетащить в открывшееся поле тренда нужные переменные. Для трендов нет пользовательской типизации - только предустановленные уровни сложности. Но каждый отдельный тренд можно подогнать «под себя», выбрав **Продвинутый** уровень, на котором доступно использование всех настроек, позволяющих полностью преобразовать внешний вид и функциональность тренда.

**Важно! Тренды, журналы и таблицы значений за период времени - это взаимосвязанные виды документов, которые имеют возможность синхронизированного просмотра, взаимного переключения и другого взаимодействия, основанного на доступе к сохраненным данным за прошедшее время.**

Современные системы автоматизации, не говоря уже об учете ресурсов, не обходятся без такого типа документов, как отчет. Для создания отчетов можно воспользоваться, как встроенным редактором отчетов MasterSCADA, так и **MS Excel**. В этом можно убедиться на странице свойств

объекта **Отчеты**. Возможности встроенного генератора отчетов MasterSCADA не уступают ведущим специализированным продуктам этого назначения, поэтому при постановке задачи можно не задумываться о возможности ее решить - не сомневайтесь, что средства для этого вполне достаточны.

**Важно! Тренды, Отчеты, Журналы в MasterSCADA это средства просмотра архивных данных в удобном для пользователя виде. Чтобы они отображали информацию, необходимо убедиться, что установлены корректные значения параметров архивирования на страницах свойств «Архив» проекта.**

Про создание различных документов можно говорить бесконечно, потому что количество создаваемых форм не ограничено, но все же в дальнейшем мы постараемся раскрыть все тайны графического редактора, модуля для создания трендов и журналов и, конечно же, редактора отчетов.

Помимо базовых документов, создаваемых встраиваемыми редакторами MasterSCADA, объекты могут иметь и другие документы, для работы с которыми используются программы других производителей, открывающиеся в интерфейсе MasterSCADA наравне с ее собственными редакторами (для этого они должны соответствовать программным спецификациям OLE Document). Например, оператор может просмотреть паспорт оборудования в формате **Adobe Acrobat**, чертеж в **Autocad**, схему в **Visio**, сделать заметки в **Word**, просмотреть пошаговую инструкцию, разработанную в **PowerPoint**. Причем для этого не потребуется знать имя файла или место хранения документа - все они будут привязаны к объектам по своим типам. Для такой привязки необходимо сначала подключить внешние программы к системе, для чего воспользоваться пунктом главного

МЕНЮ **Сервис/Организатор/ Документов...** и определить типовые названия для документов подключаемых программ - например, назвать документ **Autocad «Чертежом»**. Далее на СТРАНИЦАХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ **Другие** вы получите возможность создавать и подключать к объекту документы тех типов, которые вы определили, а вызывать эти документы в режиме исполнения оператор сможет с помощью всего арсенала средств вызова документов в MasterSCADA.


### Запуск режима исполнения


Создание проекта, дело конечно интересное, но ничто не вдохновляет инженера так, как вид собственного творения в работающем виде. Насладиться проделанной работой можно в режиме исполнения MasterSCADA, а заодно и отладить разработанный проект, прежде чем запустить его в рабочем режиме контроля и управления технологическим процессом. Режимом исполнения называют состояние, когда проект, который вы создали, начинает работать, используя созданную структуру и настройки для интерпретирующих их программных модулей MasterSCADA.

В MasterSCADA различают три типа режима исполнения: **Отладка, Имитация, Пуск**.

В процессе разработки наиболее часто используется режим **Отладки**. Он позволяет запустить программу на исполнение максимально быстро на любом этапе создания проекта. При старте не требуется идентификации оператора. Проект запускается полностью на одном компьютере, даже в случаях, когда предполагается сложная распределённая архитектура. Этим режимом можно воспользоваться только из среды разработки. Наиболее часто для запуска проекта из DT исполь-

зуют панель инструментов. Для запуска режима **Отладка** необходимо нажать на иконку  .

Рабочий режим исполнения проекта называется **Пуск**, для его запуска из среды разработки используйте иконку  . При запуске потребуются инициализация оператора. Этот режим необходимо запускать на всех компьютерах системы. Программа производит реальный опрос и формирование команд. Режим **Пуск** можно запустить и минуя среду разработки, например, создав ярлык на рабочем столе, из командной строки (команды **Выполнить** среды **Windows**) или заранее сформировав командный файл **Windows**. В строке запуска нужно прописать путь к файлу запуска MasterSCADA (**MasterSCADA.exe**) и путь к исполняемому файлу проекта (**[имя проекта].vav**). Синтаксис команды будет таким: **<путь к MasterSCADA.exe> nymb к файлу проектахпараметры><sup>10</sup>**. Если необходимо запускать проект на исполнение сразу же после загрузки компьютера, то нужно ярлык поместить в группу автозапуска (**Пуск/Все программы/Автозагрузка**)

Режим **Имитация** (иконка  ) используется в ситуациях, когда проект уже практически создан, но есть еще ряд незадействованных связей. Он запускается только из среды разработки и полностью подобен режиму **Пуск**, за исключением того, что все «оборванные» связи заменяются имитационными сигналами. Вид сигнала будет зависеть от типа переменной и выбора закона имитации (по умолчанию предлагается синусоида для аналогового сигнала и пульсатор для дискретного).

Интерфейс MasterSCADA в режиме исполнения будет зависеть от выбранного режима, а также от настроек проекта.

<sup>10</sup>Со списком возможных параметров можно ознакомиться в разделе справочной системы «Работа в режиме исполнения/Запуск проекта из командной строки»

В режиме **Отладка** вы увидите деревья MasterSCADA и страницы свойств. Рядом с деревьями появится колонка, в которой можно отследить изменения переменной, значения переменных будет отображаться напротив названия переменной (Рисунок 2-15). Кликнув ЛК, вы сможете задать любое значение любой переменной. В процессе создания проекта это допустимо, т. к. позволяет например, посмотреть вид параметра в режиме исполнения на мнемосхеме или посмотреть, как работают формулы расчетов.

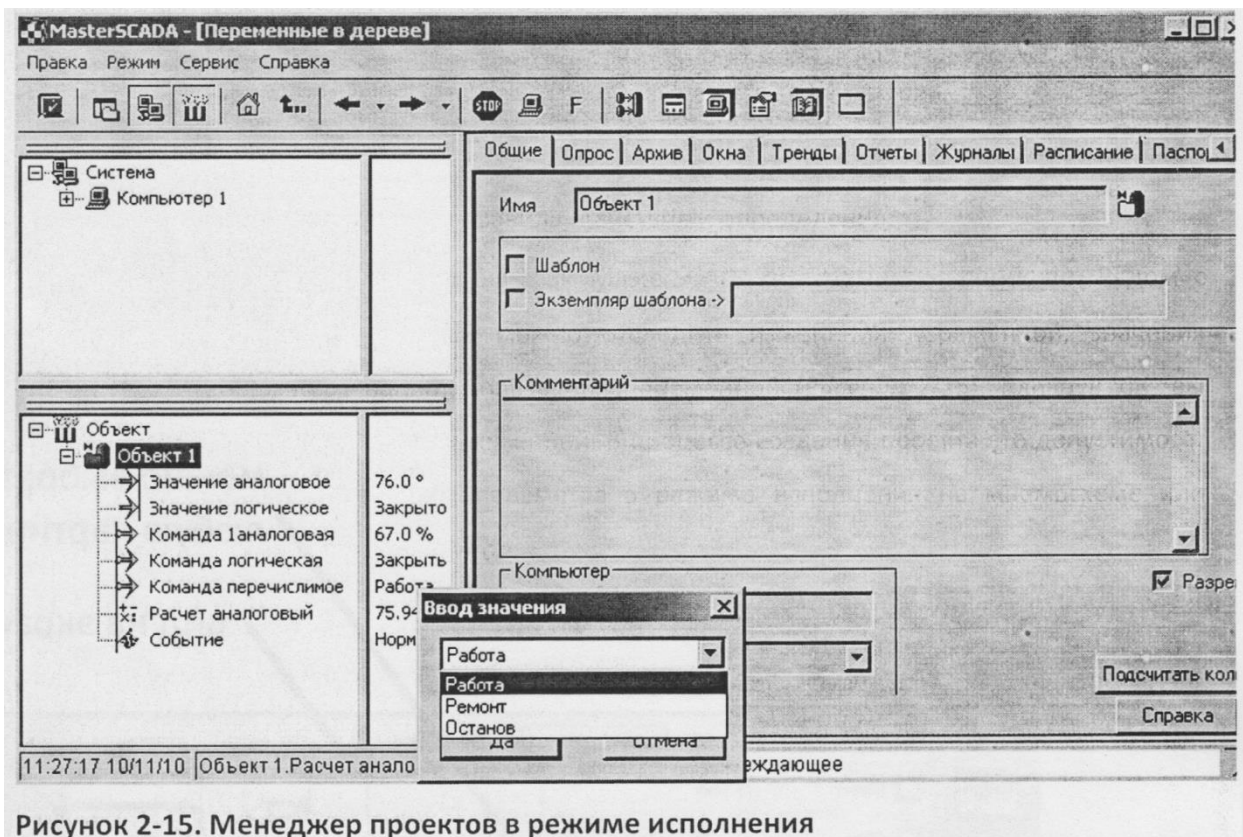


Рисунок 2-15. Менеджер проектов в режиме исполнения

**Важно!** В режиме исполнения колонка со значениями переменных перерисовывается не чаще, чем раз в секунду. Поэтому отследить реальное значение, а также скорость изменения переменной в данном поле нельзя. Самую точную информацию о периоде изменения переменной, значениях, которые были при каждом изменении за последние несколько минут, и о ее признаке качества можно получить на странице свойств «Данные выхода»

Переход к любым документам объектов можно осуществлять через контекстное меню или страницы свойств.

Интерфейс после старта режимов **Пуск** и **Имитация** будет зависеть от тех настроек, которые вы сделали на странице свойств системы или компьютера Режим исполнения (Рисунок 2-16).

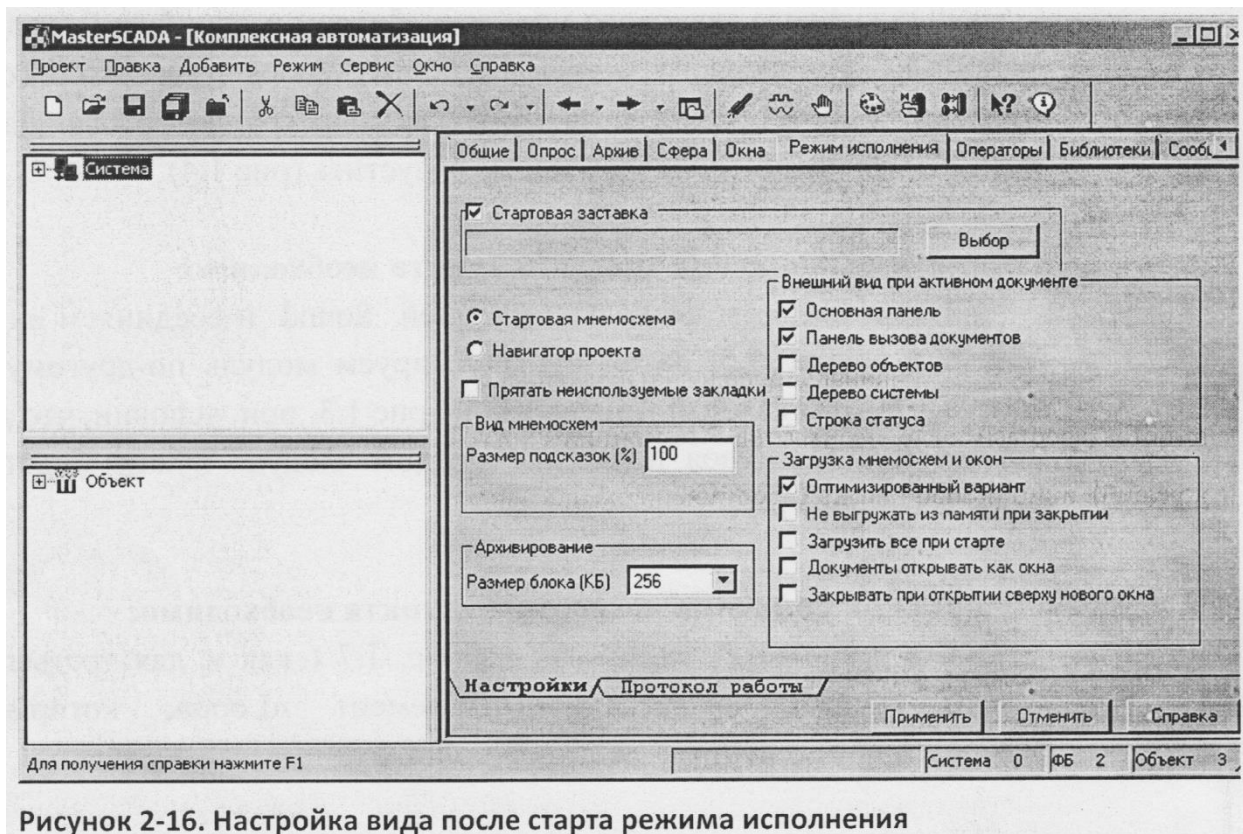


Рисунок 2-16. Настройка вида после старта режима исполнения

Как правило, для старта используют вариант с отображением стартовой мнемосхемы, которая может быть индивидуальной для каждого компьютера в системе. Эта мнемосхема загрузится сразу же после запуска системы на исполнение. Хотя возможен и такой же вид после старта, как и в режиме **Отладка**. Однако, этот интерфейс может быть небезопасным, так как оператор сможет изменить через деревья значения переменных, а также увидят все внутреннее содержание проекта. Обычно такой вариант запуска используют только для пуско-наладчика или инженера, обслуживающего систему.

В любом из режимов, даже, получив доступ к содержимому проекта, его можно только просматривать без изменения - нельзя изменять формулы расчетов, добавлять или удалять переменные, изменять периоды опросов объектов, OPC-серверов и т. п. поэтому страницы свойств в режиме исполнения не активны, палитра функциональных блоков в режиме исполнения не отображается.

Стартовую мнемосхему компьютера можно создать специально на его собственной странице **Окна**, но чаще в качестве стартовой назначают одну из мнемосхем объектов, которые принадлежат данному компьютеру.

Очень важным для работы в режиме исполнения является способ навигации по проекту, то есть способ вызова его документов. Для этого есть как системные возможности, так и кнопки вы-

зова, созданные пользователем на мнемосхемах в соответствии с собственной логикой. Но об этом мы поговорим подробнее позже.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ПО ТЕМЕ №4.4.4. ИНТЕГРИРОВАННАЯ СРЕДА РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА MASTER SCADA

### ВОПРОСЫ

#### 1. Работа с оборудованием:

- Использование OPC-серверов;
- Подключение приборов через MasterPLC;
- MasterLink/

#### 2. Создание простейшего проекта:

- Постановка задачи;
- Формирование конфигурации OPC-сервера;
- Создание нового проекта;
- Базовые настройки проекта;
- Создание дерева системы;
- Создание дерева объектов;
- Создание журнала сообщений;
- Создание тренда;
- Настройки системы архивирования;
- Создание мнемосхемы;
- Права доступа операторов.

#### 3. Финальная проверка проекта:

- Проверка совместимости версий MasterSCADA;
- Перенос проекта с одного компьютера на другой;
- Выбор оператора для тестирования проекта;
- Проверка взаимодействия с OPC-сервером;
- Проверка передачи данных между деревом системы и объектов;
- Запуск проекта в режим исполнения;
- Тестирование мнемосхемы;
- Тестирование тренда и журнала;
- Размер архива;
- Контроль действий операторов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. MASTER SCADA. Основы проектирования. Том.2. Москва. 2012.

### 1. Создание простейшего проекта

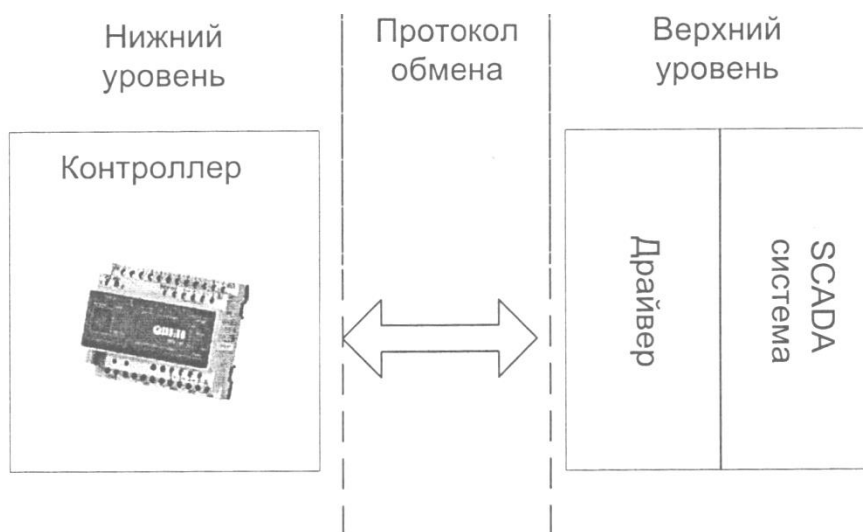
#### Работа с оборудованием

Рассмотрим основные способы работы MasterSCADA с оборудованием. Обратим внимание на основные инструменты предоставляемые разработчику. Общие принципы взаимодействия с оборудованием.

SCADA-система является промежуточным звеном между оператором и системой управления. Поэтому, помимо взаимодействия с оператором через мнемосхемы, тренды и журналы, SCADA система должна вести обмен информацией с нижним уровнем - контроллерами, модулями, приборами. Обмен может осуществляться по стандартным (Modbus, DCON) или по закрытым протоколам (собственные разработки фирм-производителей контроллеров).

Существует два способа получения данных SCADA-системой от нижнего уровня - *драйверы* и *OPC-серверы*.

*Драйверы*. В этом случае SCADA система получает данные через собственный уникальный драйвер (*Рисунок 3-1*).



В этом случае для каждого протокола необходимо написать (разработчику SCADA или прибора) специальный драйвер. При этом драйвер будет работать только с данной SCADA-системой. Поэтому разработчику системы автоматизации нужно убедиться, что SCADA поддерживает выбранные им приборы.

В случае использования драйверов могут также возникнуть проблемы, если необходимо иметь данные от нижнего уровня в нескольких программах (например - в двух SCADA системах, на разных компьютерах).

В итоге, такой подход усложняет работу разработчиков систем автоматизации, так как им приходится подстраиваться и под разработчиков SCADA систем и под разработчиков приборов автоматизации.

В MasterSCADA имеется два способа подключения драйверов - напрямую (используется только для встроенных в компьютер плат ввода-вывода) и через модуль подключения - *MasterLink*. *MasterLink* является специальной версией, входящей в состав MasterSCADA, контроллерной исполнительской системы MasterPLC. Благодаря этому один и тот же драйвер может быть использован и для подключения оборудования к верхнему уровню системы (компьютерам) и к нижнему уровню (контроллерам).

Кроме того, для обмена небольшим количеством данных по простым последовательным протоколам в MasterSCADA имеется функциональный блок SmartLink, позволяющий описать форматы кадров запросов и ответов вообще без программирования.

Наиболее часто MasterSCADA взаимодействует с приборами нижнего уровня посредством OPC-сервера. Термин OPC обозначает семейство стандартов, описывающих технологии взаимодействия между собой разработанных для области промышленной автоматизации программных средств различных производителей. Как правило, речь идет о стандартизации опроса технических средств нижнего уровня (контроллеров, интеллектуальных приборов и т.п.), то есть об унифицированных драйверах, с помощью которых программные средства верхнего уровня систем автоматизации (прежде всего, SCADA-систем) могут опрашивать оборудование. Основное преимущество OPC - это унификация работы с источниками данных. Благодаря стандарту **любой** OPC сервер может работать с **любой** SCADA-системой. Что в итоге позволяет подключить любой прибор к любой SCADA - достаточно установить OPC сервер для данного протокола. При этом написать OPC сервер может фирма-производитель приборов, может разработчик SCADA-систем (при этом OPC- сервер будет также работать и со SCADA других фирм), а может сторонняя фирма.

### Использование OPC-серверов

В случае использования OPC-серверов схема получения данных выглядит так. OPC-сервер, при помощи встроенного драйвера получает данные с нижнего уровня, анализирует их, устанавливает признак качества и метку времени, и передает данные по интерфейсу OPC клиенту. OPC-клиентом

является SCADA система (или другая программа, например MES-система).



**Рисунок 3- 2**

Стандарт обмена данными OPC базируется на схеме Клиент-Сервер. Это позволяет подключать множество клиентов к одному серверу. И наоборот - данный стандарт позволяет использовать одним клиентом несколько OPC-серверов (Рисунок 3-3)

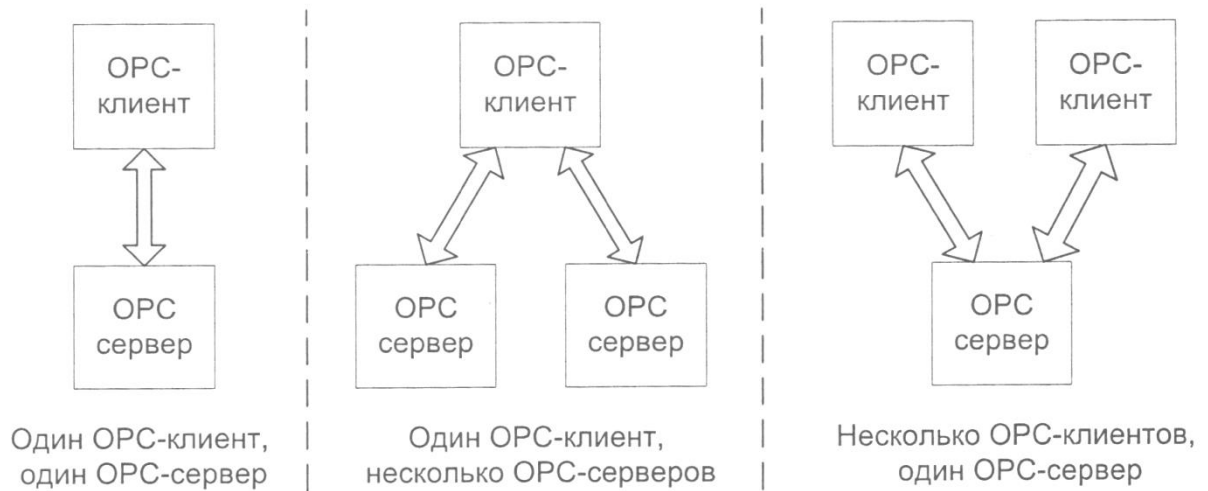


Рисунок 3- 3

**Примечание.** OPC сервер может получать данные не только от приборов по промышленным протоколам. Через интерфейс OPC можно передавать практически любые данные - реализовать обмен между программами (например, между SCADA и MES), получать данные из базы данных, выполняя SQL-запрос, опрашивать ключи реестра и т.д.

### Стандарты OPC

- ◆ OPC — набор спецификаций стандартов. Каждый стандарт описывает набор функций определенного назначения. Всю подробную информацию вы можете найти на официальном сайте организации OPCFoundation ([www.opcfoundation.org](http://www.opcfoundation.org)) Различают следующие стандарты: OPCOA (DataAccess) — основной и наиболее востребованный стандарт. Описывает набор функций обмена для получения текущих данных с приборов, ПЛК и других устройств.
- ◆ **OPC HDA (Historical Data Access)** — в то время как OPCDataAccess предоставляет доступ к текущим данным, OPCHistoricalDataAccess предоставляет доступ к уже сохраненным данным (архивам).
- ◆ **OPC AE (Alarms&Events)** — предоставляет функции уведомления по требованию о различных событиях: аварийные ситуации, действия оператора, информационные сообщения и другие.
- ◆ **OPC Batch** — предоставляет функции шагового и рецептурного управления технологическим процессом.
- ◆ **OPC DX (Data exchange)** — предоставляет функции организации обмена данными между OPC-серверами через сеть Ethernet. Основное назначение — создание шлюзов для обмена данными между устройствами и программами разных производителей.
- ◆ **OPC Security** — определяет функции организации прав доступа клиентов к данным системы управления через OPC-сервер.
- ◆ **OPC XML DA (XML-Data Access)** — предоставляет гибкий, управляемый правилами формат обмена данными через SOAP и HTTP.

- ◆ **OPC UA (Unified Architecture)** — последняя по времени выпуска спецификация, которая основана не на технологии MicrosoftDCOM, что предоставляет кросс-платформенную совместимость.

На данный момент наиболее распространены стандарты **OPC DA** (версии 2.05), и **OPC HDA** (версии 1.20). Оба стандарта поддерживаются в MasterSCADA - как в качестве клиента, так и в качестве сервера. Серверный функционал, как и клиентский OPC HDA - являются опциональными и поддерживаются дополнительными модулями.

Версия стандарта OPCDA 3.0 не поддерживается, так как она содержит функционально избыточные расширения и по этой причине, а также из-за неполной совместимости с версией 2, не получила распространения в промышленности.

Стандарт **OPC AE** используется редко, так как не предназначен для работы с оборудованием, и в основном рассчитан на передачу подробной информации о событиях из одной программы верхнего уровня в другую. В MasterSCADA состав и структура сообщений соответствует этому стандарту, однако клиент и сервер не были реализованы из-за отсутствия спроса на них. При необходимости они могут быть добавлены в состав системы.

В связи с тем, что перечисленные распространенные стандарты основаны на технологии Microsoft DCOM, реально эффективно работающей только под Windows, был разработан кросс-платформенный стандарт нового поколения - OPC UA, базирующийся на XML. Внедрение этого перспективного стандарта происходит медленно из-за общей консервативности отрасли и необходимости обеспечить взаимодействие с прежними поколениями программных средств. Его поддержка в MasterSCADA будет добавлена, как только станут использоваться OPC-серверы этого стандарта.

#### OPCDA

Это самая распространенная версия стандарта OPC. OPC DA предназначен для взаимодействия с нижним уровнем систем в реальном времени.

OPC-сервер представляет собой отдельную программу, которая ведет обмен с источниками или приемниками данных по заданному для них протоколу. При получении данных драйвер, по созданному разработчиком OPC-сервера алгоритму, анализирует полученное значение на достоверность. Для того чтобы передать OPC-клиенту результат анализа, в стандарте предусмотрено специальное поле - признак качества. Признак качества представляет собой число из набора стандартных значений.

Производитель OPC сервера может поддержать не все значения признака качества, а только некоторые из них.

Полученный признак качества пользователь SCADA системы может использовать для реализации алгоритмов обработки ошибок - например, для выдачи сообщений оператору.

В MasterSCADA есть средства автоматической обработки признаков качества для формирования сообщений, средства извлечения признаков качества для пользовательской обработки (специальный *ФБ Признаки качества* и специальная функция для формул в *расчетах* и *событиях*), средства формирования признаков качества (для целей оформления результатов пользовательского анализа информации о достоверности переменных), а также правила передачи признаков качества

в цепочке обработки данных. Перечень признаков качества и причины их возникновения описаны в таблице:

Признак	Код	Значение	Описание
Opс_quality_bad	0	Значение не достоверно	Значение не достоверно (признак качества - плохой).
Opс_quality_config_error	4	Ошибка конфигурации	Алгоритм имеет проблемы с конфигурацией, например, не все связи или настройки заданы.
Opс_quality_not_connected	8	Нет соединения	Алгоритм имеет проблемы со связью, например, у входа алгоритма оборвана связь с выходом алгоритма-источника данных.
Opс_quality_device_failure	2 <sup>1</sup>	Ошибка устройства	Предписанные алгоритмом операции нельзя выполнить (например, деление на ноль или переполнение порядка).
Opс_quality_sensor_failure	6 <sup>1</sup>	Ошибка датчика	Хотя бы одна входная переменная не удовлетворяет условиям, накладываемым на входные переменные алгоритмом, или хотя бы одна входная переменная пришла с любым из плохих признаков качества.
Opс_quality_last_known	0 <sup>2</sup>	Известно последнее значение	Сбой связи. Последнее опрошенное значение доступно. Время опроса имеется в отметке времени, сопровождающей значение.
Opс_quality_comm_failure	4 <sup>2</sup>	Нет связи	Связи с источником данных для какого-либо из входов нет. Последнее опрошенное значение не существует. Или OPC-сервер еще не запущен.
Opс_quality_out_of_service	8 <sup>2</sup>	Не обслуживается	При существующих настройках алгоритма данный выход не формируется.
Opс_quality_uncertain	4 <sup>6</sup>	Значение не определено	Значение не определено.
Opс_quality_good	92 <sup>1</sup>	Норма	Признак качества - норма.

К полученному значению, помимо признака качества, OPC-сервер добавляет еще одно поле - метку времени. Метка времени может быть получена по сети от контроллера, либо OPC-сервер при получении данных устанавливает в качестве метки текущее время. Привязанная метка времени позволяет при представлении или обработке данных уменьшить расхождение используемого

или отображаемого времени с реальным временем измерения. Кроме того, если OPC-клиентов несколько, то они одни и те же данные получают с одинаковой меткой времени.

### Получение данных через протокол Modbus

Создадим проект с реальным прибором, работающим по протоколу Modbus RTU, например, с прибором ОВЕН МДВВ (модуль дискретного ввода-вывода).

Запустим **«MasterOPC Universal Modbus Server»**.

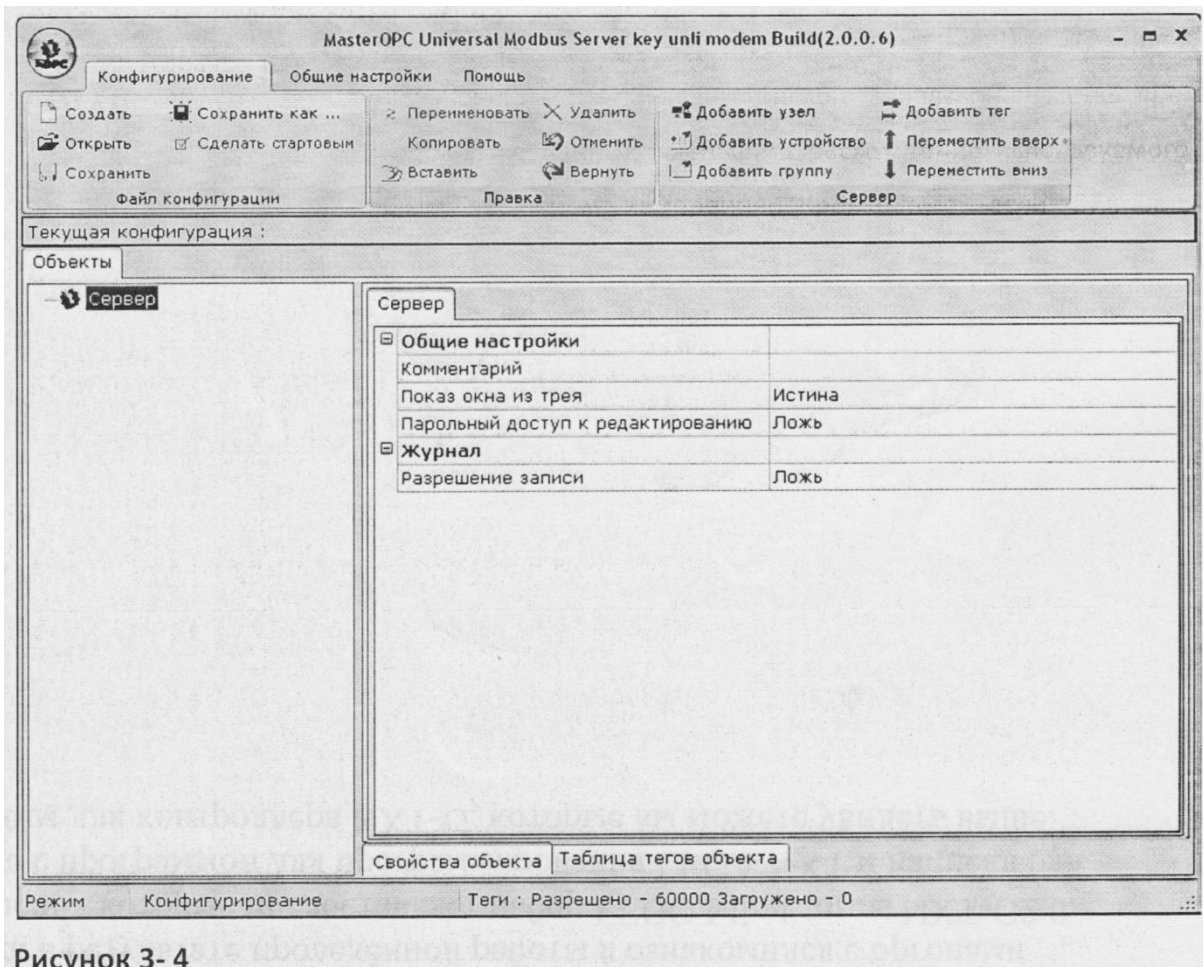


Рисунок 3- 4

Добавим узел в конфигурацию сервера через контекстное меню Сервер. В окне **Редактирование коммуникационного узла** зададим имя узла, установим тип узла - COM, параметры связи с устройствами - номер COM-порта, скорость, четность, стоповые биты.

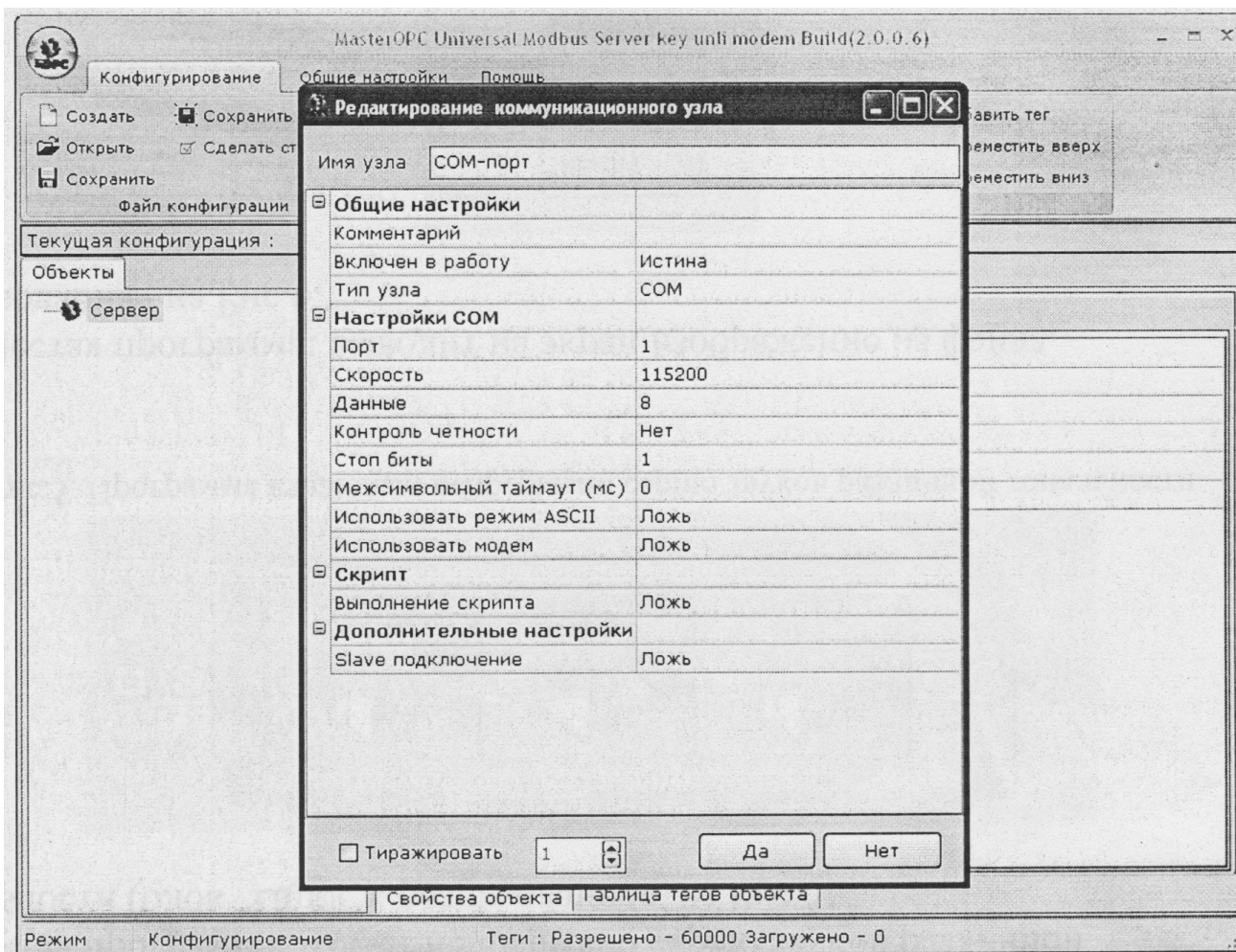


Рис. 3.5

В узел, также через контекстное меню, добавим Устройство - зададим ему имя и адрес.

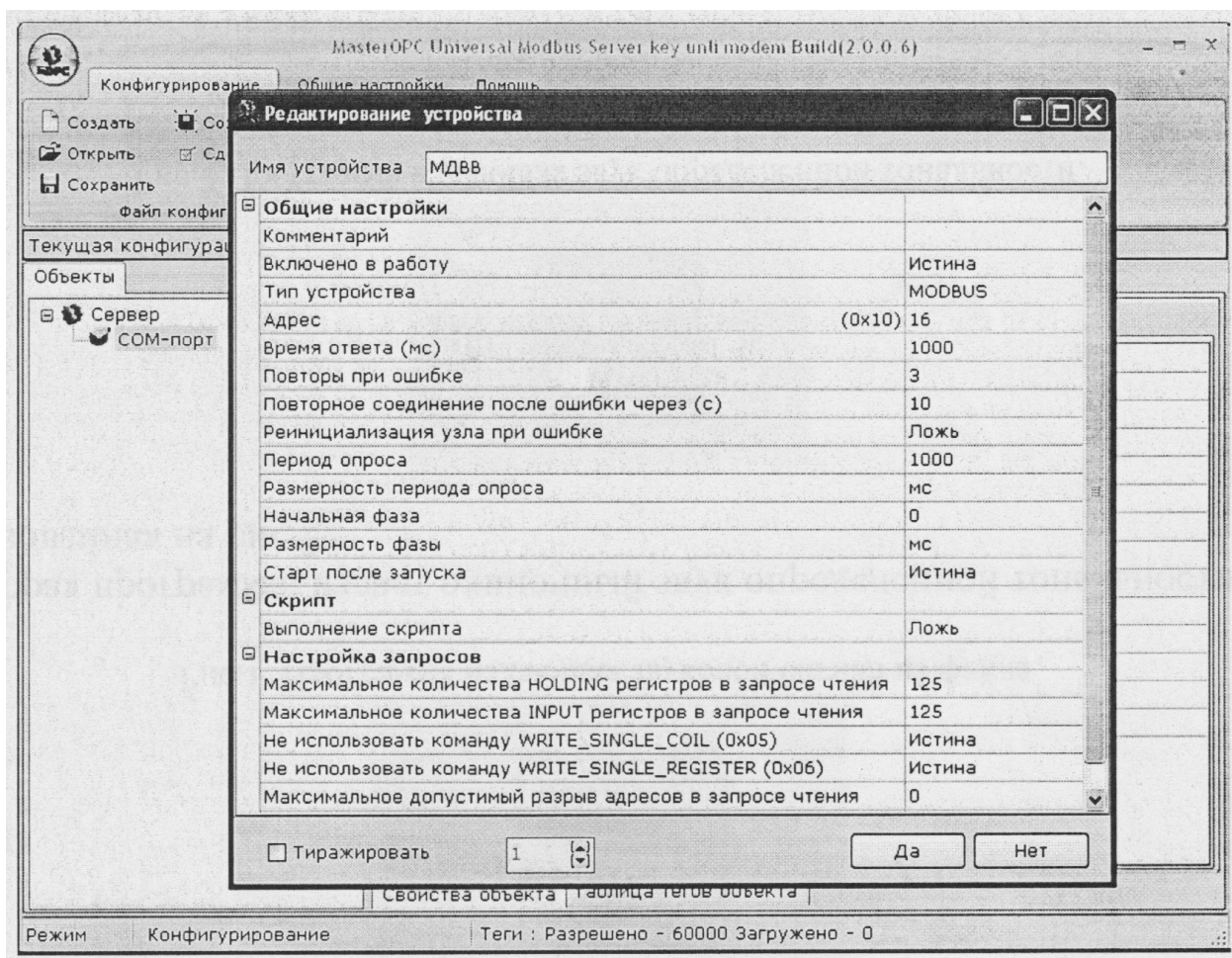


Рис. 3.6

Теперь в устройство необходимо добавить переменные, и указать им номера регистров в приборе. Для примера будем опрашивать вход и выход прибора. MDVB имеет 12 входов и 8 выходов, входы могут опрашиваться по маске или в режиме счетчика. Входы в режиме счетчика имеют номера регистров от 64 до 75 в десятичной системе исчисления и имеют тип HoldingRegisters. Из этих регистров можно производить считывание накопленного значения, а также записывать значение - для сброса. Таким образом, регистры используются для чтения и записи.

Добавим первый вход в наш OPC. Для этого вызовем контекстное меню устройства и выберем пункт **«Добавить тег»**.

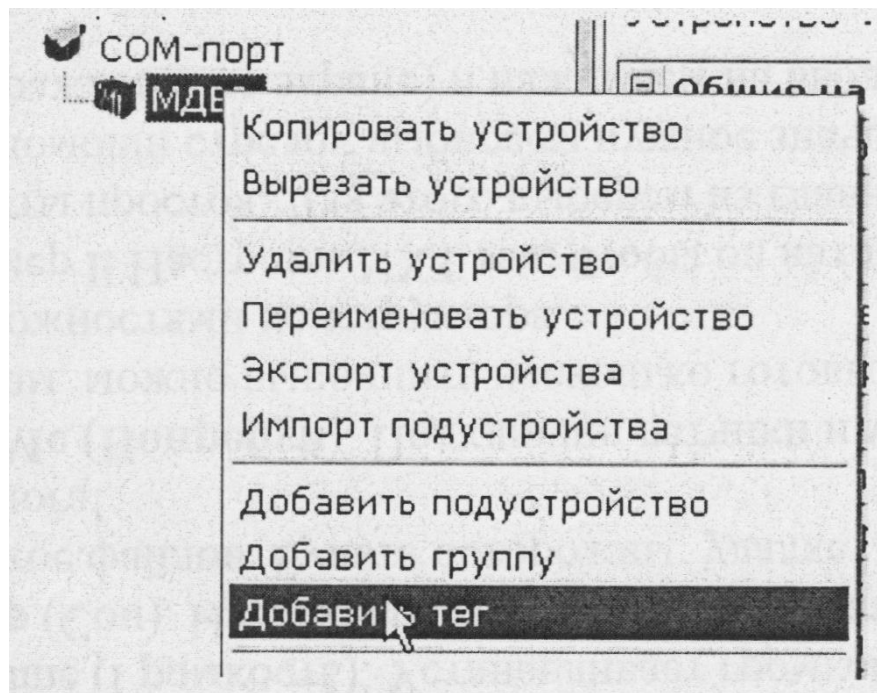


Рис. 3.7

В появившемся окне **Редактирование тега** зададим имя тега - **«Вход1»**, регион **«HoldingRegisters»**, номер регистра **«64»**, тип в устройстве - беззнаковое целое **«uint16»**

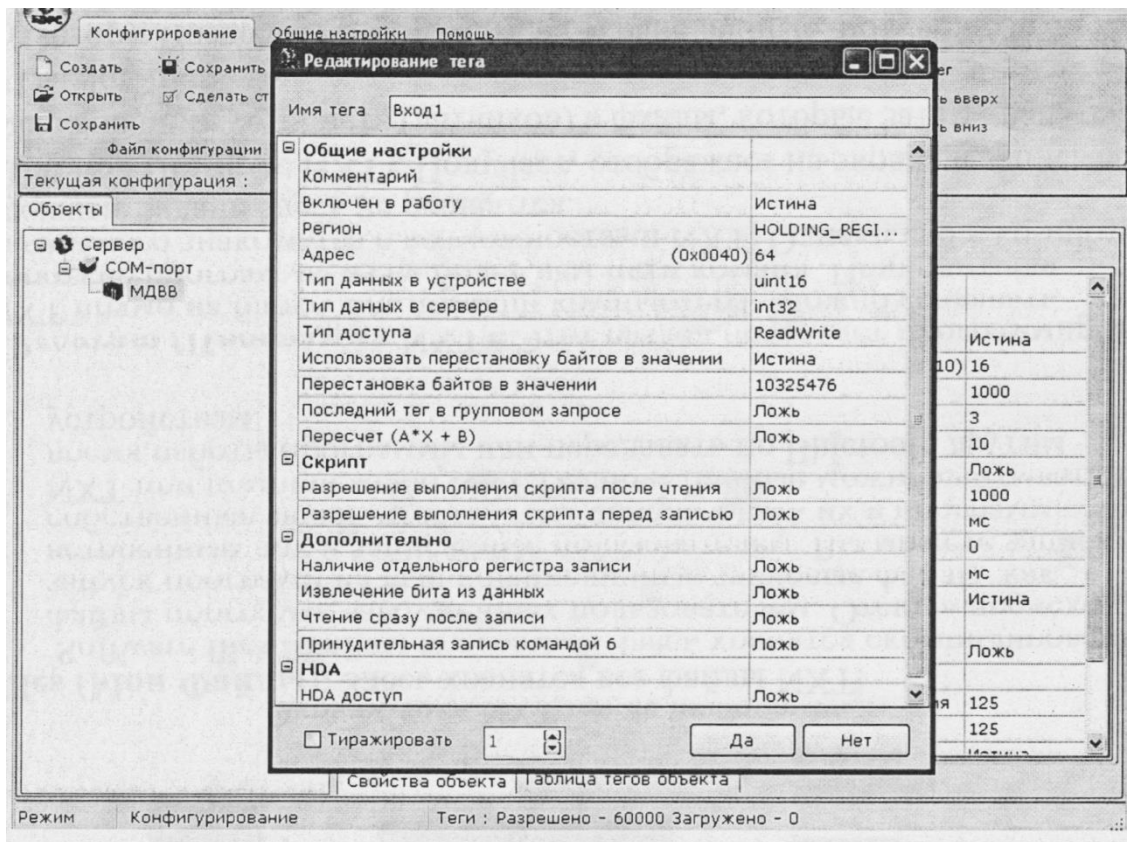


Рис. 3.8

Сохраним конфигурацию и сделаем ее конфигурацией по умолчанию.

Запустим MasterSCADA, произведем поиск OPC устройств, добавим OPC и все OPC переменные:

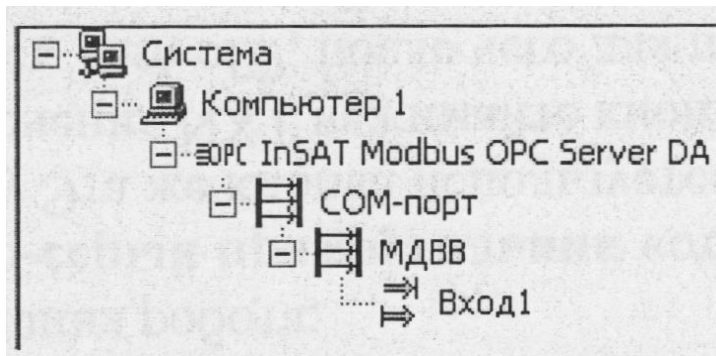


Рис. 3.9

«**Вход1**» добавился в дерево системы. Обратите внимание, что переменная имеет значок двунаправленной, то есть можно осуществлять как чтение переменной, так и запись в нее.

Добавим в дерево объекта, одно значение и команду, команду назовем «**Запись**». Установим связь между переменной OPC и «**Значение**».

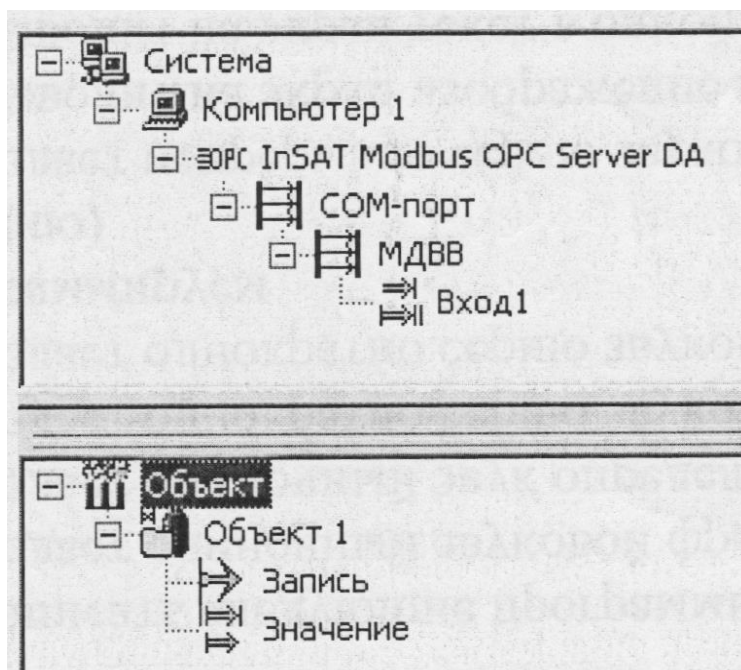


Рис. 3.10

Значок OPC переменной изменился - он отображает, что выход переменной имеет связь. Установим связь между OPC переменной и командой «**Запись**».

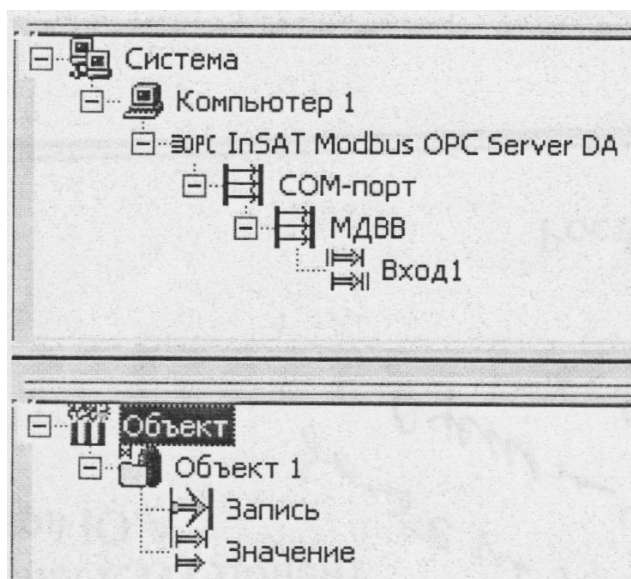


Рис. 3.11

Значок изменился, теперь он показывает, что вход и выход переменной имеют установленные связи.

Подробнее про настройку **MasterOPC Universal Modbus Server** вы можете узнать, посмотрев видеопримеры по созданию конфигураций:

<http://www.masteropc.ru/prices/info.php?pid=6944>

### Подключение приборов через MasterPLC

Кроме создания проекта SCADA системы MasterSCADA позволяет программировать контроллеры с открытой архитектурой (SoftPLC). В этом случае проект SCADA и ПЛК создается в единой среде программирования как единый проект автоматизации. Рассмотрим преимущества такого подхода к разработке.

Например, нам необходимо создать проект автоматизации, состоящий из ПЛК и SCADA- системы. Сначала рассмотрим вариант создания проекта с контроллерами закрытой архитектуры - они программируются в собственных средах разработки. В этом случае создание проекта будет состоять из следующих этапов:

1. Создание программы для контроллера, и его отладка в среде программирования контроллера.
2. Создание карты адресов параметров (например, Modbus) в контроллере для обмена с верхним уровнем.
3. Настройка OPC-сервера - прописывание карты адресов для обмена с нижним уровнем.
4. Создание проекта SCADA-системы и его отладка.
5. Установление связей между проектом SCADA и переменными OPC-сервера.
6. Отладка всего проекта.

В процессе создания придется переключаться между 3 различными программами (среда программирования ПЛК, конфигуратор OPC-сервера, SCADA-система) и вручную создавать карту адресов обмена (в которых нередко можно запутаться).

В последнее время в промышленности широко используются так называемые распределенные системы управления: когда управление осуществляют несколько небольших ПЛК, расположенных непосредственно возле объекта - это упрощает монтаж и сокращает количество подводимых проводов.

Рассмотрим создание такого проекта - проекта с несколькими ПЛК с закрытой архитектурой. В этом случае для каждого ПЛК нужно будет написать программу, для каждого создать свою карту адресов, настроить их в OPC, и добавить в проект SCADA - системы. Проект еще больше усложнится, если контроллеры должны вести обмен не только с верхним уровнем, но и друг с другом (без участия компьютера).

В случае использования контроллеров с открытой архитектурой и MasterPLC (среда исполнения проекта в контроллере) проект SCADA и ПЛК создается в единой среде - в MasterSCADA. Чтобы создать проект, необходимо добавить в дерево системы контроллер и назначить ему объект с созданной программой. Создание адресов, реализация обмена с верхним уровнем и межконтроллерного обмена - делается автоматически средой разработки. Таким образом, создание и отладка проекта значительно упрощается.

Контроллеры с открытой архитектурой работают под управлением какой-либо встраиваемой операционной системы. Для использования MasterPLC поддерживаются - DOS, MiniOS 7, Linux, WinCE. На данный момент поддерживаются контроллеры фирм Advantec, ICP DAS, Муха, Овен, Текон (список контроллеров будет пополняться).

### **MasterLink**

MasterLink - это шлюз для опроса устройств, подключенных к компьютеру. Используются только последовательные порты. Данный модуль можно использовать как альтернативу OPC серверам. MasterLink эффективно использовать в крупных проектах - опрос большого количества переменных будет производиться несколько быстрее, чем OPC-сервером. Кроме того, поскольку стоимость MasterLink вычисляется из стоимости базовой версии MSRT, то в малых проектах MasterLink может оказаться дешевле OPC-сервера.

## **2. Создание простейшего проекта**

Темп жизни современного инженера зачастую не позволяет прочесть учебник от корки до корки. Хочется с первых страниц получить всю необходимую информацию, чтобы начать применять полученные знания на практике. Попробуем пошагово разобрать этапы создания нового проекта для решения простейшей и распространенной задачи: контроль уровня жидкости в емкости. Это поможет вам «набить» руку в работе с MasterSCADA и лучше понять ее идеологию.

### **Постановка задачи**

Прежде чем приступить к работе с MasterSCADA, необходимо четко представить себе исходные данные. Итак, постановка задачи: на объекте установлен датчик, рассчитанный на измерение уровня от 0 до 8 метров. В MasterSCADA необходимо получить достоверные данные. В случае нарушения предупредительных или аварийных границ выдать соответствующее сообщение. Значения аварийных границ задаются константами на этапе разработки проекта (ВАГ=95%, НАГ=5%), в отличие от предупредительных границ, которые могут быть изменены оператором в режиме исполнения. Мнемосхема должна отображать текущее значение переменной и инструменты для из-


менения значений предупредительных границ оператором. Оператор должен иметь возможность посмотреть график изменения уровня жидкости во времени и сообщения о нарушениях границ. Значения измерений и сообщения о нарушениях должны храниться не менее полугода.

### Формирование конфигурации OPC-сервера

Для решения поставленной задачи мы будем использовать данные от OPC-сервера «Симулятор» производства компании *ИнСАТ*. Прежде чем приступить к созданию проекта MasterSCADA разработаем конфигурацию OPC-сервера. Вы можете установить ее как с фирменного диска компании *ИнСАТ*, так и скачать дистрибутив с официального сайта компании.

Установите приложение, следуя указаниям инсталлятора. Помните, что для корректной работы OPC-сервера также требуется установить *Microsoft .Net Framework* версии 3.5. Запустите из меню *Пуск Windows* программу *MasterOPC Toolkit*. Откроется OPC-сервер «Симулятор».

В интерфейсе OPC-сервера «Симулятор» добавьте переменную «Синус». Для этого

нажмите на иконку  **Вставить переменные из карты** на панели инструментов. В появившемся диалоговом окне (*Рисунок 4-1*) установите флаг напротив нужной переменной и нажмите кнопку **Выбрать**.

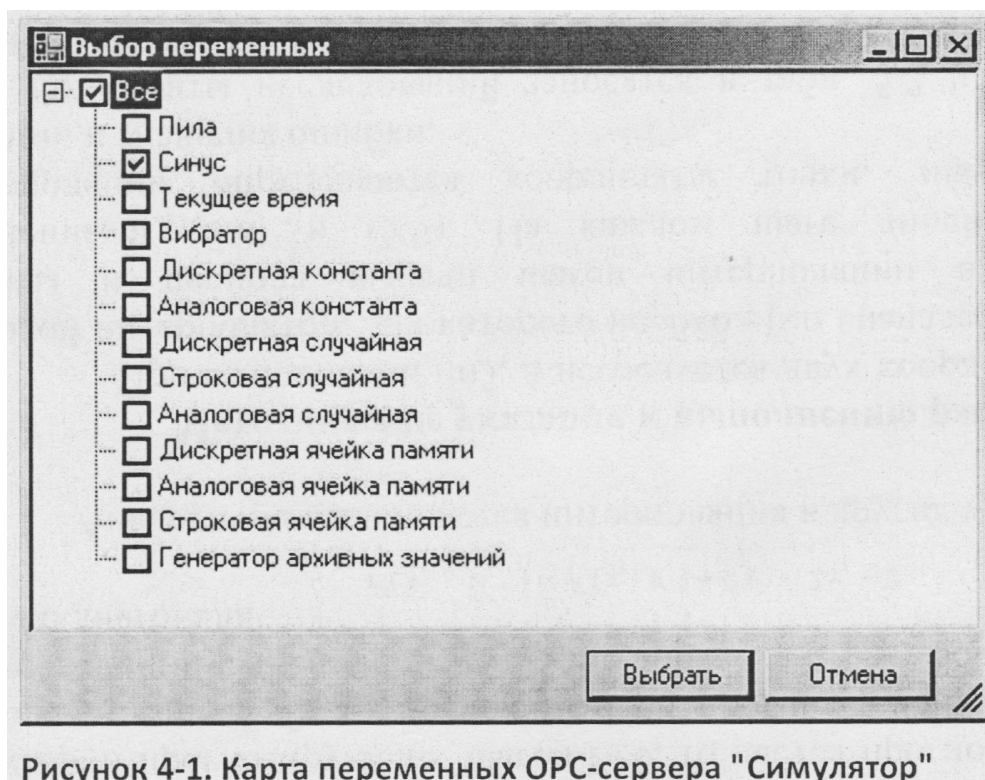


Рисунок 4-1. Карта переменных OPC-сервера "Симулятор"

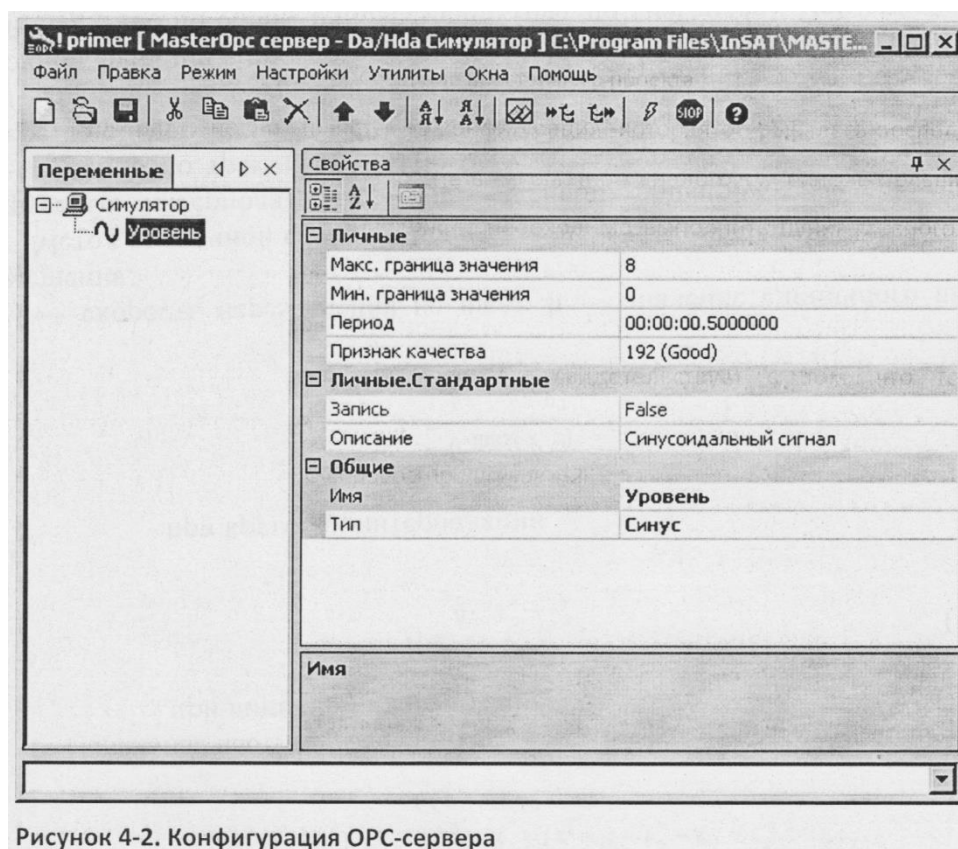
Выделите переменную в дереве и перейдите на закладку *Настройки* (она, по умолчанию, находится в правой части экрана). Установите в поле *Макс, граница значения* значение 8, а в поле *Мин. граница значения* 0. Для удобства можно также изменить название переменной на «Уровень» в поле *Имя*.

Обратите внимание, что OPC-сервер будет изменять значение переменной раз в 500 мс. Эту информацию можно почерпнуть из соответствующего поля *Период*. Оставим эту настройку без изменения и запомним ее текущее значение.

Для решения поставленной задачи этих данных вполне хватит. Сохраните текущую конфигурацию (стандартное диалоговое окно открывается после нажатия иконки *Сохранить*).

Очень часто бывает ситуация, когда инженер ведет разработку сразу нескольких проектов. Каждый проект может работать с одним и тем же типом OPC-сервера, но при этом, как правило, конфигурации будут разными. По стандарту OPC клиент автоматически загружает OPC-сервер, и нужно указать серверу, с какой конфигурацией необходимо начать работу. Для этого выбранной конфигурации необходимо задать признак *Установить по умолчанию*. В разных OPC-серверах этот флаг может быть установлен разным способом. В некоторых серверах основной является та конфигурация, которая открывалась последней. В других OPC-серверах флаг нужно установить в каком-либо диалоговом окне. В большинстве OPC-серверов производства компании **ИнСАТ** необходимо выполнить пункт главного меню **Файл/Установить по умолчанию** (в OPC-серверах последнего поколения - необходимо выполнить пункт меню **Конфигурирование/Сделать стартовым**). В заголовке программы должен появиться восклицательный знак. Он свидетельствует о том, что текущая конфигурация будет запускаться автоматически при старте OPC-сервера.

Проверьте настройки OPC-сервера по Рисунок 4-2.



Теперь можно закрыть программу OPC-сервера. Больше она нам не понадобится.

### Создание нового проекта

Запустите MasterSCADA в режим разработки (DT) и создайте новый проект **«Контроль уровня»** (Рисунок 4-3).

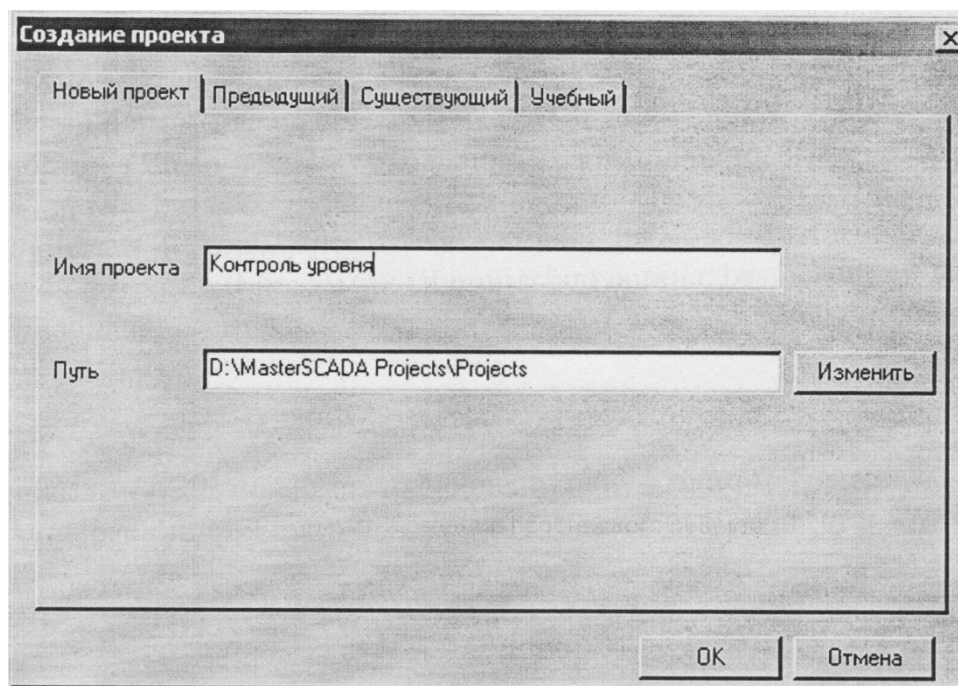


Рис. 4.3. Контроль уровня

Обратите внимание, что проект сохранится по умолчанию в рабочую папку **MasterSCADA Projects\Projects**

#### Базовые настройки проекта

Прежде чем приступим к формированию деревьев MasterSCADA, разберем постановку задачи, и посмотрим, какие настройки необходимо сделать на уровне Системы. Настройки, заданные на страницах свойств элемента Система, будут являться значениями по умолчанию для свойств всех элементов проекта. При необходимости, у каждого конкретного элемента настройки можно будет переопределить.

Мы решаем простейшую задачу, которая на начальном этапе создания проекта требует только настройки страницы свойств Шкалы, где необходимо указать диапазон измерения датчика уровня. Это значительно упростит решение задачи в дальнейшем. Конечно, перед тем как объявить проект готовым на 100%, потребуется еще и обозначить права доступа обслуживающего персонала (например, диспетчеров) в режиме исполнения на странице свойств Операторы. Необходимость выполнять другие настройки на уровне Системы определим в процессе разработки проекта.

Итак, перейдем на страницу свойств Шкалы (Рисунок 4-4).

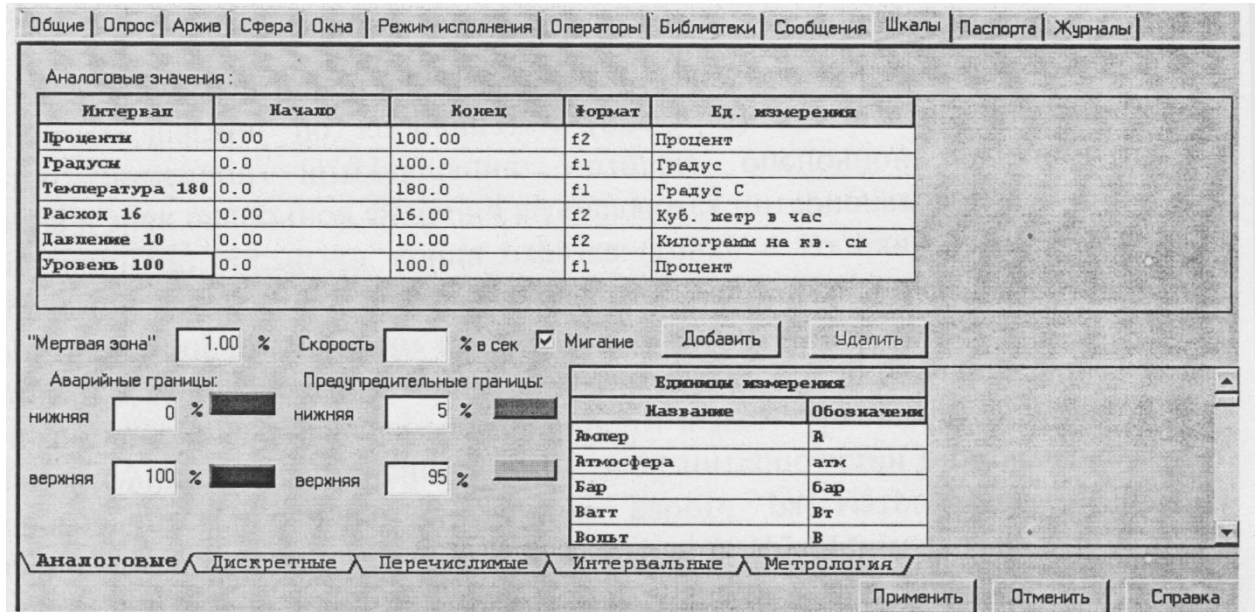


Рисунок 4-4. Страница свойств "Шкалы". Вид по умолчанию.

В списке шкал уже содержится интервал **«Уровень 100»**, но, к сожалению, он не отвечает нашим требованиям. Чтобы добавить новый интервал, необходимо выделить любой уже существующий и нажать на кнопку **Добавить**. Отредактируем появившуюся строку. Если все столбцы таблицы, как правило, не вызывают вопросов, то столбец **Формат** требует разъяснений. MasterSCADA может отображать данные в экспоненциальной форме (обозначается «e») или в форме с фиксированной точкой (обозначается «f»). Цифра после буквы, обозначающей формат, какое количество знаков после запятой будет отображаться в MasterSCADA. Имейте в виду, что при расчётах формул и ФБ используется полный, а не отображаемый формат числа.

В итоге в таблице интервалов, добавится еще одна строка (**Рисунок 4-5**).

Интервал	Начало	Конец	Формат	Ед. измерения
Проценты	0.00	100.00	f 2	Процент
Градусы	0.0	100.0	f1	Градус
Температура 180	0.0	180.0	f1	Градус С
Расход 1С	0.00	16.00	f 2	Куб. метр в час
Давление 10	0.00	10.00	f 2	Килограмм на кв. см
Уровень 100	0.0	100.0	f1	Процент
Уровень	0.0	8	f 2	Метр

Рисунок 4-5. Настройки созданного интервала "Уровень"

На следующем этапе определим аварийные и предупредительные границы. Они задаются индивидуально для каждого интервала. Выделите интервал **«Уровень»** в таблице.

Введите настройки, предназначенные для аварийных границ: в поле ввода **нижняя** введите число 5, а в поле **верхняя** - 95. Поля ввода предупредительных границ оставьте пустыми. В этом случае MasterSCADA автоматически рассчитает значения аварийных границ. Предупредительные границы, согласно нашей задаче, заранее неизвестны и могут определяться в режиме исполнения. Поэтому на данной **странице свойств** они не определяются.

В результате, вид **страницы свойств Шкалы** должен совпадать с **Рисунок 4-6**.

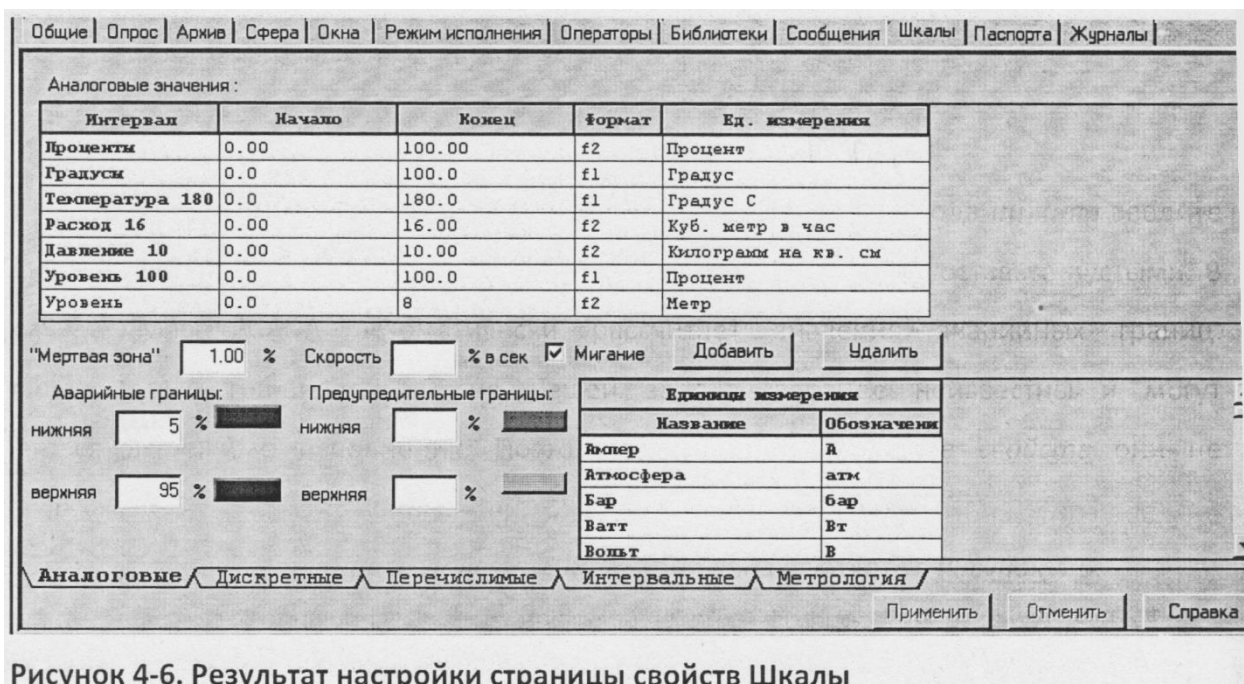


Рисунок 4-6. Результат настройки страницы свойств Шкалы

### Создание дерева Системы

В данном примере рассмотрим подход к разработке проектов, когда сначала создается дерево Системы с источниками сигналов.

Нажмите правую кнопку мыши на элементе Система, выполните пункт Вставить/Компьютер в появившемся контекстном меню. Введем название «АРМ оператора» на странице свойств Общие в поле Имя у нового элемента проекта.

Далее необходимо выполнить пункт контекстного меню «АРМ оператора» Поиск OPC DA серверов. В диалоговом окне установите флаг напротив нужного OPC-сервера (см. Рисунок 4-7).

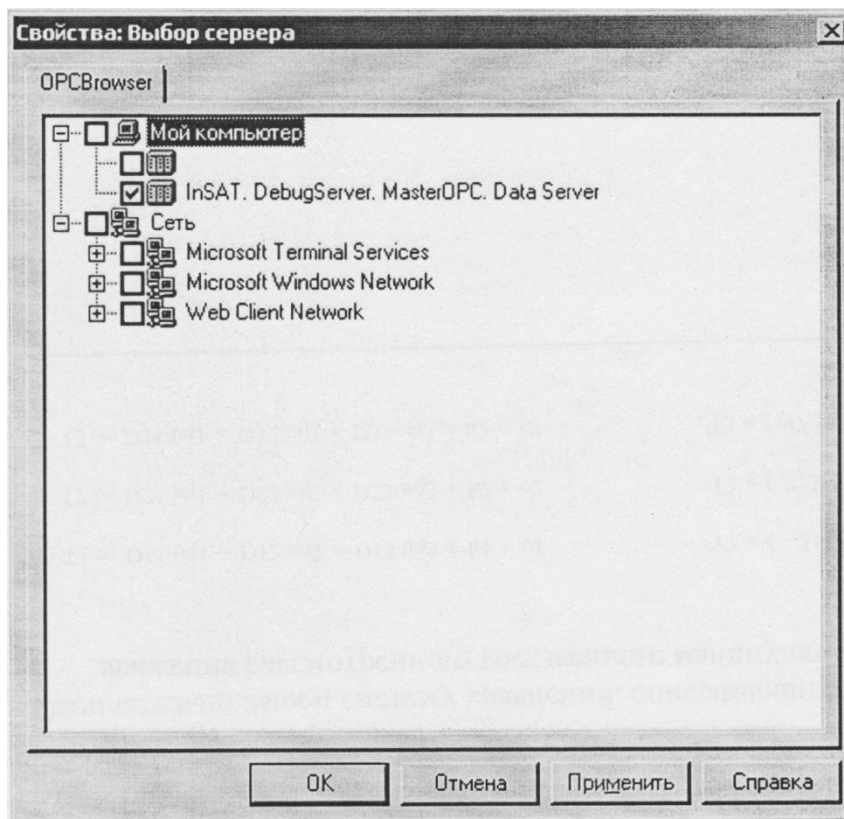


Рис. 4.7. Окно поиска OPC-серверов

После этого в контекстном меню компьютера появится пункт **Вставить OPC DA сервер**. Воспользуемся им.

Повторите уже хорошо знакомое движение правой кнопкой мыши на элементе OPC- сервер и вставьте все переменные и группы. Получим результат, показанный на Рисунок 4-8.

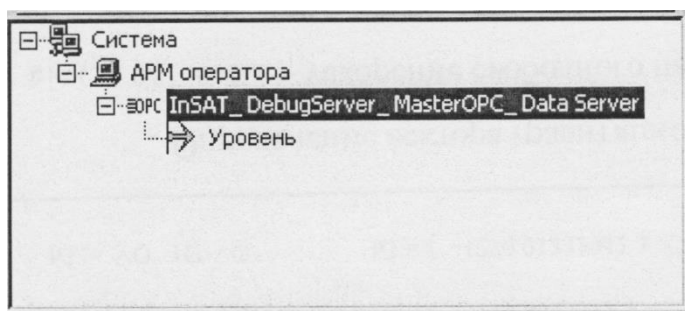


Рис. 4.8. Дерево системы

На этом формирование дерева Системы для нашего проекта закончено.

#### **Создание дерева объектов**

Переключим внимание с дерева Системы на дерево Объектов. Пока оно содержит лишь один элемент - объект верхнего уровня. Условия задачи таковы, что в проекте у нас предусмотрено лишь одно рабочее место оператора. Поэтому на странице свойств Общие, в выпадающем списке поля **Компьютер**, выберем «**АРМ оператора**». Все создаваемые в проекте объекты автоматически будут принадлежать данному компьютеру.

Выполним пункт контекстного меню существующего объекта **Вставить/Объект**. На странице свойств нового элемента проекта **Общие**, в поле **Имя** введите название «**Емкость**». Именно

для этого элемента проекта (объекта) мы будем создавать различные документы: Мнемосхемы, Журналы и Тренды.

Установить связь между переменными *деревьев Системы* и *Объекта* можно различными способами. Самый простой из них перетащить переменную из *дерева Системы* в нужный объект, в этом случае автоматически создастся переменная *Значение*, связь между переменными также будет создана автоматически, настройки в точности наследуются от источника. Этот способ, несомненно, удобен, но он подходит только для проектов, в которых *дерево Системы* создается раньше *дерева Объектов*, параллельная разработка деревьев в этом случае невозможна. Также такой прием будет не самым удобным решением, когда значение переменной, полученной в *дереве Системы*, необходимо преобразовать, перед тем как отображать в документах, например, умножить на какой-либо коэффициент.

Альтернативой будет создание в нашем объекте переменной *Значение*, на которую для установления связи затем (в любой удобный момент впоследствии) перетаскивается необходимая переменная *дерева Системы*. Вместо переменной типа *Значение* можно использовать переменную *Расчет*, чтобы иметь возможность сделать какое-либо преобразование исходных данных.

В нашем простейшем проекте мы вполне можем применить как первый, так и второй варианты, но, воспользуемся третьим, который наиболее типичен при создании реальных проектов. В этом варианте связь между деревьями осуществляется через **ФБ Повторитель**. Может возникнуть вопрос: поскольку **функциональные блоки** учитываются при подсчете

количества связей<sup>11</sup>, то с какой целью переплачивать за лишние **выходы ФБ**, если можно обойтись и стандартными переменными MasterSCADA. В данном случае можно не беспокоиться, **ФБ Повторитель** и **Повторитель по условию** в подсчете количества связей не учитываются. Они были созданы специально для установления связи между деревьями, по сути, их роль та же, что и у промежуточных клеммников, используемых в шкафах автоматики для повышения безопасности, удобства обслуживания, ремонта и модернизации системы.

Итак, в проекте **«Контроль уровня»** мы воспользуемся **ФБ Повторитель** из категории **Обработка сигналов** палитры MasterSCADA.

Вставим **ФБ** в дерево<sup>12</sup>, для этого выберем сначала элемент в палитре, а затем перетащим его в нужное место проекта. Переименуем **ФБ** на **странице свойств Общие**, также возможность переименовать элемент появляется, если кликнуть (с небольшой задержкой отпущения клавиши) по нему в дереве, как это обычно делается и в других Windows-приложениях. Назовем элемент **«Уровень»**.

Установим связь между переменной OPC-сервера и входом элемента **«Уровень»**. Перетащите переменную на указанный вход.

Выделим в дереве выход этого **ФБ**. На **странице свойств Общие** в выпадающем списке **Диапазон изменения** выберем интервал **«Уровень»**, созданный нами в начале этой главы. Перейдем на **страницу свойств Контроль значений**. Поля **ВАГ** и **НАГ** заполнились автоматически.

По условию задачи значения ВПГ и НПГ должен оператор вводить с мнемосхемы. Чтобы обеспечить эту возможность, нужно в проект ввести две аналоговые **Команды**. Выделите объект

«**Ёмкость**» и нажмите ПК мыши. При помощи появившегося контекстного меню вставьте переменную Команда. Убедитесь, что тип созданной переменной аналоговый. На странице свойств **Общие** выберите диапазон изменения «**Уровень**», так же как и для выхода **ФБ**. На странице свойств **Опрос выхода** установите флаг **Восстановление при рестарте**. Эта настройка обеспечит восстановление введенных оператором значений при повторном запуске режима исполнения MasterSCADA.

В контекстном меню переменной команда выполните пункт **Дублировать**. Нам потребуется лишь одна копия. В результате в проекте должны появиться переменные «**Команда**» и «**Команда 1**». Сменим имена этих переменных. Одну назовем «**ВПГ**», а вторую «**НПГ**». В условиях задачи сказано, что оператор вручную определит значения предупредительных границ, но тогда возникает вопрос: при первом старте системы нужно ли учитывать предупредительные границы, или же необходимо дождаться, пока оператор вручную введет какие-либо данные. Наверное, правильнее было бы определить некие значения по умолчанию. Сделать это можно на странице свойств команд **Опрос выхода**, в поле **Значение до опроса**. Установим для «**ВПГ**» значение 7, а для «**НПГ**» значение 1.

Теперь необходимо связать команды с границами переменной «**Выход**», которая принадлежит **ФБ «Уровень»**. Выделим страницу свойств **Контроль значений** выхода **ФБ**. В поле **Верхняя предупредительная граница** перетащим ЛК команду «**ВПГ**», а в поле **Нижняя предупредительная граница** соответственно «**НПГ**» (Рисунок 4.9)

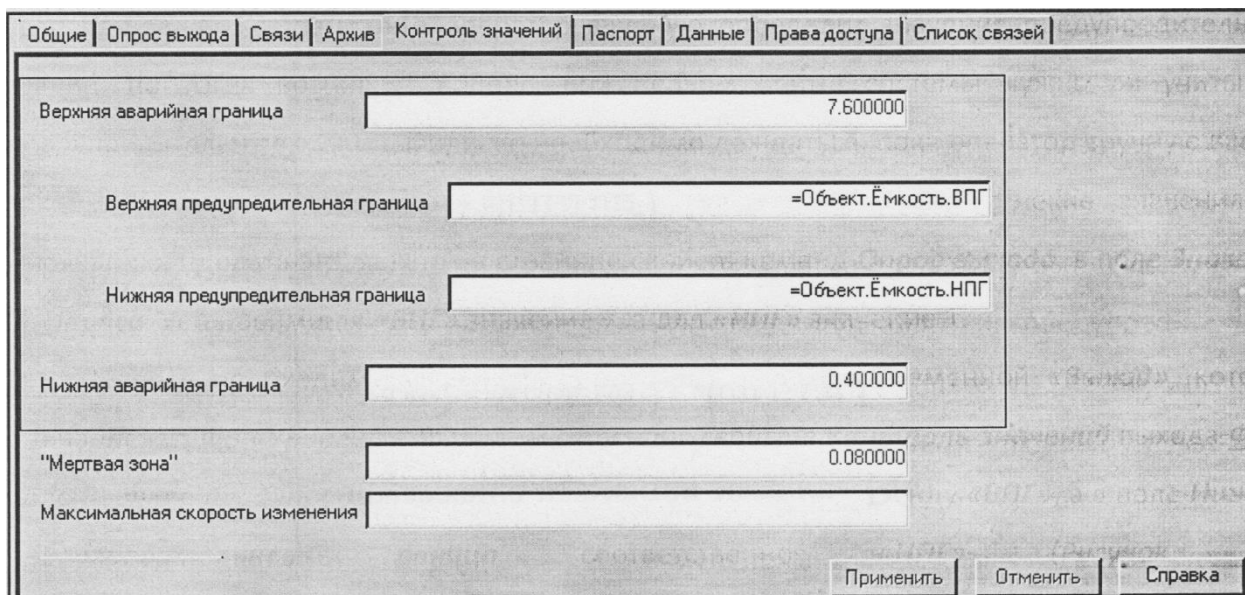


Рис. 4.9. Страница свойств Контроль значений

### Создание журнала сообщений

При нарушении предупредительных и аварийных границ MasterSCADA будет автоматически выдавать сообщения, в первую очередь они будут появляться в специальном **Окне сообщений**. Но данный механизм не предусматривает работу с архивами, поэтому необходимо создать журнал

сообщений. На странице свойств Журналы объекта «Уровень» есть возможность создать три различных журнала (Рисунок 4-10)

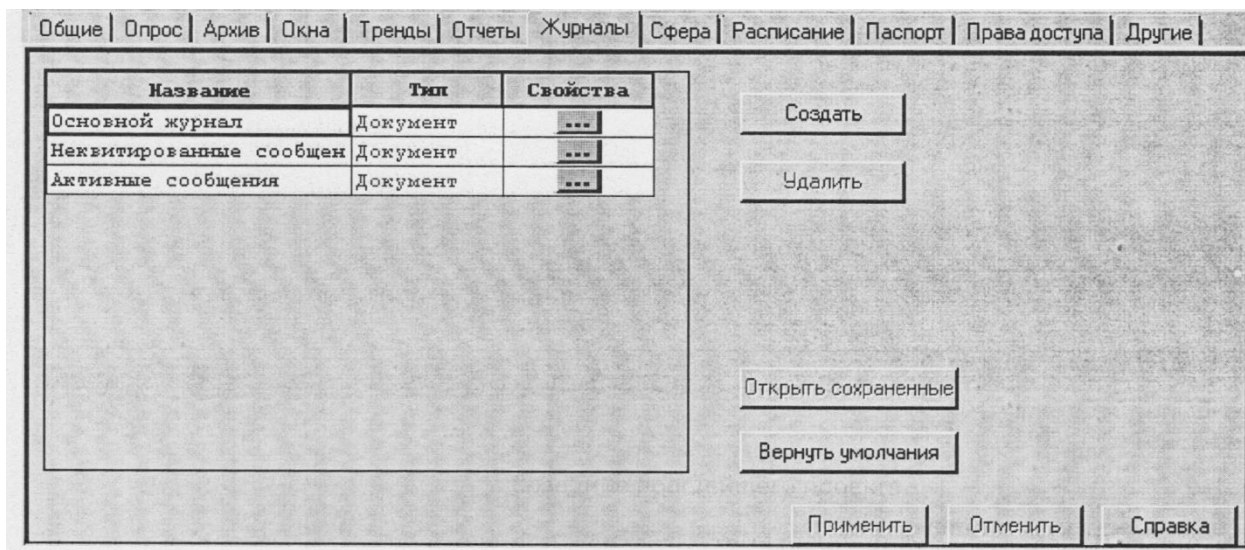


Рис. 4.10. Страница свойств объекта Журналы

Их настройки прописаны на аналогичной странице свойств Системы. В дальнейшем мы подробно разберем этапы создания и редактирования журналов, а пока ознакомимся, какие сообщения каждый журнал будет содержать по умолчанию.

- ◆ **Основной журнал** - все сообщения, которые относятся к текущему объекту, как текущие, так и потерявшие свою актуальность, попавшие в архив.
- ◆ **Неквитированные сообщения** - сообщения, которые требовали квитирования оператором, но оставшиеся без внимания.
- ◆ **Активные сообщения** - сообщения, которые актуальны в настоящий момент. Наиболее полную информацию, полностью удовлетворяющую нашим условиям, дает

**Основной журнал**, создадим его. Для этого выделим его на странице свойств у объекта и нажмем кнопку **Создать**. Вид созданного журнала показан на Рисунок 4-11.

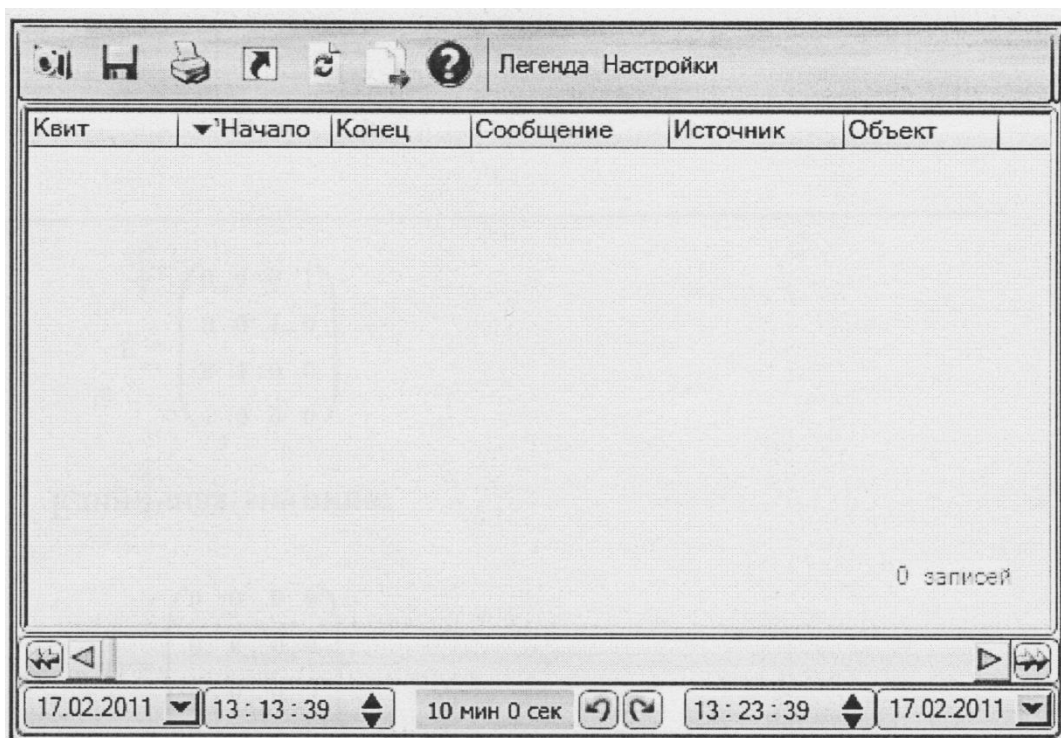


Рисунок 4-11. Вид основного журнала по умолчанию

Этих действий достаточно, чтобы в любой момент времени оператор смог посмотреть сообщения, которые возникали в режиме исполнения. Отредактировать внешний вид, добавить или убрать столбцы журнала можно в любой момент времени после его создания, как в режиме разработки, так и в режиме исполнения (при наличии соответствующих прав доступа у оператора). Как правило, после проведения пусконаладочных работ становится ясно, что является лишним, а чего не хватает. Пока вернемся в основной интерфейс MasterSCADA.

Удобно, чтобы в режиме исполнения журнал открывался как независимое окно. Но странице свойств объекта **Журналы** установите тип **Основного журнала - Окно** (Рисунок 4-12).

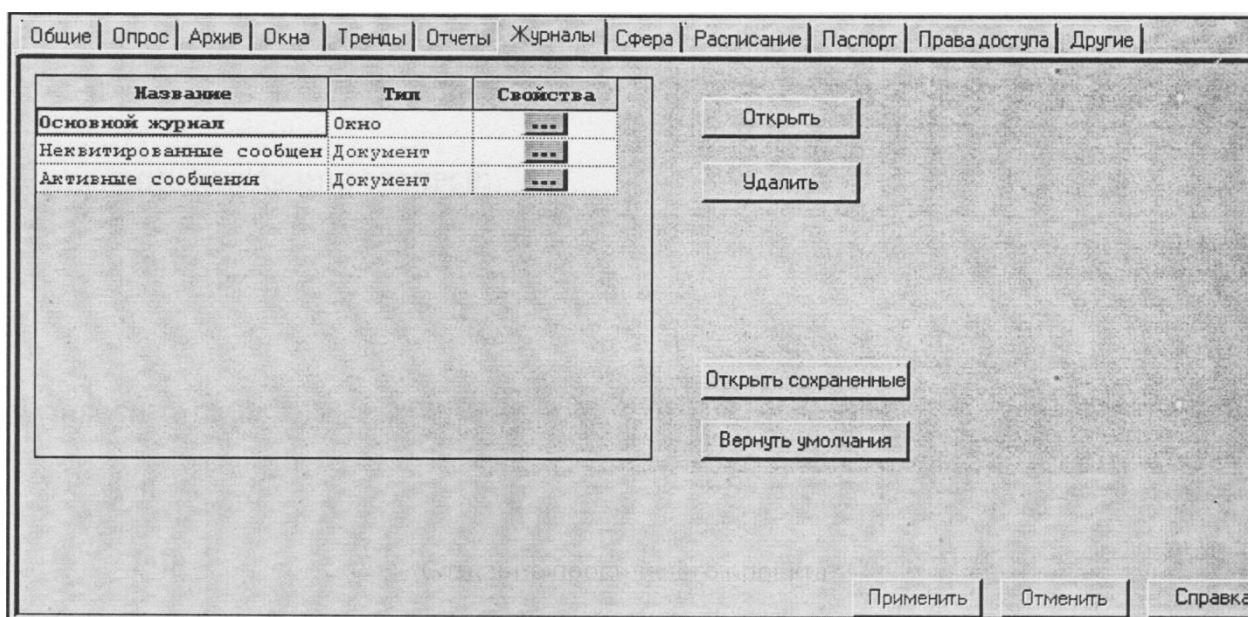


Рис. 4.12. Настройка способа открытия журнала

### Создание тренда

Тренды создаются на одноименной *странице свойств Объекта*.

Нажмем кнопку **Добавить**, в появившемся диалоговом окне введите имя **«Изменение уровня»**. Откроется модуль трендов.

В модуле трендов предусмотрено несколько уровней сложности. По умолчанию открывается **Базовый**. В него включены возможности, достаточные для создания 70 процентов проектов, выполняемых с помощью MasterSCADA. Воспользуемся им и мы.

Обратите внимание на панель инструментов Тренда. Кнопки **Графики, Легенда, Значения, Настройки** определяют внешний вид приложения. Для нашей задачи достаточно отображать только графики. Пусть эта кнопка останется нажатой, так как это было по умолчанию (*Рисунок 4-13*).

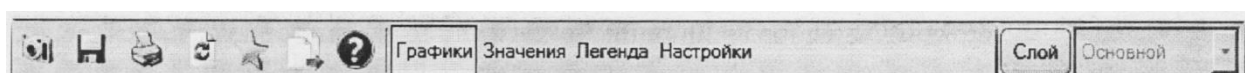



Рисунок 4-13. Панель инструментов модуля трендов.

Добавить параметр на тренд можно несколькими способами, самый простой из них перетащить нужную переменную из дерева объектов в любое место области модуля трендов. Также не

составит труда воспользоваться иконкой  из панели инструментов и в диалоговом окне выбрать нужную переменную или группу переменных. Добавим на тренд переменную **«Выход»** ФБ **«Уровень»**.

Затем нажмите ПК мыши на оси Y, откроется контекстное меню. Выберите пункт **Уставки** и установите флаги напротив всех границ (*Рисунок 4-14*).

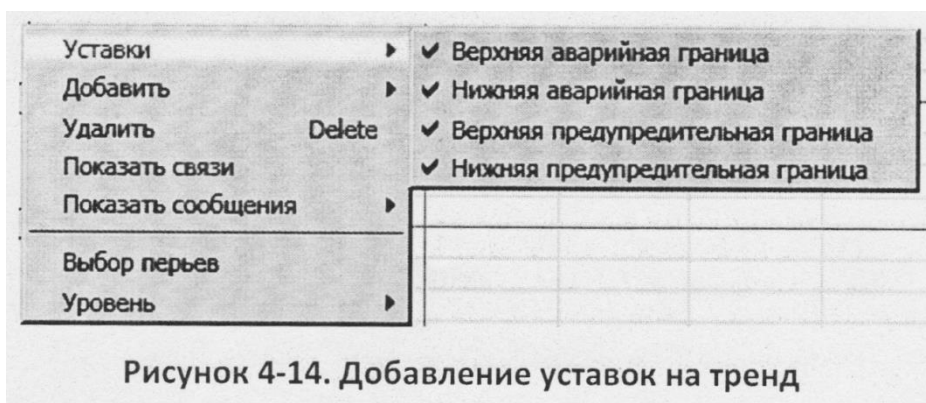



Рисунок 4-14. Добавление уставок на тренд

Можно вернуться к менеджеру проектов MasterSCADA. Нажмите иконку , на вопрос о сохранении документа ответьте утвердительно.

Как и журнал, тренд будем открывать в режиме исполнения как независимое окно. На *странице свойств Тренды* установите тип **Окно** для документа **«Изменение уровня»**.

Обратите внимание, что у переменных проекта **«Выход»**, **«ВПГ»** и **«НПГ»** на *странице свойств Архив, флаг Архивировать* установился автоматически. Это означает, что значения переменных будут записываться в архив MasterSCADA.

### Настройки системы архивирования

Рассмотренные нами документы: журнал и тренд, предоставляют возможность обращаться к архивным данным и сообщениям, накопленным MasterSCADA в процессе работы в режиме исполнения. Чтобы они отображали наиболее полную информацию необходимо настроить параметры архивирования данных и сообщений. Базовая версия MasterSCADA для хранения архивов использует файловую систему Windows. У каждого *объекта* MasterSCADA ведется свой архив. И настройки можно делать индивидуально для каждого из объектов, хотя обычно их делают групповым образом. Если ваш проект содержит несколько однотипных *объектов*, в которых архивируется одинаковое количество параметров, то тогда имеет смысл задать параметры архивирования на уровне *Системы*, на *странице свойств Архив*. В противном случае, лучше воспользоваться одноименной *страницей свойств* у каждого из *объектов*. Помните, что в архив попадают значения только тех переменных, у которых активирован флаг **Архивировать** на соответствующей *странице свойств*.

Перейдите на *страницу свойств Архив объекта «Ёмкость»*. На листе **Данные** определяется, сколько времени и где будут храниться значения переменных. В выпадающем списке **Место хранения** должен быть выбран пункт **Файловый архив** (работа с архивом, который хранится в SQL-совместимой базе данных, выходит за рамки задачи конкретного примера, и не требуется для простых проектов, поэтому мы разберем ее в дальнейшем).

Необходимо настроить ограничения. Срок хранения, по условиям нашей задачи, должен быть не менее полугода, что составляет 183 дня. Установим это значение в поле **Длительность**<sup>13</sup>. Для корректной работы файлового архива необходимо также настроить ограничение **Объем на объект**. Если информации в архиве накопится больше, чем указано в данном поле, то более ранние значения будут удаляться, независимо от того выполнено ли условие **Длительность**. Заранее предугадать размер архива невозможно, так как данные в него записываются по изменению. Однако можно рассчитать максимальный размер архива: известно, чтобы сохранить значение переменной один раз потребуется 38 байт. При работе с OPC DA сервером переменная не может попадать в архив чаще установленного периода опроса объекта. Рассчитать, какое количество тактов укладывается в требуемый срок хранения, и умножить это значение на 38 не сложно, а в результате мы получим максимально возможный объем архива для одной переменной. На *странице свойств объекта Опрос* установлен **Период опроса** 1 с. Если переменная будет изменяться каждую секунду, то, чтобы ее сохранить в течение полугода, необходимо выделить 573 Мб. У нас в проекте требуют архивирования три переменные, соответственно нужно выделить на объект 1720 Мб (*Рисунок 4-15*).

Но такой метод хранения используют крайне редко, только если есть необходимость детального анализа хода технологического процесса за длительный промежуток времени. Как правило, ограничение **Объем на объект** вычисляют экспериментально: смотрят во время пусконаладочных работ

- ✚ Если в дальнейшем при просмотре графиков, вы обнаружите, что переменная показывается за больший период времени, не думайте, что настройка не работает, просто «устаревшие» данные удаляются блоками (их размер настраивается). Возможно, что данные в тот период накапливались медленно, поэтому, пока в блоке

одновременно есть «старые» и «новые» (то есть, входящие в заданный диапазон хранения) данные, он удаляться не будет.

насколько увеличился архив каждого из *объектов*, и затем рассчитывают нужный объем.

Зачастую сохранять каждое изменение переменной не нужно, и чтобы уменьшить размер архива вводят значение мертвой зоны: если переменная изменилась на величину меньшую, чем указано в поле **Мертвая зона**, на *странице свойств Архив* у переменной, то это изменение в не запомнится.

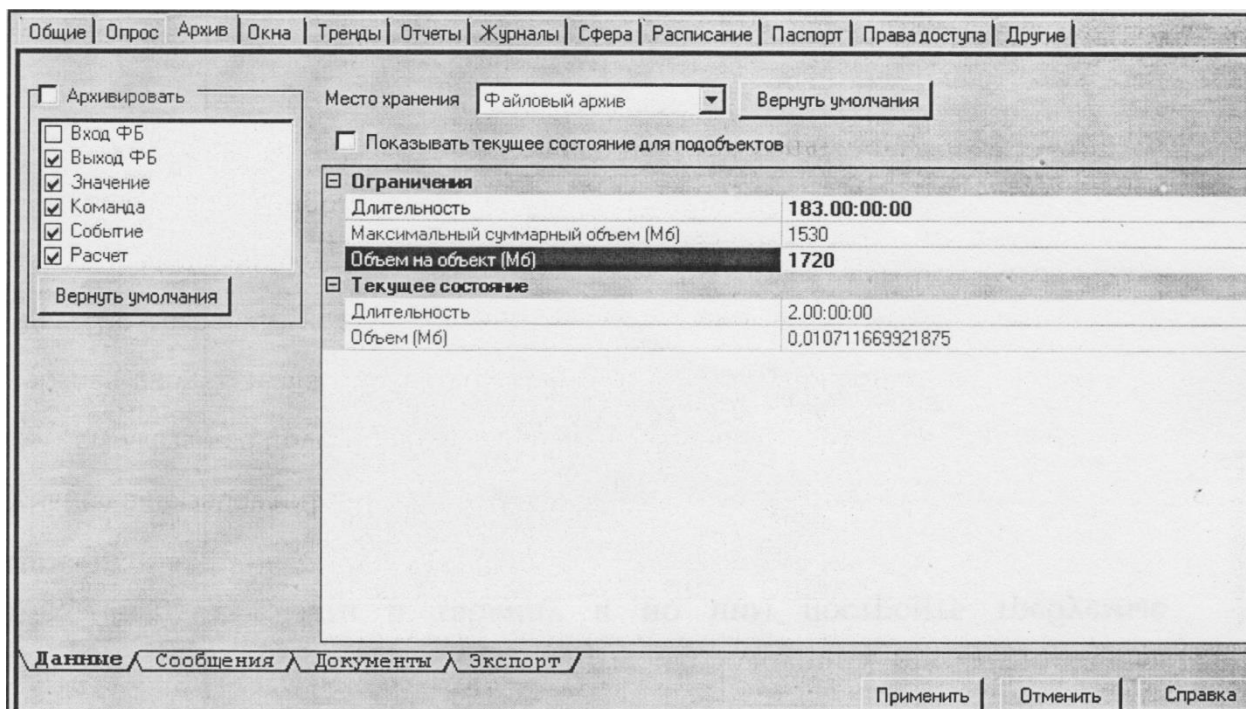


Рисунок 4-15. Архивирование данных

Аналогично, на листе **Сообщения** *страницы свойств Архив* у объекта вычисляется объем, требуемый для хранения сообщений. По умолчанию все возникающие в проекте сообщения будут попадать в архив. Для архивирования одного стандартного («системного») сообщения нужно около 80 байт. Если вы создаете собственные сообщения при помощи инструментов MasterSCADA, то тогда объем может сильно варьироваться, в зависимости от количества символов в сообщении, и определить его можно только экспериментально. Мы еще коснемся этого вопроса в дальнейшем.

### Создание Мнемосхемы

Разработка деревьев наиболее важный этап в создании проектов. Получить достоверные данные, обработать и сохранить их - основные задачи SCADA-пакета. Но о качестве проделанной работы зачастую судят по пользовательскому интерфейсу, созданному разработчиком.

Графические окна в MasterSCADA создаются для какого-либо объекта. Перейдите на страницу свойств **Окна** элемента **«Емкость»**. В верхней части страницы свойств показаны документы, которые можно создать для текущего объекта в графическом редакторе. Выделим в списке документ **Мнемосхема** и нажмем кнопку **Создать**.<sup>14</sup> Интерфейс MasterSCADA изменился.

### Свойства мнемосхемы

Приступаем к созданию мнемосхемы. В первую очередь стоит обратить внимание на размер рабочей области. Изначально мнемосхема имеет тот размер, который указан на странице свойств Системы Окна. Если проект подразумевает несколько мнемосхем с одинаковыми размерами, то целесообразно задать размер на уровне Системы. В панели **Свойства** графического редактора вы можете его переопределить.

Как правило, размер мнемосхемы зависит от разрешения экрана монитора оператора (а не разработчика), на котором она будет отображаться в режиме реального времени, также учитывается, останется ли доступна и закреплена панель задач Windows (с кнопкой Пуск)<sup>15</sup> и стандартная панель инструментов MasterSCADA (занимает полосу в 25 пикселей). Если размер мнемосхемы будет больше разрешения экрана, то появятся линейки прокрутки по горизонтали и вертикали. Это значительно усложнит работу оператора, так как он потеряет постоянный контроль над всей рабочей областью.

- ✚ Важно! Старайтесь правильно выбирать размер мнемосхемы на самом начальном этапе разработки.
- ✚ Первое открытие редактора мнемосхем в DT может занять несколько секунд (это замечание относится к любым редакторам MasterSCADA - при первом открытии их документа с диска загружается и запускается программа редактора, в дальнейшем она уже развернута в памяти).
- ✚ Скрыть панель можно стандартными настройками ОС. Настройки, сделанные в MasterSCADA, на данный элемент интерфейса Windows не влияют.

На страницах свойств Режим исполнения, принадлежащих Системе или Компьютеру, мы не изменяли вид приложения MasterSCADA после старта, а это значит, что в режиме исполнения будет загружаться стартовая мнемосхема, а также панель инструментов. Учтем это при определении размера рабочей области.

Перейдите на панель **Свойства**. Она находится в нижнем правом углу окна программы, и показывает свойства выделенного элемента на мнемосхеме, а когда ни один из элементов не выделен, она отображает свойства рабочей области. Также панель со свойствами мнемосхемы можно вызвать, выполнив пункт главного меню Сервис/ Свойства мнемосхемы. Введите значения разрешения вашего монитора (в нашем примере мы его используем и как монитор оператора), в поля, отвечающие за размер. Помните, что размер задается в пикселях. Рекомендуемый размер - 1680x1050 или более.

Обратите внимание на свойство **Включить сетку**. Установите для него значение **Истина**. На рабочей области появится сетка (вероятно, она уже знакома вам по другим средствам графического проектирования), которая помогает создавать, распределять и выравнивать элементы по рабочей области. Задайте удобный для вас шаг в соответствующих полях. В режиме исполнения сетка не отображается.

За правильно выбранный фон мнемосхемы операторы скажут вам спасибо - ведь от него в значительной степени зависит комфорт их работы.

**Важно! Яркие цвета фона мнемосхемы резко увеличивают утомляемость оператора и снижают его внимание.**

В MasterSCADA в качестве фона можно использовать заполнение цветом, либо назначить фоновый рисунок. Возможно, для части пользователей будет удобным такое решение - все статические элементы, например, воздухопроводы, трубопроводы, неподвижные агрегаты рисуются в каком-либо ином графическом редакторе, которым вы владеете, а динамическая часть делается уже при помощи MasterSCADA. В настоящий момент перед нами стоит простая задача, поэтому обойдемся без фоновых рисунков. Установите понравившейся цвет в поле **Цвет фона**.

Результат настройки свойств мнемосхемы можно увидеть на Рисунок 4-16.

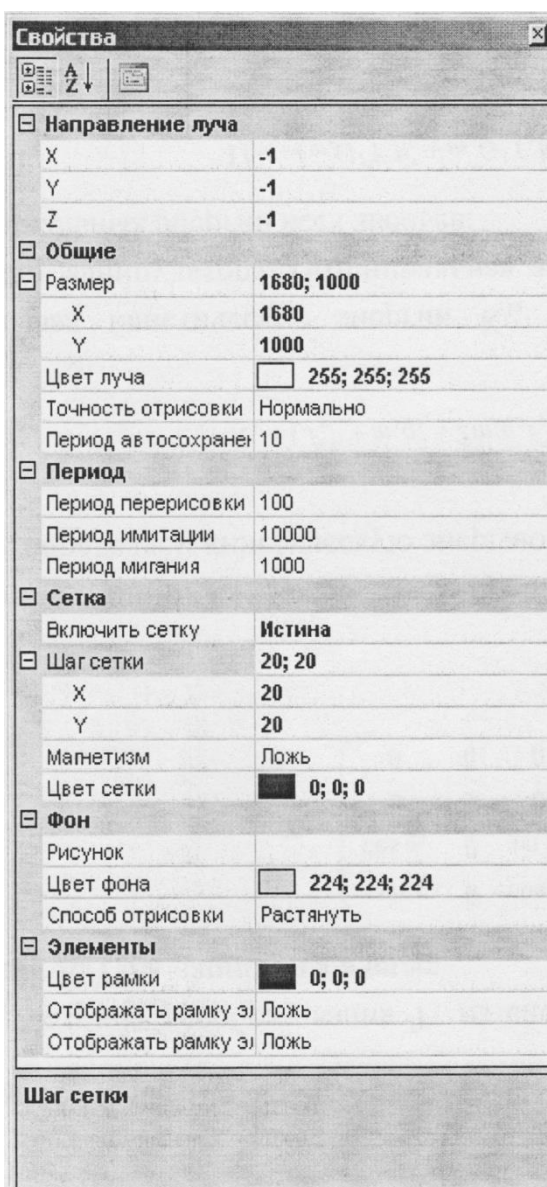


Рис. 4.16. Свойства мнемосхемы


### Создание элементов мнемосхемы

Прежде всего, установим заголовок мнемосхемы. Для этого в панели *Палитра*, которая нашла свое место рядом с панелью *Свойств*, в категории *Графические примитивы* выберем эле-

мент *Текст* и разместим в верхней части рабочей области. При выделенном элементе на мнемосхеме перейдем на панель *Свойства*. В поле *Текст* введите "*Контроль уровня емкости*" и увеличьте до 48 pt размер текста. При желании измените цвета в соответствующих полях панели *Свойства*. Также настройки данного элемента можно установить в диалоговом окне, которое открывается при помощи соответствующего пункта контекстного меню. После того как сделаны необходимые настройки, растяните элемент на мнемосхеме при помощи рамки. Перетащите его в нужное место мнемосхемы.

Роль емкости будет исполнять **Цилиндр** из категории палитры **Объемные элементы**. Вставьте его на мнемосхему. Выполните пункт контекстного меню **Свойства**. В диалоговом окне перейдите на закладку **Окончания**. В группе свойств **Начало** установите стиль **Срез**. При желании измените цвета цилиндра и его заливки на закладках **Материал** (свойство **Цвет основы**) и **Заливка** соответственно.

Для отображения уровня в режиме исполнения задействуем свойство **Процент заливки**. Необходимо связать значение этого параметра с переменной из дерева объектов. Для этого используем возможности динамизации MasterSCADA.

Выделите цилиндр на мнемосхеме и перейдите на панель **Свойства**. Нажмите на иконку Динамизация входных значений  Вид панели свойств изменится (Рисунок 4-17).

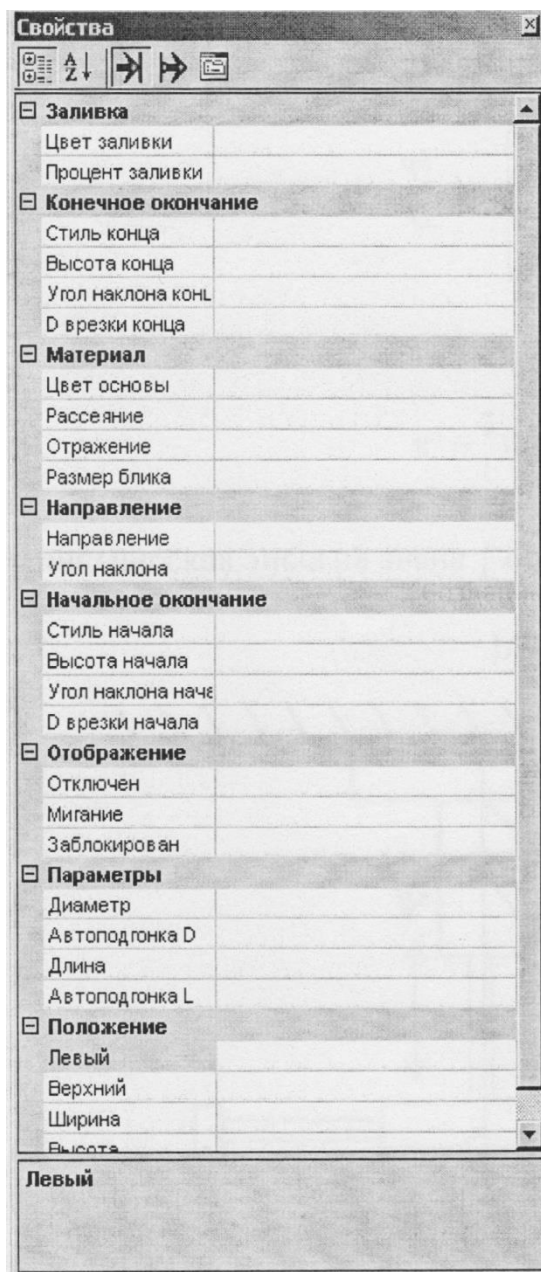



Рис. 4.17. Панель Свойства в режиме динамизации входных значений

Выделите свойство **Процент заливки** и перетащите в него ЛК мыши переменную **«Выход» функционального блока «Уровень»**. Нажмите на кнопку  в строке редактируемого свойства. Откроется диалоговое окно **Настройка динамизации свойства**, в котором необходимо задать зависимость между значением свойства и значением переменной из дерева. Пусть, когда переменная примет минимальное значение, т.е. 0, процент заливки будет равен 0%, а когда достигнет максимума в 8 метров, то и цилиндр будет заполнен полностью, т.е. на 100%. Диалоговое окно примет вид, показанный на Рисунок 4-18. На самом деле, в ситуации, когда мы не меняем соответствие минимумов и максимумов шкалы переменной и свойства, то после перетаскивания никаких дополнительных настроек делать не требуется, но мы рассматриваем этот момент так, как если бы вы захотели изменить это соответствие.

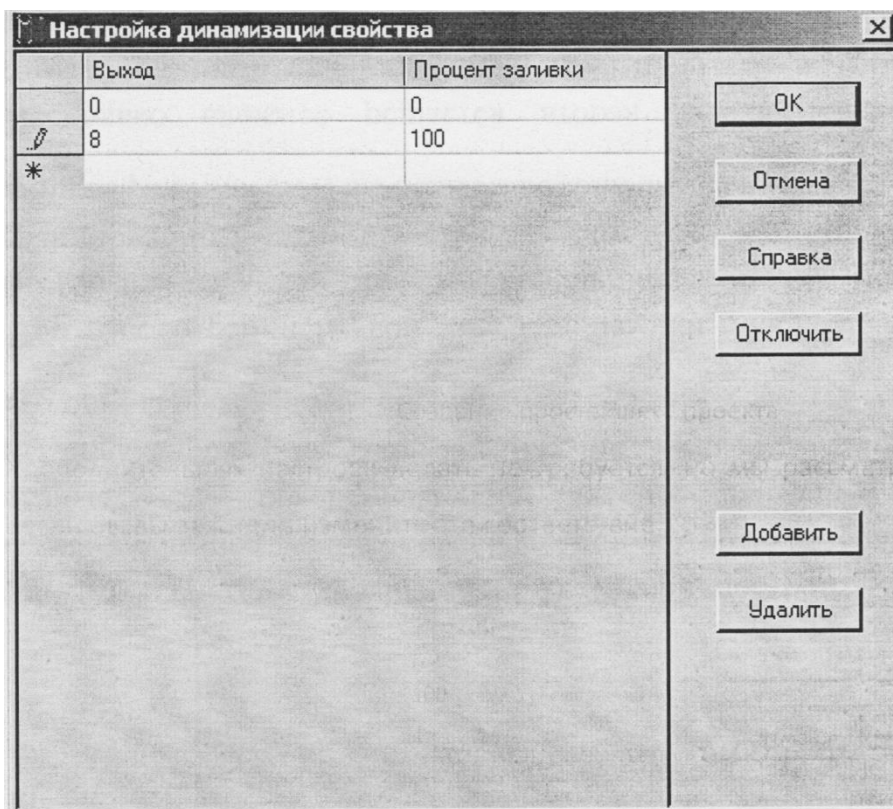


Рис. 4.18. Настройка динамизации свойства

Убедитесь, что для свойства **Процент заливки** критерий **Линейное преобразование** установлен в состояние **Истина** (это значение уже установлено по умолчанию). Это позволит значению свойства изменяться плавно, а не дискретно (Рисунок 4-19).

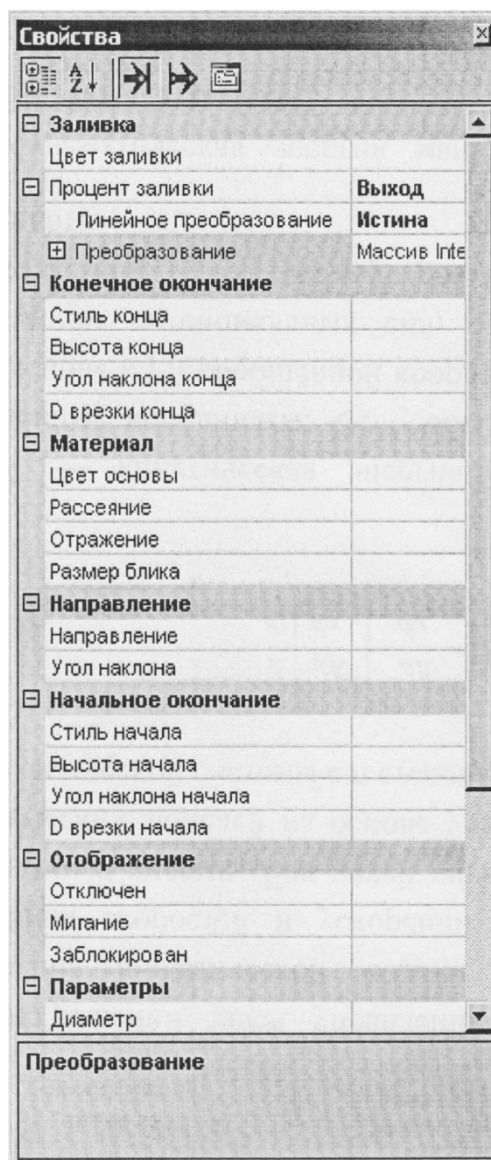


Рис. 4.19. Линейное преобразование

В задаче сказано, что оператор должен определять значения ВПГ и НПГ, для этого в дерево объектов мы ввели соответствующие команды. Перетащите их по очереди ЛК мыши на мнемосхему, расположите в удобном, на ваш взгляд месте. Наверное, логично предположить, что элементы должны иметь одинаковый внешний вид, и скорее всего разработчик захочет настроить отображение этих элементов по своему вкусу.

Чтобы отредактировать одновременно свойства нескольких однотипных элементов (или разных, но обладающих одинаковыми свойствами, требующими редактирования) необходимо выделить их все на мнемосхеме. Сделать это можно либо кликая по ним мышью (удерживая клавишу **SHIFT** или **CTRL** на клавиатуре), либо растягивая ЛК мыши область выделения. После того как элементы выделены, перейдем на панель **Свойства** и изменим нужные поля, например, так, как показано на Рисунок 4-20.

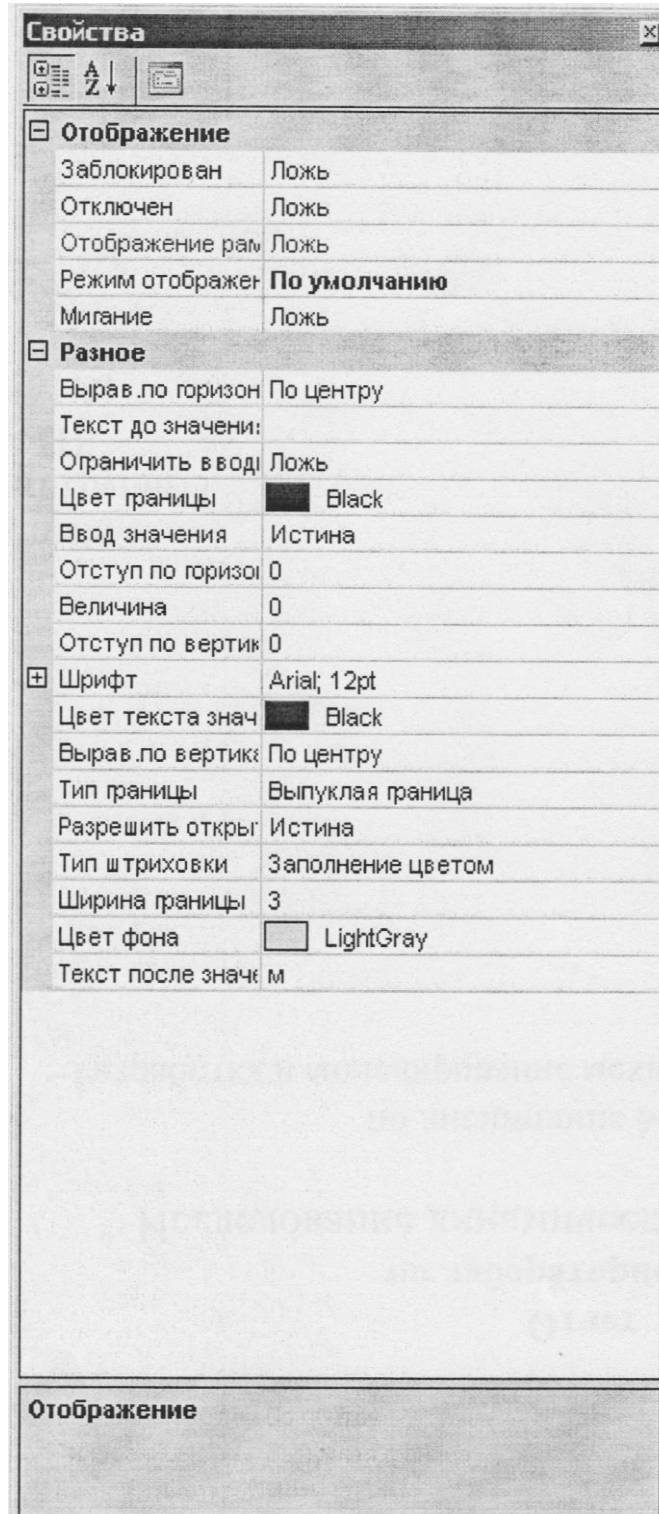


Рис. 4.20. Групповое редактирование свойств

Можно также перетащить на мнемосхему выход ФБ **«Уровень»**, чтобы оператор мог точно определить текущее значение уровня.

Теперь в режиме исполнения оператор будет видеть значения всех переменных, и сможет изменить значение уставок.

Создадим кнопки перехода к тренду и журналу. Перетащим объект **«Емкость»** на мнемосхему ПК мыши. При этом появится список, который содержит в себе документы, которые были

созданы для данного объекта. Выберем тренд **«Изменение уровня»**. Повторим операцию, только в списке укажем документ **Основной журнал**.

Отредактируйте внешний вид элементов при помощи диалогового окна **Свойства** (вызывается контекстным меню элементов), либо воспользуйтесь одноименной панелью графического редактора. Например, измените свойство **Подпись**.

Получим результат примерно такой, что показан на Рисунок 4-21.



Рис. 4.21. Пример мнемосхемы проекта

Сохраните и закройте мнемосхему.

На странице свойств объекта **Окна** выделите документ **Мнемосхема** в таблице и установите флаг **Стартовая мнемосхема компьютера**. В этом случае при старте одного из режимов исполнения (кроме **Отладки**) созданная мнемосхема будет загружаться автоматически.

#### Права доступа операторов.

Оператор в режиме исполнения может выполнять различные действия предусмотренные разработчиком проекта: задавать значения, просматривать документы объектов, сохранять, формировать отчеты и многое другое, но всегда нужно, разрабатывая систему, задавать себе вопрос: «Каждый ли оператор, работающий в режиме исполнения должен иметь полный набор прав доступа?»

В MasterSCADA имеется гибкая система настройки прав доступа. Возможности оператора определяются его должностью. В режиме разработки на страницах свойств системы **Операторы**

необходимо определить список должностей, а затем для каждой настроить права доступа. Устанавливая или убирая флаг напротив того или иного действия вы тем самым разрешаете или запрещаете это действие операторам, которые будут работать в настраиваемой должности. Например, сотрудник, работающий в должности **Оператор**, права **Отключить режим исполнения** может не иметь, в отличие от его коллеги **Начальника смены**. Очень важно, чтобы каждое действие оператора фиксировалось в *журнале действий*, не забывайте проставлять также флаги в соответствующем столбце напротив разрешенного действия.

Итак, на странице свойств *Системы Операторы* перейдем на лист *Должности*, где создадим новую позицию «**Помощник оператора**». Для этого нажмем кнопку **Добавить**, появится новая строка. Отредактируем столбец **Должность**, и снимем галочку **Посменно**. Это будет означать, что сотрудники смогут заходить в систему в любой момент времени (*Рисунок 4-22*).

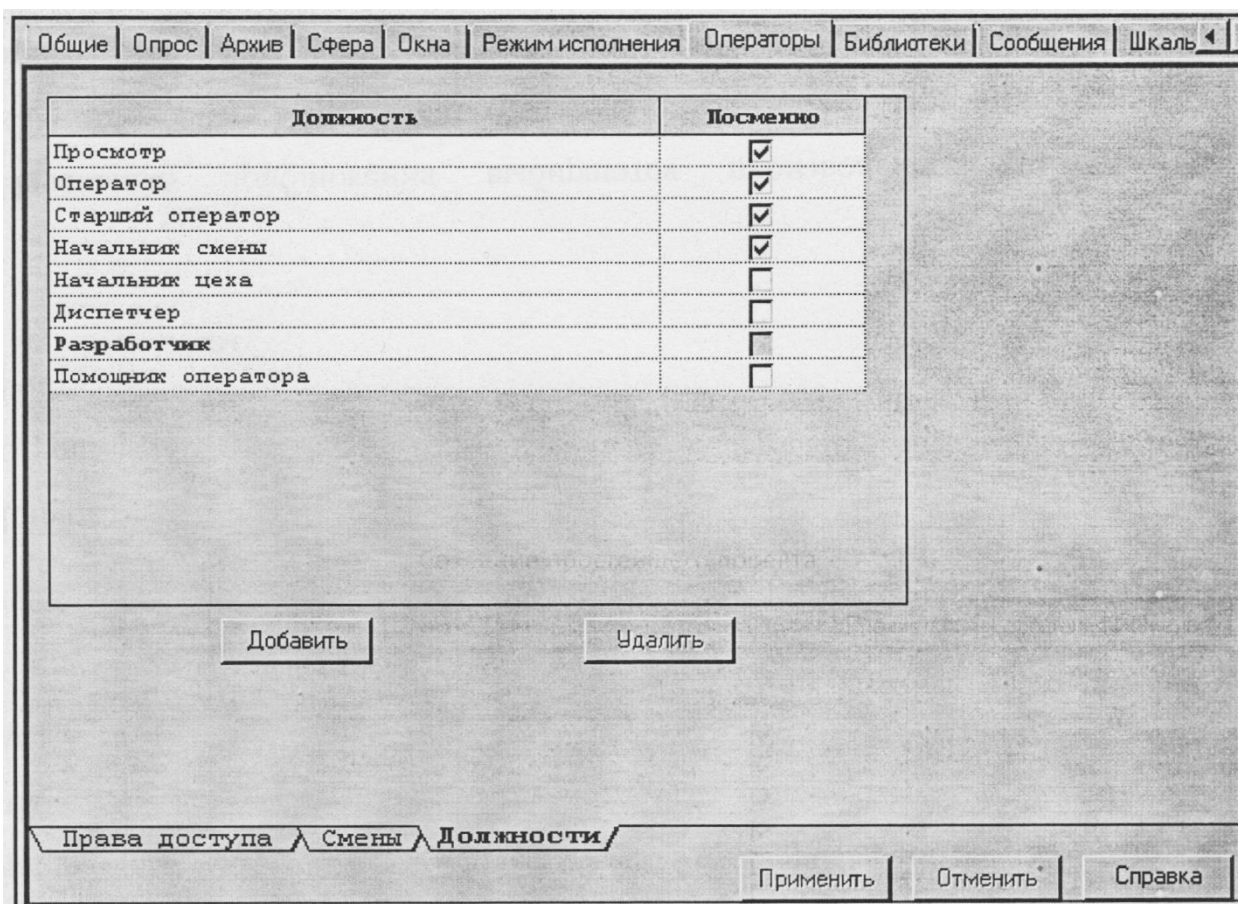


Рисунок 4-22. Создание новой должности.

Перейдем на лист **Права доступа**. В выпадающем списке выберите созданную вами должность. Теперь необходимо заполнить таблицу прав доступа для этой позиции.

В таблице перечислены все возможные действия, которые может выполнять оператор проекта. Против действия выставляются флаги. Столбец **Лок.** указывает, что действие разрешено выполнять только для объектов, исполняемых на текущем компьютере (то есть локально), а **Глоб.** (глобально) - и для объектов других компьютеров. Галочка, проставленные в столбце **Журнал**, позволит зафиксировать указанное действие в журнале действий операторов, а отметка в столбце

**Подтверждение** вызовет диалог подтверждения перед выполнением действия, что совершенно необходимо для любой ответственной команды (*Рисунок 4-23*).

Категория	Действие	Лок.	Глоб.	Журнал	Подтве
Проект	Включить режим исполнения	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Отключить режим исполнения	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Навигация в дереве системы	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Навигация по объектам	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Перейти к проекту	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Минимизировать окно проект	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Экспортировать архив	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Открыть журнал действий	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Изменение списка операторо	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	Доступ через Internet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Окно управления системой	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Журнал неактивных соо	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Экспортировать проект	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Импортировать проект	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Рисунок 4-23. Права доступа оператора

Когда создается новая должность, то по умолчанию она обладает полными правами. Для безопасности работы в режиме исполнения необходимо эти права ограничить.

Перейдем на страницу свойств Компьютера **Операторы**. Выделим в таблице должность «**Помощник оператора**» и нажмем кнопку **Добавить**. Появится сотрудник с учетной записью «**Оператор 1**», отредактируйте ее. Выделите ячейку и напишите нужное имя, а затем нажмите кнопку **Сменить пароль**, в диалоговом окне задайте тайную комбинацию символов. Если поля останутся пустыми, то вход в систему будет возможен любому желающему. (*Рисунок 4-24*).

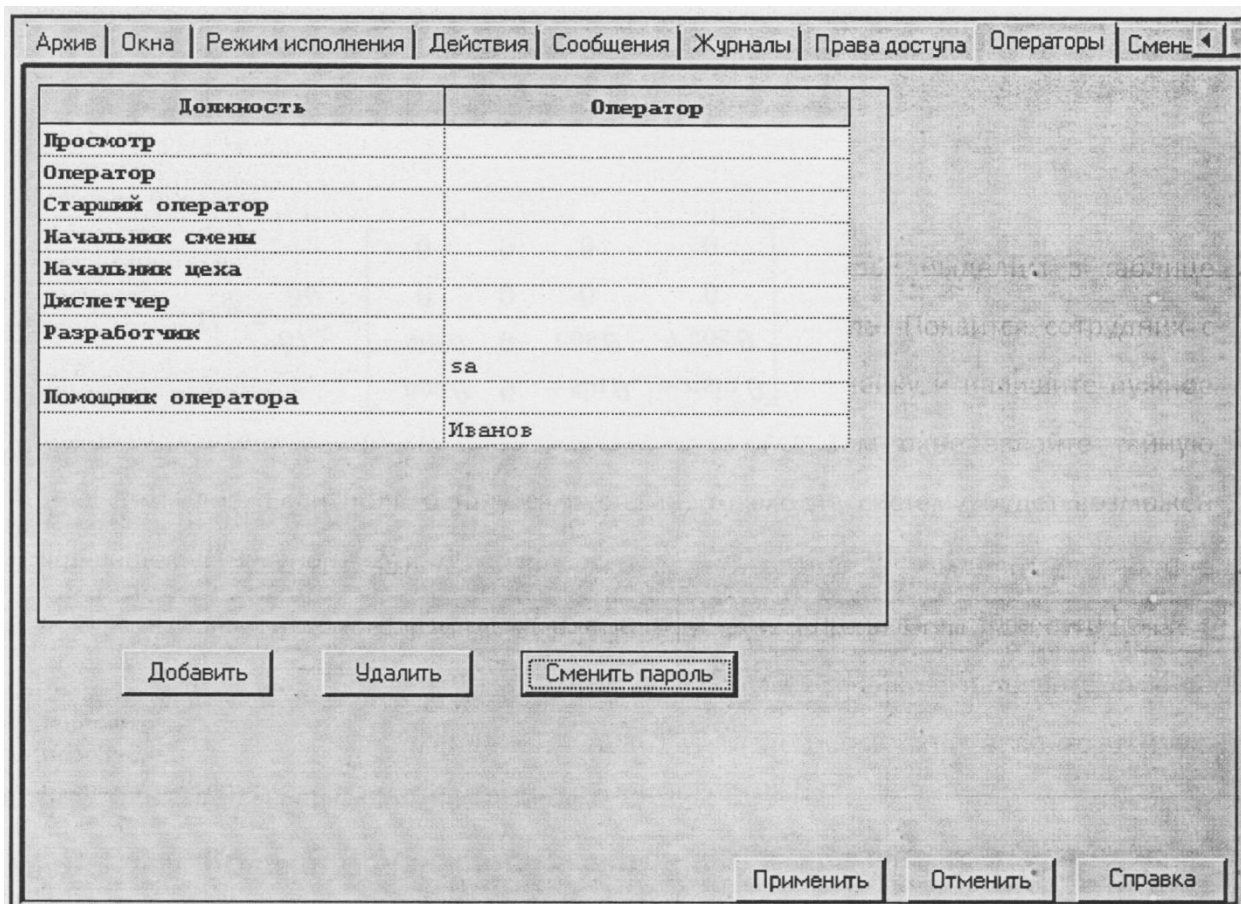


Рисунок 4-24. Создание учетной записи для работы в RT

Проект создан<sup>16</sup>. Можно приступать к следующему этапу, к его отладке.

#### **Финальная проверка проекта**

MasterSCADA дает возможность проверить проект в любой момент времени, как запустив режим исполнения, так и используя специальные режимы отладки и имитации. Иногда проверяют

- <sup>16</sup>Надеемся, что вы параллельно с чтением этой главы создавали проект. Это самый лучший способ освоить MasterSCADA. Если остались какие-либо вопросы или неясности, посмотрите видео создания этого проекта. На диске есть и примеры создания ряда других проектов. Их освоение поможет вам быстрее стартовать с MasterSCADA.

уже готовый проект, но чаще каждый завершенный объект, алгоритм, документ в проекте или даже их отдельные элементы: создали, например, элемент в дереве - проверили его работу в RT, задинамизировали элемент мнемосхемы или добавили параметр на тренд - просмотрели внешний вид в режиме исполнения.

В данной главе на примере созданного проекта мы посмотрим, на что стоит обратить внимание при переносе проекта с одного компьютера на другой, либо при сдаче проекта конечному пользователю.

#### **Проверка совместимости версий MasterSCADA**

Прежде чем переносить проект с компьютера разработчика на компьютер оператора необходимо убедиться в том, что на новом компьютере установлена совместимая с проектом версия MasterSCADA.

Демонстрационная версия, которую, как правило, используют разработчики, включает в себя почти все возможные модули, в коммерческой версии к базовому комплекту добавлены только оплаченные опции. Если проект уже создан, то состав необходимой коммерческой версии можно определить с помощью встроенного инструментария. Перейдите на [страницу свойств Компьютера Общие](#) и нажмите на кнопку **Сформировать опции для заказа**. Появившееся диалоговое окно покажет требуемый для данного проекта состав MasterSCADA.

В обсуждаемом нами учебном примере для обеспечения бесперебойной работы проекта можно воспользоваться бесплатной версией MSRT32, которую вы можете скачать с сайта. Перед переносом проекта на другой компьютер, обратите внимание на номер версии (номер сборки) MasterSCADA. Его можно увидеть в окне, выполнив пункт главного меню **Справка/О программе**. Нужная информация отобразится в поле **Версия**. Номера версий должны совпадать, либо номер версии на новом компьютере должен быть выше, чем номер версии на компьютере разработчика.

#### **Перенос проекта с одного компьютера на другой.**

Проект MasterSCADA это директория, в которой хранится сам файл проекта ([название проекта].vav), а также набор дополнительных файлов и папок. Состав проекта зависит от конфигурации проекта. Важно помнить, что при переносе проекта необходимо не нарушить файловую структуру. При этом на новом месте запуска проекта нам обычно не нужны архивы, накопившиеся на старом месте и расположенные в папках своих объектов проекта. Для корректного переноса проекта надо выполнить пункт главного меню программы **Проект/Экспортировать**. В диалоговом окне укажите место для экспорта. Проект сохранится по указанному адресу. После этого сохраненную папку можно копировать на другой компьютер.

Перед запуском проекта необходимо убедиться в наличии, либо установить используемый в нем OPC-сервер с необходимыми компонентами (**Microsoft Framework**), а также копировать на другой компьютер конфигурацию OPC-сервера, сформированную для работы с данным проектом.

После установки OPC-сервера нужно запустить конфигурацию и установить флаг, который позволит использовать ее по умолчанию.

Дополнительные компоненты: ActiveXэлементы, собственные нестандартные ФБ, и другие элементы, мы в данном проекте не использовали, соответственно, на этом процесс переноса проекта на другой компьютер завершен.

Перед тем как запустить проект на исполнение, откройте все документы в режиме разработки и убедитесь, что их внешний вид не претерпел изменений.

#### **Выбор оператора для тестирования проекта**

При тестировании различных частей проекта зачастую требуются выполнять отладочные действия, которые в штатном режиме не требуются оператору и должны быть от него закрыты правами доступа. Например, просматривать [менеджер проектов](#) в режиме исполнения для проверки работы расчетов, для тестирования периодов опроса объектов и OPC-серверов.

Для решения этих задач необходимо ввести оператора с расширенными правами доступа.

В нашем проекте кроме помощника оператора «Иванов» право работать в режиме исполнения имеет разработчик с логином «sa», этот оператор вводится автоматически при создании любого проекта. В предыдущей главе мы не удаляли его, воспользуемся данной учетной записью.

**Важно! После завершения тестирования проекта обязательно установите пароль доступа в режим исполнения для оператора с должностью «Разработчик» на странице свойств Компьютера *Операторы*.**

Чтобы сменить оператора в режиме исполнения, нажмите на иконку *Завершение сеанса*



### Проверка взаимодействия с OPC-сервером

Прежде чем приступить к тестированию различных документов проекта, необходимо проверить качество работы OPC-сервера.

Запустите режим исполнения от имени оператора-разработчика, воспользуйтесь иконкой



Нажмите на иконку *Показать проект* (  ) в *панели инструментов*.

Вид *менеджера проектов* в режиме исполнения отличается от режима разработки наличием дополнительного столбца справа от деревьев (Рисунок 5-1).

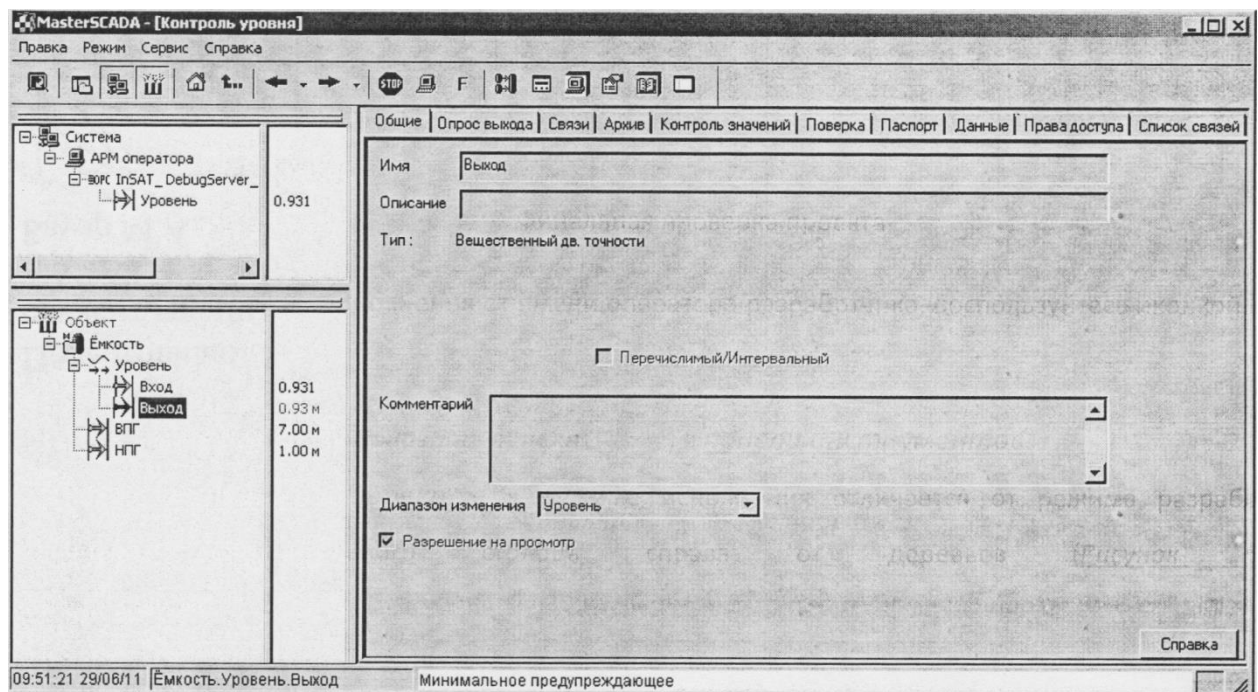


Рис. 5.1. Менеджер проекта в режиме исполнения

В этом столбце отображаются значения переменных. Многие пользователи пытаются оценивать быстрдействие работы системы по этим показаниям, это неизбежно ведет к ошибочным выводам. Информация в данном столбце меняется с собственным циклом, поэтому не позволяет

судить ни о скорости изменения переменной, ни о ее последнем значении. Достоверную информацию можно получить на странице свойств переменной *Данные выхода* (Рисунок 5-2).

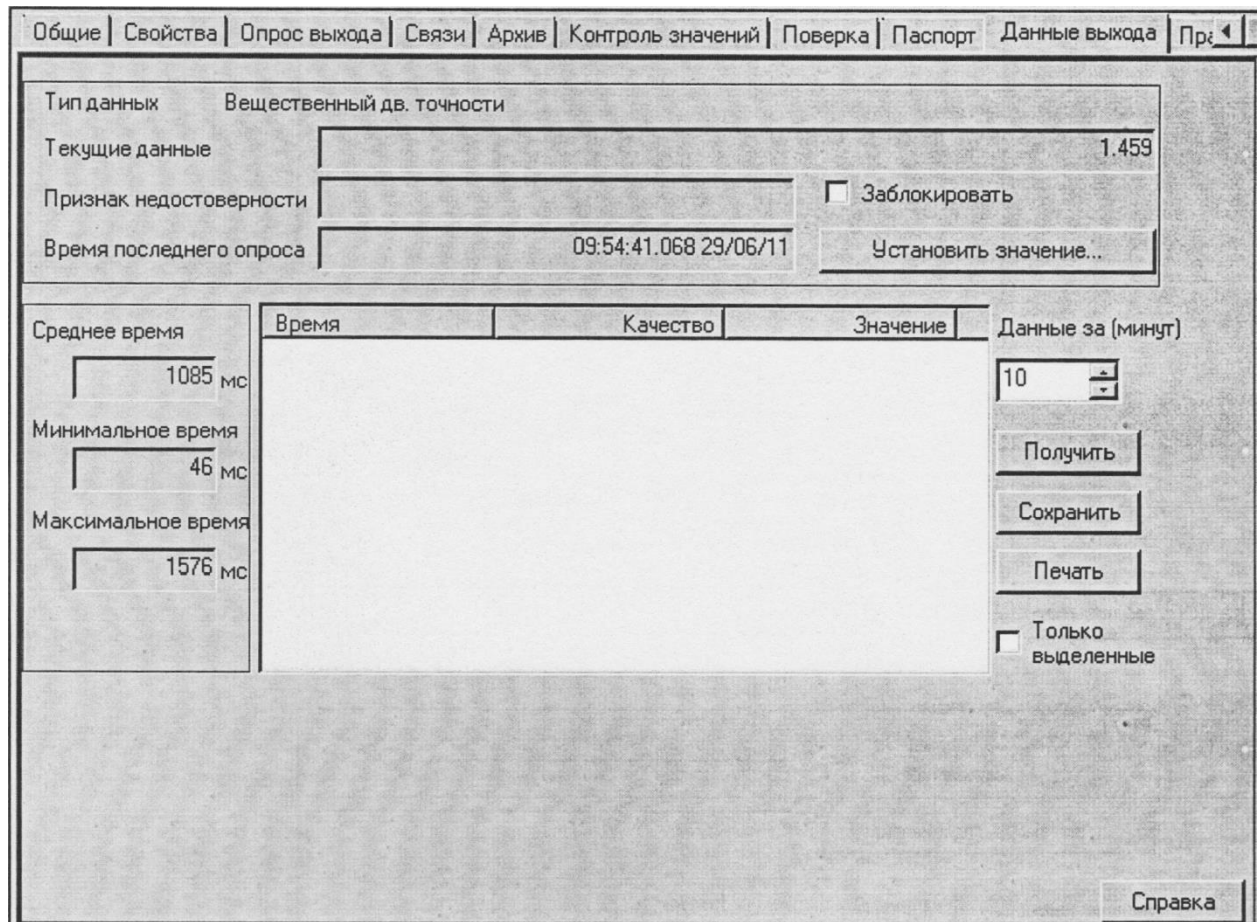


Рисунок 5-2. Страница свойств данные выхода в режиме исполнения

Прежде всего, стоит обратить внимание на поле Признак достоверности. Если данное поле пустое, как показано на Рисунок 5-2, то это означает, что от OPC-сервера приходят данные без каких-либо признаков достоверности, передаваемых стандартными признаками качества. В дереве недостоверные переменные отображены серым шрифтом. Если мы видим, что имеется признак недостоверности, важно понять причину его появления.

MasterSCADA выставляет признак качества OPC-переменным лишь в том случае, если связь с OPC-сервером не обнаружена. Во всех остальных случаях признак качества переменных приходит непосредственно от OPC-сервера, и проблему необходимо искать именно на его уровне (причиной может быть обрыв связи с источником данных, нарушение допустимого диапазона значений и т.п. - для каждого типа OPC-сервера описание алгоритма формирования признаков качества может отличаться). Сигналом о том, что связь с OPC-сервером не обнаружена, служит красная звездочка рядом с обозначением OPC-сервера в дереве Системы. Отсутствие маркера говорит о наличии подключения.

На этапе тестирования проекта разработчик должен определить оптимальный период опроса OPC-сервера. Когда мы только приступаем к разработке проекта, то устанавливаем желаемый период опроса, т.е. тот, который прописан в техническом задании. Заранее сказать, будет ли этот период опроса допустим на реальном объекте, нельзя. Свою роль могут сыграть быстродей-

ствие оборудования нижнего уровня, пропускная способность каналов связи, объем опрашиваемых данных, быстродействие компьютера и другие факторы.

Нужно понимать, что MasterSCADA в большинстве случаев не влияет на скорость, с которой OPC-сервер опрашивает приборы. Это зависит от реализации и настроек самого OPC-сервера. Наиболее важно определить, как OPC-сервер взаимодействует с оборудованием. Именно этот период опроса является отправной точкой в настройке MasterSCADA. Самый оптимальный вариант, чтобы период, с которым OPC-сервер опрашивает устройства, совпадал с периодом опроса, с которым MasterSCADA опрашивает сервер. Если период опроса оборудования будет выше, чем период опроса сервера клиентом, то тогда часть данных будет пропадать (за исключением ситуации, когда сервер поддерживает стандарт HDA и передает в MasterSCADA данные в виде архива).

Посмотрим статистическую информацию, которую предоставляет страница свойств OPC-переменной **Данные выхода** - (Рисунок 5-2. Страница свойств данные выхода в режиме исполнения).

Больше других нас интересует поле **Средний период**. Важно добиться, чтобы средний период опроса совпадал с заданным периодом на странице свойств Опрос OPC-сервера. Если скорость передачи данных не устраивает, то еще раз проверьте, с какой скоростью OPC-сервер может общаться с оборудованием, обратите внимание на настройки портов и приборов нижнего уровня.

Напомним, что в нашем проекте в настройках OPC-сервера указан период имитации данных 500 мс, а MasterSCADA получает информацию раз в секунду. Нужно сделать выбор или увеличить период в OPC-сервере, либо уменьшить в MasterSCADA. Принимая это решение, возьмем во внимание особенности технологического процесса. Ответим на вопрос, важно ли получать информацию об уровне в емкости глубиной 8 метров быстрее, чем раз в секунду? Скорее всего, нет. Поэтому правильнее изменить период опроса в OPC-сервере.

Откройте конфигурацию OPC-сервера, выделите переменную и в ее настройках установите период имитации 1 с.

### Проверка передачи данных между деревом Системы и Объектов

После того как мы определили оптимальный период опроса, можно приступать к следующему этапу. В более сложных проектах разработчики проверяют работу формул в расчетах и ФБ. В нашем случае нужно проверить, как передаются данные по связям из дерева Системы в дерево Объектов. Проследить передаются данные по связям или нет, можно как в дереве, так и на страницах свойств переменных **Данные**, либо **Данные выхода**.

Типичная ошибка первого в опыте начинающего разработчика запуска режима исполнения: в режиме **Отладка** проект работает, в режиме исполнения все переменные дерева Объектов недоступны. Причина в том, что на этапе проектирования проекта на странице свойств объекта Общие не был выбран компьютер, на котором должен исполняться тот или иной объект.

Если в дерево Системы поступают достоверные данные, и они корректно обрабатываются в дерево Объектов, можно приступить к тестированию пользовательского интерфейса. Как правило, конечный пользователь не должен иметь доступа ни к режиму разработки, ни к менеджеру проектов в режиме исполнения. Поэтому выйдите из режима исполнения и установите пароль доступа к

проекту (Пункт главного меню программы **Проект/Сохранить...**) и к учетной записи Разработчик (**Страница свойств Компьютера Операторы**).

### Запуск проекта в режим исполнения

Запуск проекта на исполнение на объекте, как правило, должен быть автоматическим. Как запустить MasterSCADA в режим исполнения не из режима разработки, ведь в MasterSCADA среды исполнения и разработки совмещены? Ответ очень прост. Необходимо создать ярлык, в котором можно прописать необходимые параметры запуска. При необходимости этот ярлык, можно поместить в группу автозапуска меню **Пуск Windows**, чтобы проект запускался в режим исполнения сразу при старте компьютера.

В ярлыке указывается путь к файлу MasterSCADA.exe, путь к исполняемому файлу проекта и дополнительные параметры доступа<sup>17</sup>, в нашем случае это имя оператора и его пароль (если вы его задали).

<sup>17</sup> Подробное описание синтаксиса строки можно найти в справочной системе MasterSCADA в разделе «Запуск проекта из командной строки и по ярлыку»

Создадим ярлык на рабочем столе. Нажмите правую кнопку мыши на рабочем столе **Windows**, в контекстном меню выберите пункт **Создать/Ярлык**, в диалоговом окне укажите необходимые данные для запуска проекта. Вид строки будет таким: "C:\Program Files\InSAT\MasterSCADA\MasterSCADA.exe" "d:\MasterSCADA Projec1з\Projec15\Контроль уровня\Контроль уровня.vav" /изег:|Аванов(Рисунок 5-3).

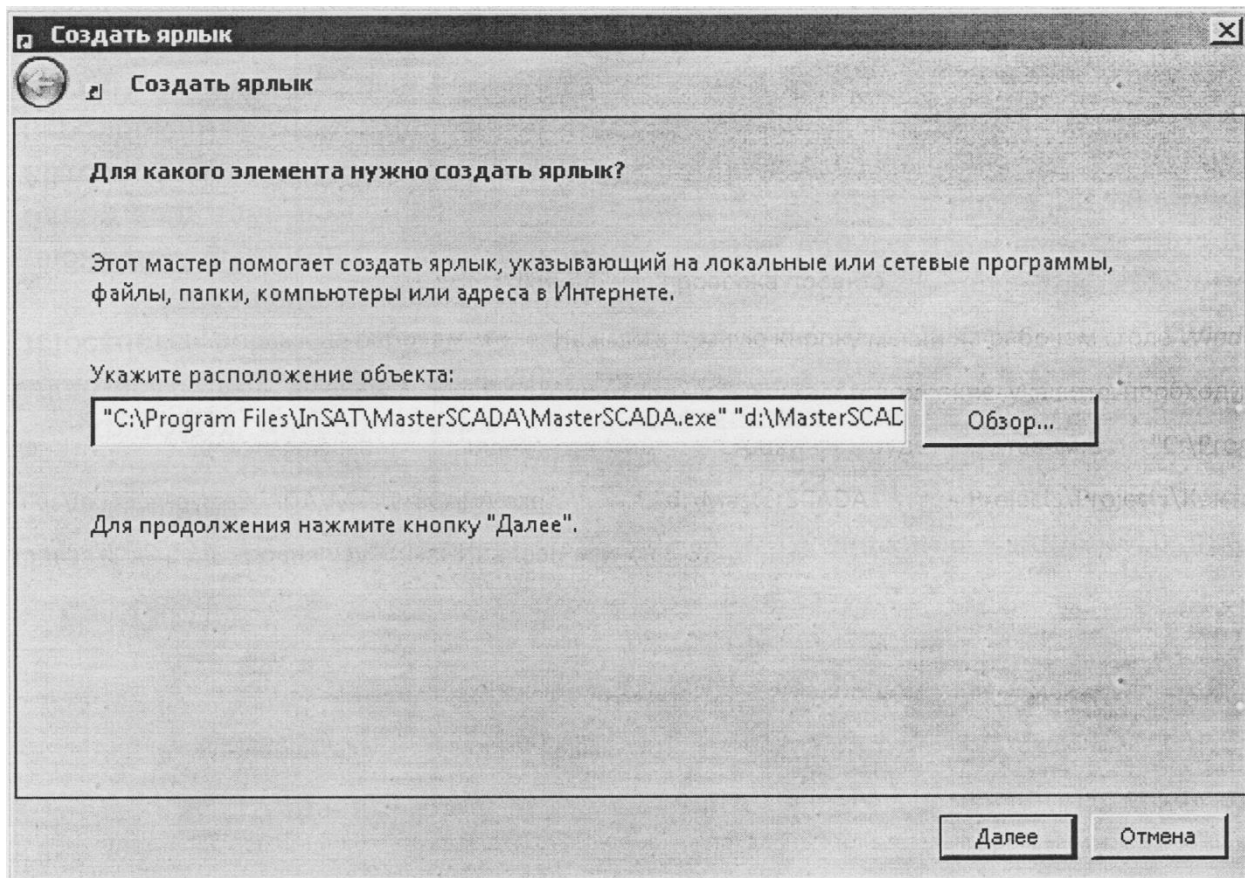


Рис. 5.3. Создание ярлыка

Помните, что расположение файлов на вашем компьютере может отличаться указанных в примере. Нажмите кнопку **Далее**, после чего введите имя ярлыка.

Если дополнительные параметры не прописывать, то тогда перед входом в режим исполнения MasterSCADA выдаст диалоговое окно, в котором предложит ввести дополнительную информацию (Рисунок 5-4).

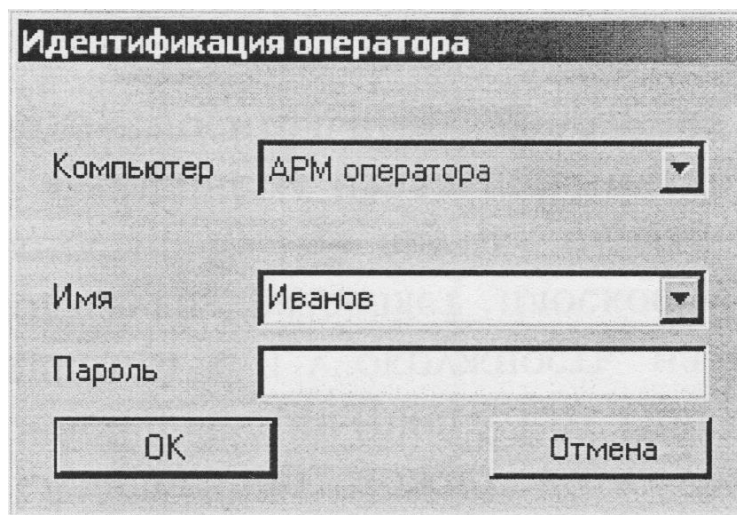


Рис. 5.4. Идентификация оператора

Проверьте, что MasterSCADA закрыта. Выполните двойной клик по созданному ярлыку. Начинается процесс загрузки проекта.

#### Тестирование мнемосхемы

Итак, проект полностью загружен. В нашем проекте только одна мнемосхема, которая и является стартовой. Если вы видите ее после загрузки проекта, то тогда настройки верны (Рисунок L5).



Рис. 5.5. Мнемосхема в режиме исполнения

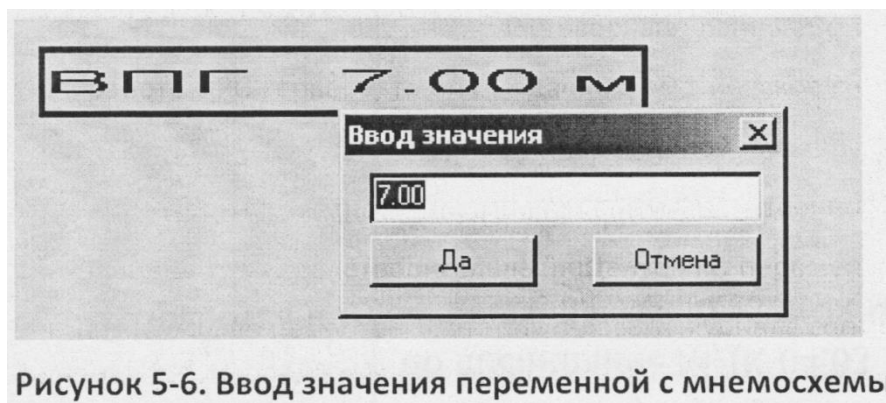
Первое, на что стоит обратить внимание, правильно ли выбран размер мнемосхемы. Самое главное, чтобы отсутствовали линейки прокрутки по горизонтали и вертикали, желательно, чтобы мнемосхема занимала весь экран. Если бы при настройке свойств мнемосхемы был выбран тип «Окно», то если бы остались установлены «галочки» «Отображать заголовок» и «Отображать рамку», то, чтобы избежать появления линеек прокрутки, необходимо было бы задать размер мнемосхемы меньше разрешения экрана на ширину этих элементов оформления ее окна.

Наличие элементов мнемосхемы, перечеркнутых красными крестами, означает потерю ими связи с источниками данных или используемых ресурсов в проекте. Если все динамические элементы приняли такой вид, то тогда нужно проверить назначение Объекту Компьютера. Если эта неприятность коснулась статических элементов, например, рисунков, мультфильмов, то, вероятно, экспорт проекта был выполнен некорректно.

В предыдущем разделе мы рассматривали признаки недостоверности переменных. И проводили их анализ при помощи страниц свойств Данные и Данные выхода, которые оператору, как правило, недоступны. Как же он узнает о том, что данные стали недостоверные? Во-первых, если MasterSCADA получит недостоверные данные с нижнего уровня, либо возникнут проблемы в работе OPC-сервера, то она выдаст автоматическое сообщение. Текст его будет зависеть от ситуации. Во-вторых, о достоверности переменной можно судить по ее внешнему виду на мнемосхеме. Подчеркнутое значение, знаки вопроса, пустое поле - говорят о том, что признак качества переменной неудовлетворительный. Щелчок по переменной откроет окно с расшифровкой проблемы. Также можно посмотреть, что случилось, в журнале сообщений.


Если все статические и динамические элементы отображаются корректно, то приступаем к следующему этапу - тестирование элементов управления мнемосхемы. В нашем случае это элементы для ввода предупредительных уставок и кнопки перехода к журналу сообщений и тренду.

Нажмите ЛК мыши на элементе, отвечающем за ввод ВПГ. В окне, показанном на Рисунок 5-6, введите какое-либо значение и нажмите кнопку **ОК**.



Значение должно отобразиться в поле переменной. Чтобы убедиться, что значение пришло в дерево объектов, нажмите иконку . Она включает отображение дерева Объектов в режиме исполнения. Но помните, что это действие доступно только для того оператора, для которого разрешено действие **Навигация по объектам** на странице свойств Системы Операторы. Аналогично проверьте работу НПГ.

При нажатии на кнопку перехода объекта вы должны перейти на тот или иной документ. Документы должны открыться в отдельном окне, при условии, что выполнены действия указанные в предыдущей главе.

Закрывать открывшиеся документы можно как стандартным для **Windows** способом - нажать на крестик в верхнем правом углу окна, так и нажав на знакомую по Интернет-браузерам иконку , которая вернет оператора на стартовую мнемосхему.

### Тестирование тренда и журнала

Откройте документ **«Изменение уровня»** в режиме исполнения. Нажмите на кнопку перехода «Тренд» на мнемосхеме. Он должен содержать пять графиков (Рисунок 5-7). На поле тренда вы должны видеть изменение уровня в реальном времени. Также на тренде должны отразиться графики изменения аварийных и предупредительных границ. Если аварийные границы по условию задачи определяются константами, то на графике мы увидим горизонтальную черту.

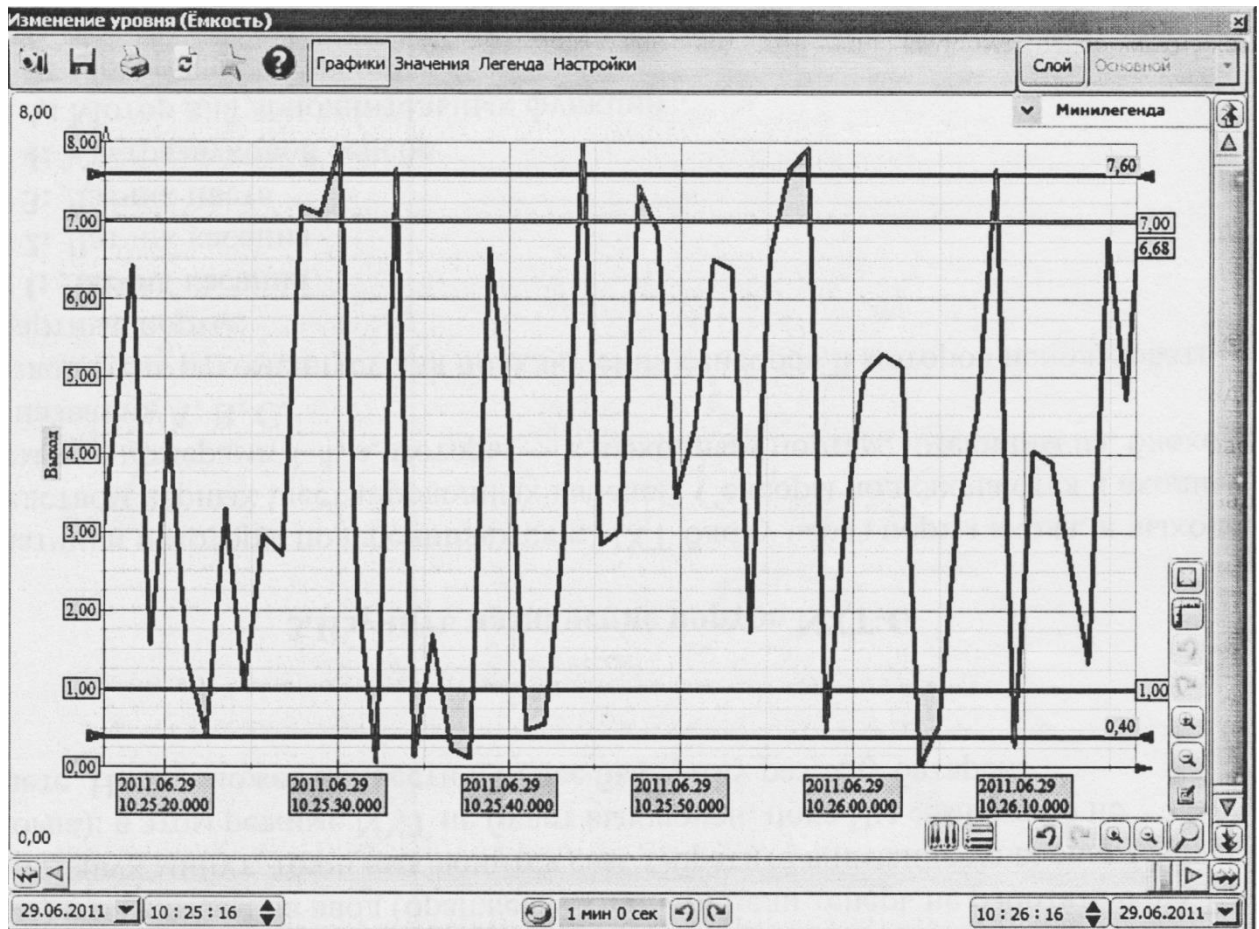


Рис. 5.7. Тренд

Пользуясь линейкой прокрутки, найдите момент изменения, ВПГ и НПГ.

Открыть журнал сообщений можно при помощи кнопки перехода **«Основной журнал»**, которая также находится на стартовой мнемосхеме. Журнал в режиме исполнения должен содержать все сообщения проекта, каждый выход переменной за уровень границы должен отображаться в журнале (*Рисунок 5-8*).

Основной журнал (Ёмкость)

Легенда Настройки Прим. Кэшировать

Квит	Начало	Конец	Сообщение	Источник	Объект
✓	29.06.2011 10:30:21	29.06.201	Максимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:30:20	29.06.201	Минимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:30:09	29.06.201	Минимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:30:07	29.06.201	Минимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:30:05	29.06.201	Максимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:30:01	29.06.201	Минимальное аварийное	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:56	29.06.201	Максимальное аварийное	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:51	29.06.201	Минимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:49	29.06.201	Максимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:47	29.06.201	Минимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:46	29.06.201	Максимальное аварийное	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:44	29.06.201	Максимальное аварийное	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:40	29.06.201	Минимальное аварийное	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:36	29.06.201	Максимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:34	29.06.201	Максимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:32	29.06.201	Максимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:29	29.06.201	Минимальное предупрежда	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:26	29.06.201	Максимальное аварийное	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:23	29.06.201	Максимальное аварийное	Уровень.Выход	Ёмкость
✓	29.06.2011 10:29:22	29.06.201	Минимальное аварийное	Уровень.Выход	Ёмкость

22 записей

1 мин 0 сек

Рис. 5.8. Журнал

### Размер архива

Условие задачи обязывает разработчика обеспечить хранение архивов в течение полугода. С момента первого запуска проекта в режим исполнения архивы начинают накапливаться. В предыдущей главе мы установили срок хранения архивов данных и сообщений и определили ограничение на их размер. Как проверить, началась ли запись архивов? Мы знаем, что каждый объект проекта представлен директорией в памяти компьютера. Архивы данных записываются в поддиректорию *Data*, а архивы сообщений в поддиректорию *Event*. Данные в файлах закодированы. Просмотреть их можно только средствами MasterSCADA, например, при помощи документов типа тренд и журнал.

Проверить, хватит ли вам выделенного объема, можно следующим образом. Запустите проект в режим исполнения, например, на один день. Посмотрите, как изменился объем директории, содержащей архив данных или сообщений. После чего умножьте этот объем на количество дней, в течение которых архив должен накапливаться. Убедитесь, что полученная величина будет меньше, чем вы задали на странице свойств Архив у объектов.

Можно столкнуться с такой ситуацией, когда объем и срок хранения в настройках проекта задан корректно, но данные в архиве накапливаются меньше указанного времени. Причина может быть в том, что на диске осталось места меньше, чем указано в поле **Свободное место на диске** на странице свойств Системы Архив (Рисунок 5-9).

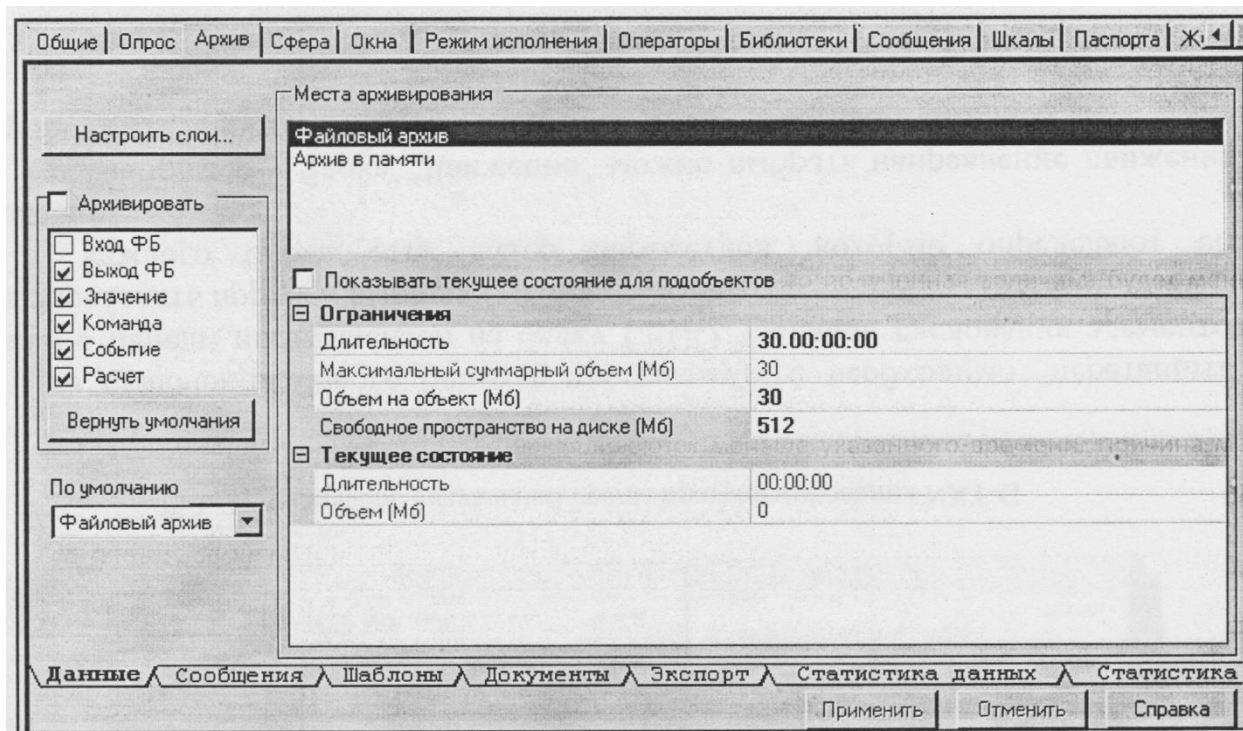


Рисунок 5-9. Страница свойств Архив элемента Система

Обратите внимание, что таким образом оценивать необходимое место на диске можно только для файлового архива, накапливаемого путем записи значений с заданным периодом времени. Обычно, гораздо эффективнее записывать данные в архив только, если они изменились более, чем на заданную величину, например, 0,1%. Тогда активно изменяющиеся технологические параметры, такие, как расход чего-либо, будут писаться фактически с прежним темпом (но не будут записываться в периоды перекрытия потока), а инерционные параметры, подобные температуре, будут записываться крайне редко. В результате, потребность в дисковом пространстве сократится на порядки величин.

### Контроль действий операторов

Настраивая страницу свойств Системы Операторы, а также страницу свойств Права доступа отдельных элементов проекта, например, Команды, разработчик неоднократно отвечает на немой вопрос MasterSCADA: «Какими возможностями наделить каждого оператора системы?» Ранее мы пришли к выводу, что любые изменения значений переменных оператором, а также открытие документов должны фиксироваться в журнале действий обслуживающего персонала. Напомню, что для этого напротив разрешенного действия в столбце **Журнал** необходимо установить флаг

(Рисунок 5-10).

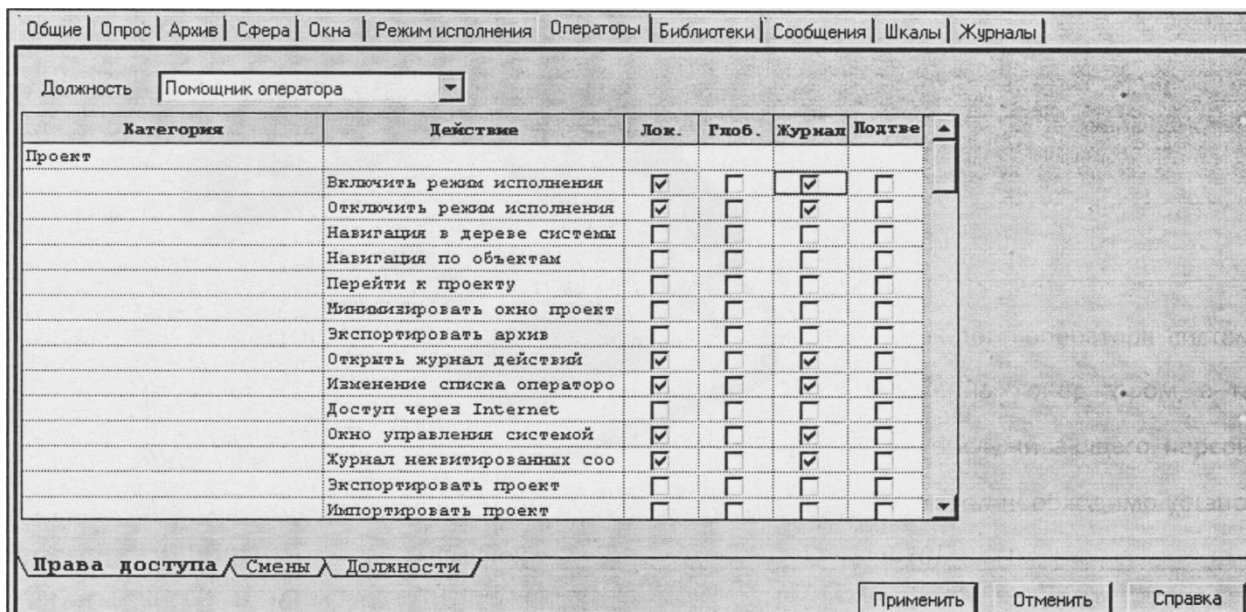


Рис. 5.10. Страница свойств системы Операторы

Отладку проекта нельзя считать законченной до тех пор, пока не убедимся, все ли действия фиксируются.

Журнал действий операторов создается автоматически при создании проекта.

Получить к нему доступ можно не только в режиме исполнения, но и в режиме разработки. Он нашел свое место на странице свойств Компьютера Действия.

Проверим работу журнала.

Перейдем в режим исполнения. Помните, что из двух операторов введенных нами в проект фиксироваться будут только действия созданного нами **«Иванова»**. Выполните максимально возможное количество действий: измените значения уставок, откройте журнал сообщений и тренд. Убедитесь, что **«Иванов»** не может запретить появление информации о нарушении границ переменных и другой информации в окне сообщений, а также не может просмотреть страницы свойств и дерева в режиме исполнения (если эти действия возможны, то следует доработать страницу свойств Системы Операторы).

Чтобы просмотреть журнал действий операторов нужно зайти в режим исполнения от имени оператора-разработчика **«sa»**. Нажмите иконку **Показать проект**, перейдите на страницу свойств компьютера Действия.

Журнал содержит следующие столбцы:

- ◆ **Время** - указывает время совершения действия;
- ◆ **Оператор** - отображается логин оператора;
- ◆ **Действие** - совершенное действие
- ◆ **Описание** - более подробное описание совершенного действия.

Убедитесь, что журнал действий содержит полную информацию (Рисунок 5-11). в противном случае также стоит вернуться настройке страницу свойств Системы Операторы.

Время	Оператор	Компьютер	Действие	Описание
10:58:08 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Вход в систему	
10:59:23 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Выход из системы	
11:01:23 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Включение режима исполнения	Контроль уровня.vav
11:01:24 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Вход в систему	
11:01:25 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Открытие документа	Мнемосхема (объект 'Емкость')
11:01:37 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Ввод значения 7.50 м	Емкость.ВПГ (Мнемосхема: Емкость\Мнемосхема) Изменилось с 7.40
11:01:48 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Ввод значения 0.50 м	Емкость.НПГ (Мнемосхема: Емкость\Мнемосхема) Изменилось с 0.90
11:01:55 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Запрет всех сообщений	
11:01:56 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Закрытие окна сообщений	
11:01:58 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Открытие документа	Основной журнал (объект 'Емкость')
11:02:07 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Открытие документа	Изменение уровня (объект 'Емкость')
11:02:26 16.09.2011	Иванов	АРМ оператора	Выход из системы	
11:02:29 16.09.2011	sa	АРМ оператора	Вход в систему	

Рис. 5.11.Журнал действий операторов

При помощи полей **Начало** и **Конец** можно выбрать точный интервал, за который необходимо просмотреть журнал. Нужные строки отобразятся после нажатия кнопки **Получить**.

Сколько же времени будет храниться журнал действий операторов? В архиве MasterSCADA данный журнал представлен как системная переменная, на нее распространяется соответствующий шаблон архивирования (страница свойств Системы Архив/Шаблоны архивирования)<sup>18</sup>. Ее архив находится на жестком диске в папке Компьютера « Data». На эту директорию действуют те же ограничения, что и на архив объектов: ограничение по времени хранения и ограничение на размер архива. Эти параметры задаются на странице свойств Компьютера Архив. Во время пусконаладочных работ нужно посмотреть, как изменяется ее размер и рассчитать размер архива, чтобы хватило на весь требуемый срок хранения, также как мы рассчитывали размер архива для сообщений.

Если проект содержит только те должности операторов, для которых запрещен просмотр страниц свойств и деревьев в режиме исполнения, то как в этом случае открыть журнал действий операторов? Тогда для вызова журнала можно использовать возможности дискретной Команды, либо переменной Событие.

Итак, создаем в проекте дискретную Команду с именем «**Вызов журнала действий**». На ее странице свойств Действия, нажимаем кнопку **Добавить**. В столбце **Действия** в выпадающем списке выбираем пункт **Системные**, в столбце **Объект - Журнал действий**. (Рисунок 5-12).

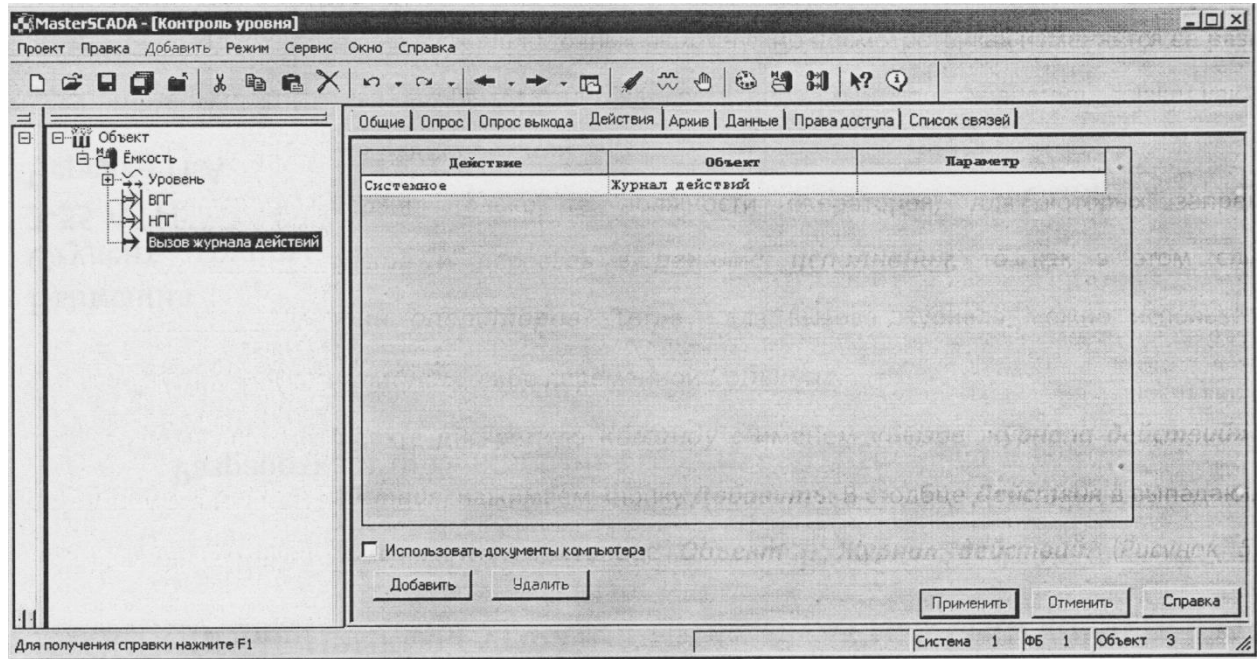


Рис. 5.12. Страница свойств дискретной команды "Действия"

После чего перетаскиваем данную команду ЛК мыши на поле мнемосхемы объекта «Емкость» [Рисунок 5-13].



Рисунок 5-13. Создание кнопки открывающей журнал действий операторов

Настройте внешний вид кнопки по вашему усмотрению. Сохраните проект и проверьте работу проекта в режиме исполнения *Отладка*.

Чтобы оператор «**Иванов**» смог воспользоваться этим алгоритмом у него должно быть право открывать журнал действий операторов (*страница свойств Системы Операторы*).

Проверьте работу в режиме исполнения.

#### **Заключение**

Вы прочитали методическое пособие. Это всего лишь самый первый шаг к освоению Master-SCADA. Вы приоткрыли дверку в большой мир, в котором есть свои потайные уголки и фирменные секреты. Дальнейшие шаги - системное освоение документации и учебных примеров, а еще лучше - прохождение учебных курсов непосредственно у разработчика программы. Не забудьте, что на сайте [www.masterscada.ru](http://www.masterscada.ru) регулярно появляются новые методические статьи и видеопримеры, облегчающие освоение программы.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ ПО ТЕМЕ 4.5.4. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ АСМ**

#### **ВОПРОСЫ**

1. Автоматизированное моделирование и расчет надежности программно-логического контроллера АСУТП.
2. Автоматизированное моделирование и расчет безопасности заправочной операции.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Автоматизированное структурно-логическое моделирование и расчет надежности и безопасности АСУ ТП и оборудования на стадии проектирования. СПб., 2003.

#### **1. Автоматизированное моделирование и расчет надежности программно-логического контроллера АСУТП**

##### ***Этап 1. Постановка задачи и построение СФЦ***

Первичное описание структуры рассматриваемого в Примере 1 программно-логического контроллера (ПЛК) выполнено с помощью структурно-функциональной схемы, изображенной на рис.3.

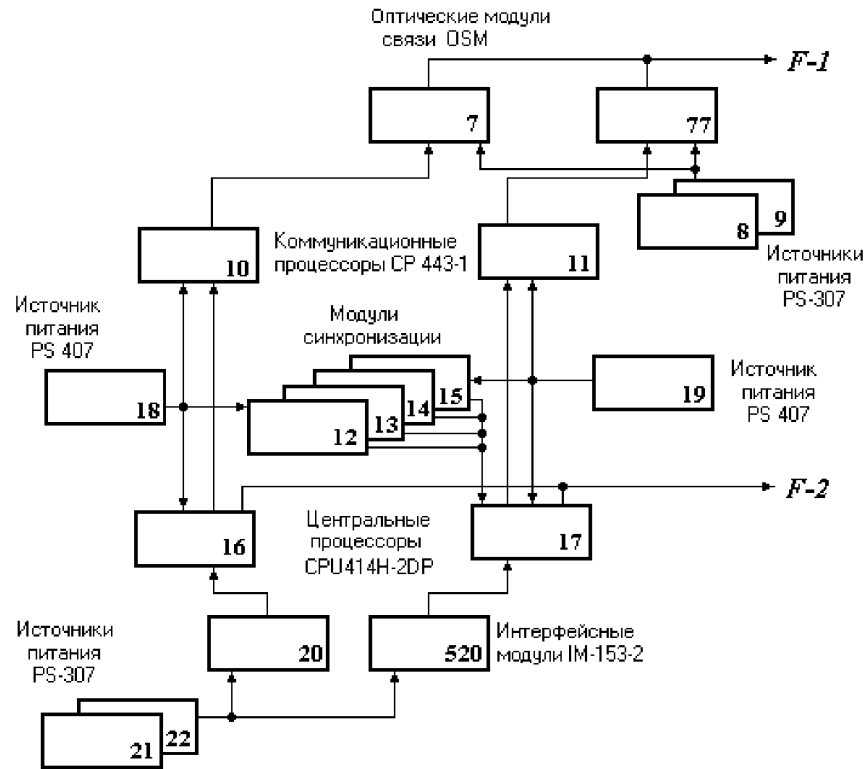


Рис.3. Функциональная схема ПЛК

В табл.1 приведен перечень всех элементов ПЛК и заданы параметры их надежности.

Таблица 1

**Параметры надежности элементов ПЛК**

№	Тип элемента	Обознач. на схеме	Кол-во	$T_{oi}$ (год)	$T_{ei}$ (час)
1	Интерфейсный модуль ИМ 153-2	20, 250	2	47.60	2
2	Центральный процессор CPU414H-2DP	16, 17	2	14.70	4
3	Коммуникационный процессор CP 443-1	10, 11	2	20.60	3
4	Оптический модуль связи OSM	7, 77	2	33.60	4
5	Модуль синхронизации	12, 13, 14, 15	4	150.00	2
6	Источник питания PS 307	8, 9, 21, 22	4	148.00	0.5
7	Источник питания PS 407	18, 19	2	71.50	0.5

Параметрами надежности элементов, заданными в табл.1, являются:  $T_{oi}$  — средняя наработка элемента до отказа в годах;  $T_{ei}$  - среднее время восстановления элемента в часах.

В дополнение к функциональной схеме, приведенной на рис.3, сформулированы описания логических условий реализации элементами ПЛК их выходных функций. Эти данные позволяют осуществить последовательное построение СФЦ ПЛК, основные этапы которого представлены на рис. 4.

а) Основные функции контроллера реализуются с помощью четырех элементов - интерфейсного модуля 20, центрального процессора 16, коммуникационного процессора 10 и оптического модуля связи 7. На рис.4.а эти элементы представлены функциональными вершинами  $i = 20$ ,

16, 10 и 7 разрабатываемой СФЦ. Эти вершины обозначают в СФЦ события (состояния) безотказной работы  $x_{20}$ ,  $x_{16}$ ,  $x_{10}$  и  $x_7$  соответствующих элементов контроллера.

б) Основные элементы контроллера имеют следующие логические условия реализации выходных функций в системе. Оптический модуль связи 7 реализует свою функцию  $y_7$ , если, во-первых, сам не отказал ( $x_7$ ), и, во-вторых, если его работа обеспечивается выходной функцией  $y_{10}$  коммуникационного процессора 10. В свою очередь, функция  $y_{10}$  определяется собственной работоспособностью коммуникационного процессора  $x_{10}$ , а также выходной функцией  $y_{16}$  центрального процессора 17. Тот, в свою очередь, обеспечивается функцией  $y_{20}$  интерфейсного модуля 20. Эта последовательность функционального подчинения представлена графически в СФЦ на рис.4.б.

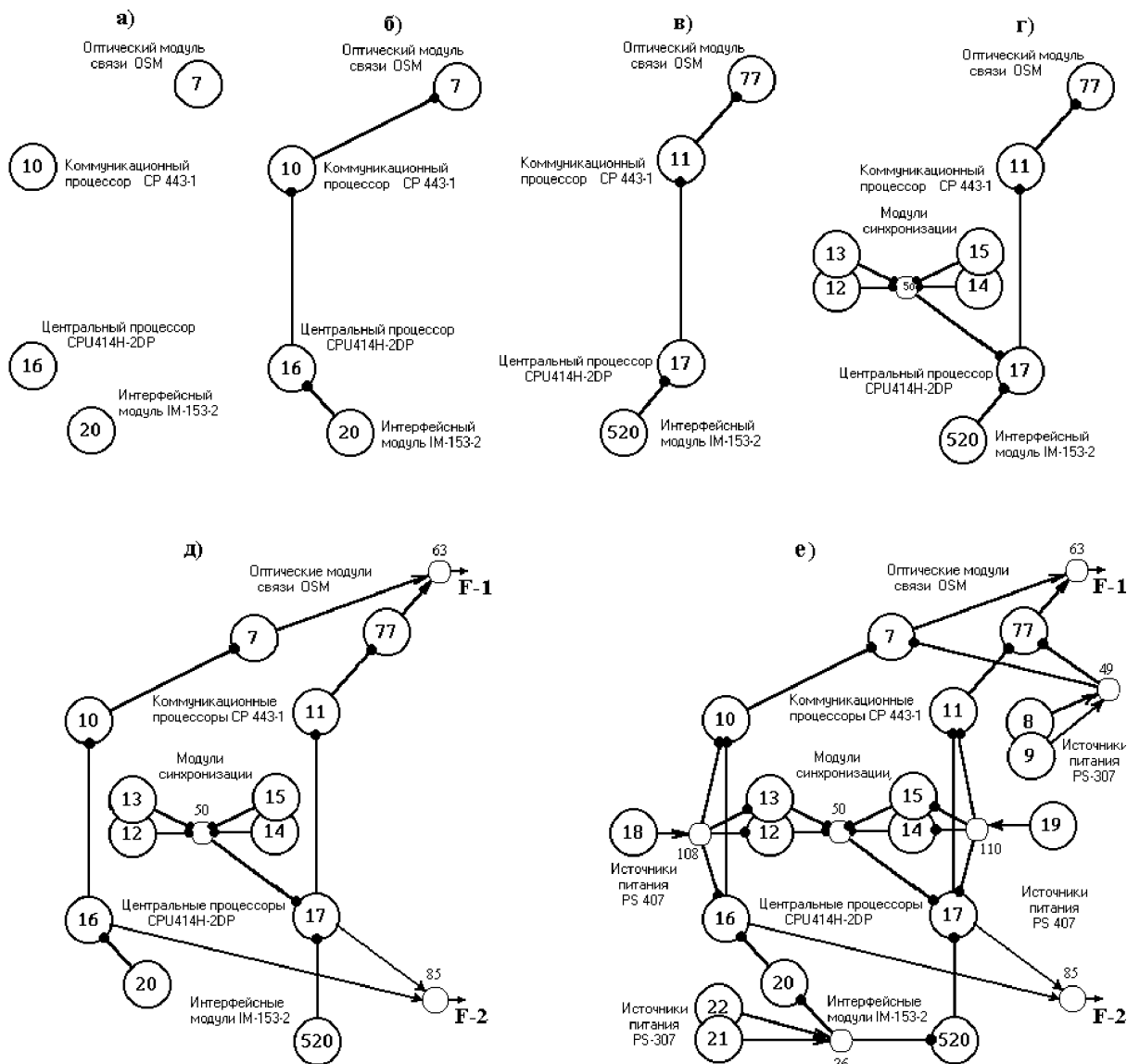


Рис.4. Этапы построения схемы функциональной целостности ПЛК

в) Для увеличения надежности в контроллере реализовано групповое резервирование главной последовательности элементов (см рис.4.б) резервной последовательностью (см. рис.4.в) с элементами 520, 17, 11 и 77 соответственно (см. также рис.1). Логические условия функционирования элементов резервной последовательности в системе аналогичны уже рассмотренным условиям работы основных элементов. На рис.4.в изображен фрагмент СФЦ резервной группы элементов контроллера.

г) Согласованная работа резервной группы элементов контроллера обеспечивается непрерывной безотказной работой одновременно четырех модулей синхронизации 12, 13, 14, и 17. Непосредственное обеспечение синхронизации работы резервной цепи осуществляется в контроллере.

лере через центральный процессор 17 (см. рис.3). В СФЦ условие безотказной работы одновременно всех модулей синхронизации представлено на рис.4.г с помощью четырех конъюнктивных дуг (заканчиваются точками), заходящих в фиктивную вершину с номером 50. Конъюнктивная дуга из фиктивной вершины 50 в функциональную вершину 17 представляет условие синхронизации работы резервного центрального процессора 17 и, следовательно, всей резервной цепи элементов контроллера.

д) Контроллер реализует две выходные функции. Функция  $F-1$  управления технологическими процессами реализуется при условии функционирования хотя бы одного из двух оптических модулей связи 7 (основной режим) или 77 (резервный режим). Функция  $F-2$  управления противоаварийной защитой реализуется при функционировании хотя бы одного из двух центральных процессоров 16 (основной режим) или 17 (резервный режим). Эти условия реализации контроллером своих функций представлены в СФЦ на рис.4, д. с помощью двух фиктивных вершин 85 и 63. Входящие в них пары дизъюнктивных дуг (заканчиваются стрелками) представляют реализованные в контроллере возможности основного и резервного режимов работы.

е) Для обеспечения гарантированного питания в ПЛК реализовано групповое и поэлементное дублирование трех независимых групп источников питания (см. рис. 3 и рис. 4,е):

- ◆ коммуникационные процессоры и модули синхронизации основной (16, 10, 12, 13) и резервной (17, 11, 14, 15) цепей элементов контроллера обеспечиваются отдельными источниками автономного питания 18 и 19 типа PS-407;
- ◆ интерфейсные модули 20 и 520 обеспечиваются питанием от двух дублированных источников 8 и 9 типа PS-307;
- ◆ оптические модули связи 7 и 77 обеспечиваются питанием от двух других дублированных источников 21 и 22 типа PS-307.

Сформулированные условия обеспечения питанием элементов контроллера представлены в СФЦ с помощью фиктивных вершин 108, 110, 49 и 37. Заходящие в них дизъюнктивные дуги обозначают режимы нагруженного резервирования источников питания. Исходящие из этих вершин конъюнктивные дуги охватывают те элементы контроллера, которые обеспечиваются питанием от соответствующих источников.

Окончательный вариант СФЦ контроллера изображен на рис.4, е. Логическими критериями функционирования контроллера являются:

$$Y_{F-1} = y_{63} - \text{условие реализации функции } F-1 \text{ управления} \quad (11)$$

технологическими процессами;

$$Y_{F-2} = y_{85} - \text{условие реализации функции } F-2 \text{ управления} \quad (12)$$

автоматической противоаварийной защитой (ПАЗ).

## **Этап 2. Применение ПК АСМ для оценки надежности и безопасности ПЛК**

### **2.1. Моделирование и расчет показателей надежности ПЛК**

После завершения подготовки исходных данных, они вводятся в ПК АСМ. На рис.5 изображено типовое окно подготовки и ввода графа СФЦ и параметров надежности элементов (см. табл.1) рассматриваемого ПЛК.

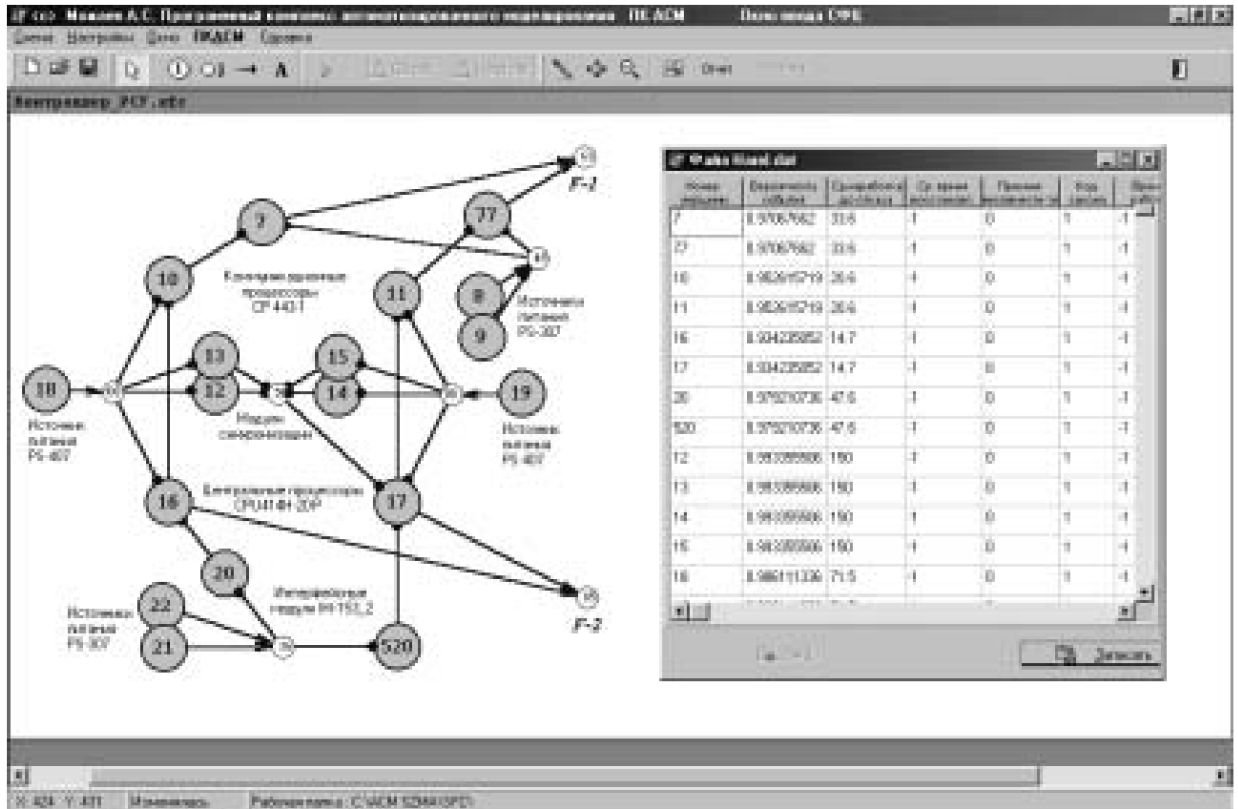


Рис.5. Окно ввода исходных данных типового ПК АСМ

После ввода в ПК АСМ графа СФЦ и параметров элементов все последующие этапы моделирования и расчетов показателей надежности выполняются автоматически. На рис.6 изображено типовое окно автоматизированного моделирования и расчетов ПК АСМ.

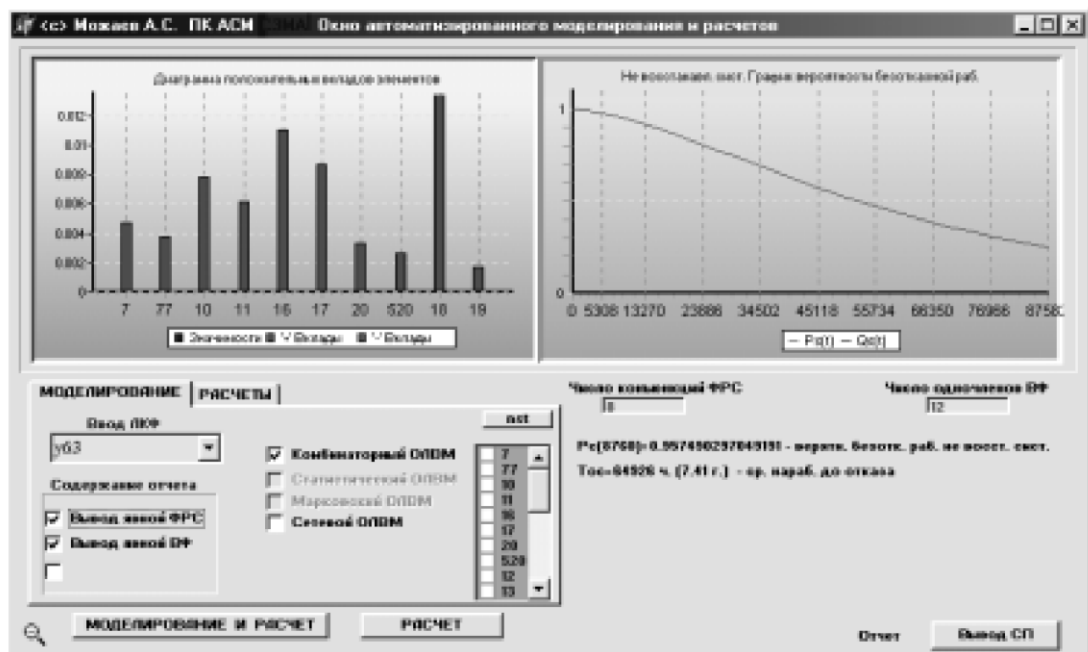


Рис.6. Окно моделирования и расчетов ПК АСМ



В окне на рис.6 приведены основные результаты моделирования надежности ПЛК по критерию (11)  $Y_{F-1} = y_{63}$  - реализации функции F-1 .

Полные результаты автоматизированного моделирования и расчетов показателей надежности ПЛК составляют:

1) Логическая функция работоспособности ПЛК по  $F-I$ , которая включает 8 конъюнкций (кратчайших путей успешного функционирования)

$$\begin{aligned}
 Y_{F-1} = Y_{63} = & x_7 \cdot x_{10} \cdot x_{16} \cdot x_{20} \cdot x_{18} \cdot x_8 \cdot x_{22} \vee \\
 & \vee x_7 \cdot x_{10} \cdot x_{16} \cdot x_{20} \cdot x_{18} \cdot x_9 \cdot x_{22} \vee \\
 & \vee x_7 \cdot x_{10} \cdot x_{16} \cdot x_{20} \cdot x_{18} \cdot x_8 \cdot x_{21} \vee \\
 & \vee x_7 \cdot x_{10} \cdot x_{16} \cdot x_{20} \cdot x_{18} \cdot x_9 \cdot x_{21} \vee \\
 & \vee x_{77} \cdot x_{11} \cdot x_{17} \cdot x_{520} \cdot x_{12} \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{15} \cdot x_{18} \cdot x_{19} \cdot x_8 \cdot x_{22} \vee \\
 & \vee x_{77} \cdot x_{11} \cdot x_{17} \cdot x_{520} \cdot x_{12} \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{15} \cdot x_{18} \cdot x_{19} \cdot x_9 \cdot x_{22} \vee \\
 & \vee x_{77} \cdot x_{11} \cdot x_{17} \cdot x_{520} \cdot x_{12} \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{15} \cdot x_{18} \cdot x_{19} \cdot x_8 \cdot x_{21} \vee \\
 & \vee x_{77} \cdot x_{11} \cdot x_{17} \cdot x_{520} \cdot x_{12} \cdot x_{13} \cdot x_{14} \cdot x_{15} \cdot x_{18} \cdot x_{19} \cdot x_9 \cdot x_{21}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Логическая ФРС (13) получена в ПК АСМ на основе преобразования СФЦ, изображенной на рис.5, по ЛКФ (11) с помощью специального универсального графоаналитического метода, алгоритма и программы логического моделирования, разработанных в ОЛВМ.

2) Многочлен расчетной вероятностной функции безотказности управления технологическими процессами, который состоит из 12 одночленов.

$$\begin{aligned}
 P_{F-1}(t) = & p_{77} p_{11} p_{17} p_{520} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{18} p_{19} q_8 p_9 q_{22} p_{21} + \\
 & + p_7 p_{10} p_{16} p_{20} p_{18} q_8 p_9 q_{22} p_{21} + \\
 & + p_{77} p_{11} p_{17} p_{520} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{18} p_{19} q_8 p_9 p_{22} + \\
 & + p_{77} p_{11} p_{17} p_{520} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{18} p_{19} p_8 q_{22} p_{21} + \\
 & + p_7 p_{10} p_{16} p_{20} p_{18} q_8 p_9 p_{22} + \\
 & + p_7 p_{10} p_{16} p_{20} p_{18} p_8 p_9 q_{22} p_{21} + \\
 & + p_{77} p_{11} p_{17} p_{520} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{18} p_{19} p_8 p_{22} + \\
 & + p_7 p_{10} p_{16} p_{20} p_{18} p_8 p_{22} - \\
 & - p_7 p_{77} p_{10} p_{11} p_{16} p_{17} p_{20} p_{520} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{18} p_{19} p_8 p_{22} - \\
 & - p_7 p_{77} p_{10} p_{11} p_{16} p_{17} p_{20} p_{520} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{18} p_{19} p_8 q_{22} p_{21} - \\
 & - p_7 p_{77} p_{10} p_{11} p_{16} p_{17} p_{20} p_{520} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{18} p_{19} q_8 p_9 p_{22} - \\
 & - p_7 p_{77} p_{10} p_{11} p_{16} p_{17} p_{20} p_{520} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{18} p_{19} q_8 p_9 q_{22} p_{21}
 \end{aligned} \tag{14}$$

Многочлен (14) получен в ПК АСМ на основе специального комбинированного метода, алгоритма и программы преобразования ФРС (13).

3) Все параметры  $p_i = p_i(t)$ , подставляемые в многочлен (14) являются функциями времени. Значение  $t = 1 год = 8760 час.$  одинаковое для всех параметров и составляет заданное время работы всего ПЛК (наработку). Результаты расчетов показателей надежности

невосстанавливаемого ПЛК по функции  $F-1$  управления технологическими процессами, составляют:

$$\begin{aligned}
 P_{F-1}(1z) &= 0.958 - \text{вероятность безотказной работы контроллера по } F-1; \\
 T_{oF-1} &= 7.41 \text{ год.} - \text{средняя наработка до отказа по } F-1;
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

В верхней части рис.6 приведены диаграмма положительных вкладов отдельных элементов контроллера в надежности реализации функции  $F-1$  и график закона распределения времени безотказной работы.

4) Результаты расчетов показателей надежности восстанавливаемого контроллера, по функции  $F-1$  управления технологическими процессами, полученные в ПК АСМ на основе ВФ (14) с учетом среднего времени восстановления каждого элемента (см. табл.1 столбец  $T_{Bi}$ ) составили:

$$\begin{aligned}
 KI_{F-1} &= 0.99999839 - \text{коэффициент готовности}; \\
 T_{HOF-1} &= 71.37 \text{ г.} - \text{средняя наработка на отказ}; \\
 T_{BF-1} &= 1 \text{ ч.} - \text{среднее время восстановления}; \\
 P_{BF-1}(1z) &= 0.986. - \text{вероятность безотказной работы}.
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Автоматическое моделирование и расчет показателей надежности контроллера по функции  $F-2$  управления противоаварийной защитой выполняется по аналогичной методике на основе критерия (12)  $Y_{F-2} = y_{85}$ .

Общие результаты моделирования и расчета показателей надежности ПЛК по функциям  $F-1$  и  $F-2$  приведены в табл.2.

Таблица 2

Сводные результаты проектного расчета надежности ПЛК

F	$\frac{\Phi PC}{B\Phi}$	Не восстанавлив. ПЛК		Восстанавливаемый ПЛК			Графики положительных вкладов элементов
		$P_F(t)$	$T_{oF}$	$KI_F$	$T_{юF}T_{вF}$	$P_{всF}(t)$	
F-1	$\frac{8}{12}$	0.957	7.41 г.	0.9999984	$\frac{71.37 \text{ ч.}}{1.0 \text{ ч.}}$	0.986	
F-2	$\frac{4}{6}$	0.976	12.28 г.	0.9999986	$\frac{71.46 \text{ ч.}}{1.0 \text{ ч.}}$	0.986	

## 2.2. Моделирование и расчет вероятностей аварийных ситуаций ПЛК

Государственным стандартом ГОСТ 24.701-86 для обеспечения требуемого уровня безопасности АСУТП предусмотрен вероятностный анализ возможных аварийных ситуаций. Это соответствует требованиям п.2.6 РД 03-418-01 определения вероятности или частоты аварийной ситуации, и является частью оценки риска аварии. В технологии АСМ этот анализ может производиться путем вычисления вероятностей возникновения исключительных (аварийных, критических) ситуаций.

Для каждой аварийной ситуации в проектируемой АСУТП Заказчик формулирует условия ее возникновения. Эти условия описываются соответствующим логическим критерием  $Y_{AC}(\{y_i\})$ . Например, если в качестве аварийной ситуации в рассматриваемом ПЛК определен одновременный отказ первой  $F-1$  и второй  $F-2$  функций, то соответствующий логический критерий составит

$$Y_{AC} = \bar{y}_{63} \cdot \bar{y}_{85} \quad (17)$$

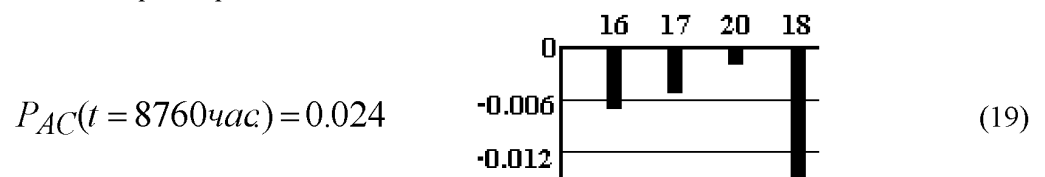
Методика вероятностного анализа безопасности АСУТП для заданной аварийной ситуации аналогична методике автоматизированного моделирования и расчета надежности. Сначала логические критерии аварийных ситуаций вводятся в ПК АСМ, затем автоматически определяются соответствующие логические ФРС, многочлены ВФ и выполняются расчеты.

Полученная с помощью ПК АСМ логическая ФРС для критерия (17) имеет вид

$$Y_{AC} = \bar{y}_{63} \cdot \bar{y}_{85} = \bar{x}_{18} \vee \bar{x}_{22} \bar{x}_{21} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{14} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{19} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{520} \vee \bar{x}_{17} \bar{x}_{20} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{14} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{19} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{520} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{17} \quad (18)$$

ФРС (18) представляет 16 минимальных сечений (комбинаций) отказов элементов, каждый из которых достоверно приводит к возникновению указанной аварийной ситуации.

Вероятностная функция, полученная в ПК АСМ путем преобразования ФРС (18), включает 30 одночленов. Вычисленные на ее основе нижние оценки вероятности возникновения аварийной ситуации (без учета восстановлений элементов) и наибольшие вклады элементов контроллера составляют



Вычисленное в ПК АСМ верхнее значение вероятности этой аварийной ситуации (с учетом восстановлений элементов) равна

$$P_{вАС}(t = 8760 \text{ час.}) = 0.014 \quad (20)$$

### 2.3. Моделирование и анализ отказоустойчивости ПЛК

Кроме вероятностной оценки возможности возникновения аварийных ситуаций для обеспечения и управления безаварийностью АСУТП часто требуется определение наиболее опасных сочетаний (комбинаций и/или последовательностей) отказов или поражений элементов, которые непосредственно приводят к возникновению аварийной ситуации. Решение указанной задачи называют анализом отказоустойчивости АСУТП.

Анализ отказоустойчивости является важной дополнительной детерминированной характеристикой надежности и безопасности АСУТП. В технологии АСМ он выполняется в два этапа:

- для множества всех выходных функций  $F$  системы задаются противоположные логические критерии их не реализации (функционального отказа) и определяются, с помощью ПК АСМ, соответствующие ФРС (множества минимальных сечений отказов);
- на основе сравнительного анализа этих множеств по всем функциям  $F$  определяют наиболее опасные сечения отказов, которые приводят к тяжелым последствиям или вызывают множественные отказы функций АСУТП. Далее эти данные могут использоваться для обоснования проектных и управленческих решений по обеспечению (повышению) надежности и безопасности АСУТП.

Пример анализа отказоустойчивости рассматриваемого ПЛК выполнен по следующим критериям отказов двух его функций:

$$\bar{Y}_{F-1} = \bar{y}_{63}; \quad \bar{Y}_{F-2} = \bar{y}_{85}. \quad (21)$$

С помощью ПК АСМ определены соответствующие минимальные сечения отказов:

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{F-1} = \bar{y}_{63} = & \bar{x}_{18} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_1 \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{14} \vee \bar{x}_{10} \bar{x}_{14} \vee \bar{x}_7 \bar{x}_{14} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_{10} \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_7 \bar{x}_{15} \vee \\ & \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_{10} \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_7 \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_{10} \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_7 \bar{x}_{13} \vee \\ & \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{19} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{19} \vee \bar{x}_{10} \bar{x}_{19} \vee \bar{x}_7 \bar{x}_{19} \vee \bar{x}_{22} \bar{x}_{21} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{520} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{520} \vee \bar{x}_{10} \bar{x}_{520} \vee \\ & \vee \bar{x}_7 \bar{x}_{520} \vee \bar{x}_{17} \bar{x}_{20} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{17} \vee \bar{x}_{10} \bar{x}_{17} \vee \bar{x}_7 \bar{x}_{17} \vee \bar{x}_{11} \bar{x}_{20} \vee \bar{x}_{11} \bar{x}_{16} \vee \bar{x}_{10} \bar{x}_{11} \vee \\ & \vee \bar{x}_7 \bar{x}_{11} \vee \bar{x}_8 \bar{x}_9 \vee \bar{x}_{77} \bar{x}_{20} \vee \bar{x}_{77} \bar{x}_{16} \vee \bar{x}_{77} \bar{x}_{10} \vee \bar{x}_7 \bar{x}_{77} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{F-2} = \bar{y}_{85} = & \bar{x}_{18} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{14} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{15} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{12} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{13} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{19} \vee \\ & \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{19} \vee \bar{x}_{22} \bar{x}_{21} \vee \bar{x}_{20} \bar{x}_{520} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{520} \vee \bar{x}_{17} \bar{x}_{20} \vee \bar{x}_{16} \bar{x}_{17} \vee \bar{x}_7 \bar{x}_{17} \end{aligned} \quad (23)$$

Сравнительный анализ конъюнкций (22) и (23) показывает, что к отказу одновременно двух функций контроллера приводят 16 минимальных комбинаций отказов элементов. При этом наибольшую опасность представляет элемент 18 (источник питания PS 407). Одиночный отказ (уничтожение, повреждение) только одного этого элемента нарушает работоспособность контроллера сразу по всем его функциям, т.е. вызывает возникновение аварийной ситуации (17).

Следующими по уровню опасности являются все парные отказы элементов, составляющие функцию (23). Они также приводят к отказу всех функций контроллера. Остальные сечения из (22) приводят к отказу только одной функции  $F-1$ .

### Этап 3. Использование результатов автоматизированного моделирования для повышения надежности и безопасности ПЛК

На основе результатов выполненного автоматизированного моделирования и расчетов (см. табл.2, (18), (19), (22) и (23)) можно заключить, что наибольшее увеличение надежности и безопасности проектируемого ПЛК, при минимальных затратах на дополнительное оборудование, можно получить путем введения в структуру системы еще одного резервного источника питания PS 407 для элемента 18. На рис.7 приведена СФЦ нового варианта структуры ПЛК с резервным блоком питания 118.

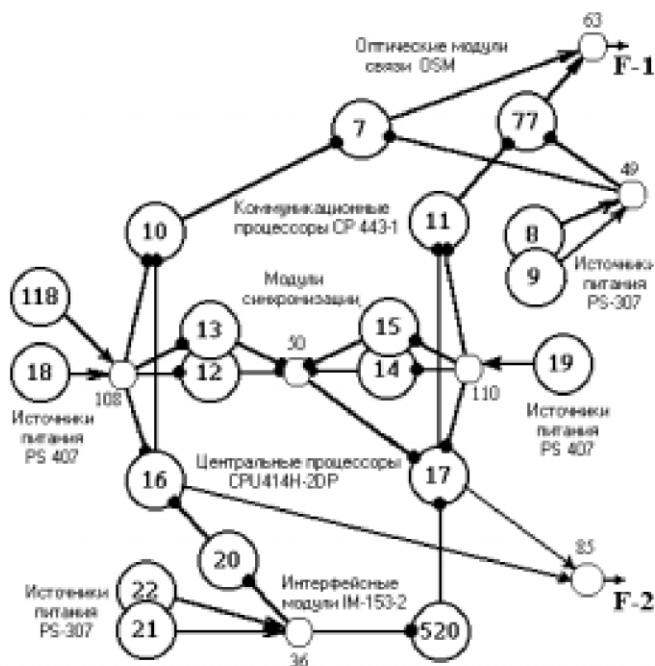


Рис.7. СФЦ ПЛК с дополнительным блоком питания 118

Общие результаты автоматизированного моделирования и расчетов показателей надежности и безопасности нового варианта ПЛК приведены в табл.3.

Таблица 3

Результаты расчета надежности нового варианта ПЛК

$F$	$\frac{\Phi_{PC}}{B\Phi}$	Не восстанавлив. ПЛК		Восстанавливаемый ПЛК			Графики положительных вкладов элементов
		$P_F(t)$	$T_{oF}$	$KГ_F$	$T_{ноF}/T_{вF}$	$P_{всF}(t)$	
F-1	$\frac{16}{24}$	0.971	7.98 г.	0.9999999954	$\frac{38243 \text{ з.}}{1.63 \text{ ч.}}$	0.999974	
F-2	$\frac{8}{12}$	0.976	12.28 г.	0.9999999984	$\frac{116523 \text{ з.}}{1.60 \text{ ч.}}$	0.9999914	
АС	$\frac{8}{16}$	$P_{АС}(t)=0.011$		$P_{вАС}(t)=0.0000086$			

Сравнение этих результатов с данными, приведенными в табл.2, и формулах (19) и (20) показывают, что добавление элемента 118 привело к существенному увеличению надежности и безопасности проектируемого ПЛК.

### Пример 2. Автоматизированное моделирование и расчет безопасности заправочной операции

На рис.8 изображено "дерево отказа" заправочной операции, приведенное в РД 03-418-01 "Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов" Госгортехнадзора России. Смысловое содержание и вероятности свершения исходных событий, заданные в РД 03-418-01, указаны в табл.4

Вершинами заданного дерева представлены исходные события  $i = 1, 2, \dots, 13$  сценария возможных вариантов возникновения аварийной ситуации в ходе выполнения заправочной операции. Комбинации событий 1-6 определяют условия отказа подсистемы автоматической противоаварийной защиты, событий 7-11 – ошибки оператора, события 12, 13 – отказ технических средств аварийного отключения насоса.

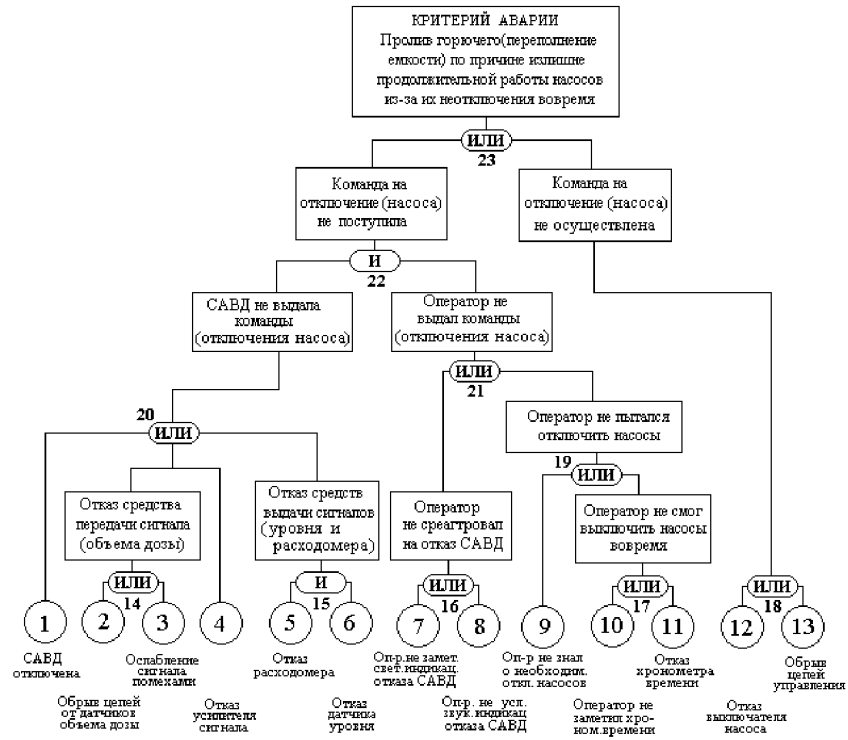


Рис.8. "Дерево отказа" заправочной операции

Таблица 4

№ <i>i</i>	Исходные события "дерева отказа" заправочной операции	Вероятн. $P_i$
1	Система автоматической выдачи дозы (САВД) оказалась отключенной	0,0005
2	Обрыв цепей передачи сигнала от датчиков объема дозы	0,00001
3	Ослабление сигнала выдачи дозы помехами	0,0001
4	Отказ усилителя-преобразователя сигнала выдачи дозы	0,0002
5	Отказ расходомера	0,0003
6	Отказ датчика уровня	0,0002
7	Оператор не заметил световой индикации о неисправности САВД	0,005
8	Оператор не услышал звуковой сигнализации об отказе САВД	0,001
9	Оператор не знал о необходимости отключения насоса по истечении заданного времени	0,001
10	Оператор не заметил индикации хронометра об истечении заданного времени заправки	0,004
11	Отказ хронометра	0,00001
12	Отказ автоматического выключателя электропривода насоса	0,00001
13	Обрыв цепей управления приводом насоса	0,00001

В данном примере рассматривается методика применения технологии и программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования для вероятностного и детерминированного анализа безопасности автоматизированной системы управления заправочной операцией на опасном производственном объекте.

На рис.9 изображен вариант СФЦ тождественный дереву отказов, приведенному на рис.8.

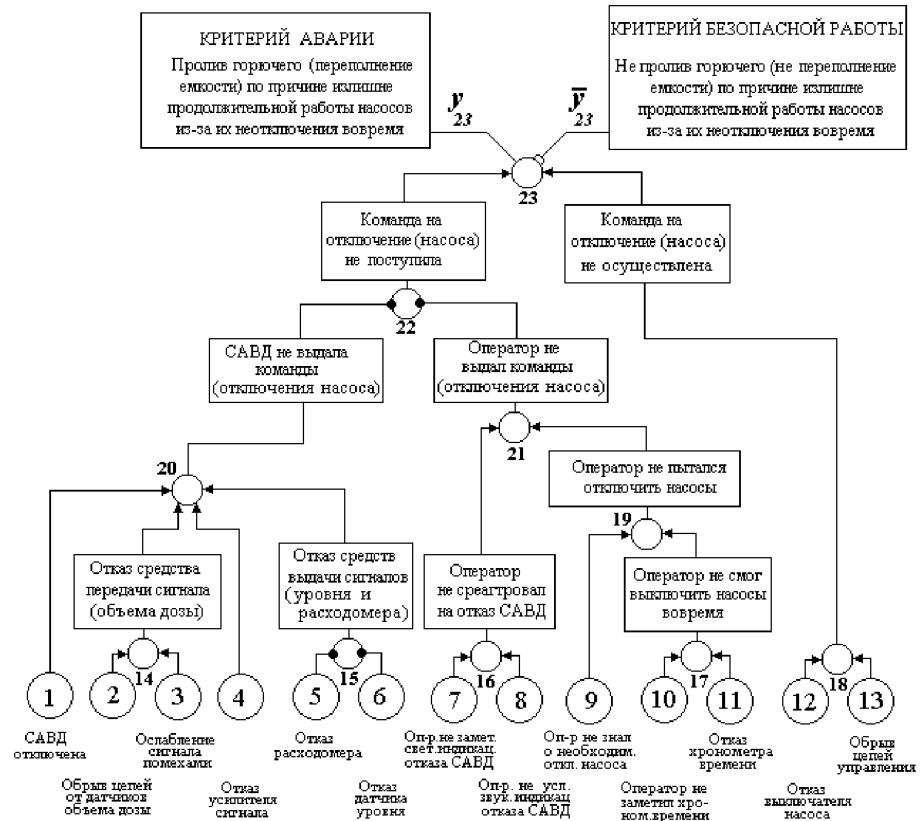


Рис.9. СФЦ заправочной операции

СФЦ на рис.9 подобна дереву отказов, приведенному на рис.8. Внешние отличия заключаются только в том, что логические связки "И" и "ИЛИ" дерева отказов (на рис.8 отмечены номерами 14-23) заменены в СФЦ на рис.9 фиктивными вершинами, с соответствующими конъюнктивными и дизъюнктивными заходящими дугами.

Универсальность аппарата СФЦ позволяет (в отличие от дерева отказов) использовать два выхода фиктивной вершины 23 – прямой  $y_{23}$  и инверсный  $\bar{y}_{23}$ . При этом, прямой выход  $y_{23}$  на рис.9 (как и верхнее событие в дереве отказов на рис.8) является критерием возникновения аварии ( $Y_{AC} = y_{23}$ ), а инверсный выход  $\bar{y}_{23}$  - критерием противоположного функционального события – безаварийного (безопасного) выполнения заправочной операции ( $Y_{безопасности} = \bar{y}_{23}$ ).

Полученные с помощью ПК АСМ логические ФРС составляют:

$$\begin{aligned}
 Y_{AC} = y_{23} = & x_1 \cdot x_7 \vee x_2 \cdot x_7 \vee x_3 \cdot x_7 \vee x_4 \cdot x_7 \vee x_5 \cdot x_6 \cdot x_7 \vee x_1 \cdot x_8 \vee x_2 \cdot x_8 \vee \\
 & \vee x_3 \cdot x_8 \vee x_4 \cdot x_8 \vee x_5 \cdot x_6 \cdot x_8 \vee x_1 \cdot x_9 \vee x_2 \cdot x_9 \vee x_3 \cdot x_9 \vee x_4 \cdot x_9 \vee \\
 & \vee x_5 \cdot x_6 \cdot x_9 \vee x_1 \cdot x_{10} \vee x_2 \cdot x_{10} \vee x_3 \cdot x_{10} \vee x_4 \cdot x_{10} \vee x_5 \cdot x_6 \cdot x_{10} \vee \\
 & \vee x_1 \cdot x_{11} \vee x_2 \cdot x_{11} \vee x_3 \cdot x_{11} \vee x_4 \cdot x_{11} \vee x_5 \cdot x_6 \cdot x_{11} \vee x_{12} \vee x_{13}
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\begin{aligned}
 Y_{\text{безопасности}} = \bar{y}_{23} = & \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_5 \cdot \bar{x}_{12} \cdot \bar{x}_{13} \vee \\
 & \vee \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{x}_3 \cdot \bar{x}_4 \cdot \bar{x}_6 \cdot \bar{x}_{12} \cdot \bar{x}_{13} \vee \\
 & \vee \bar{x}_7 \cdot \bar{x}_8 \cdot \bar{x}_9 \cdot \bar{x}_{10} \cdot \bar{x}_{11} \cdot \bar{x}_{12} \cdot \bar{x}_{13}
 \end{aligned} \tag{25}$$

ФРС (24) включает в себя 27 минимальных пропусковых сочетаний, а ФРС (25) – три минимальных отсечных сочетаний, которые точно совпадают с результатами, приведенными в РД 03-418-01.

С помощью ПК АСМ определены многочлены ВФ и выполнены расчеты вероятностей возникновения аварии (технический риск) и безаварийного выполнения заправочной операции:

$$\begin{aligned}
 P_{AC} = & p1 p7 q12 q13 + q1 p2 p7 q12 q13 + q1 q2 p3 p7 q12 q13 + q1 q2 q3 p4 p7 q12 q13 + \\
 & + q1 q2 q3 q4 p5 p6 p7 q12 q13 + p1 q7 p8 q12 q13 + q1 p2 q7 p8 q12 q13 + q1 q2 p3 q7 p8 q12 q13 + \\
 & + q1 q2 q3 p4 q7 p8 q12 q13 + q1 q2 q3 q4 p5 p6 q7 p8 q12 q13 + p1 q7 q8 p9 q12 q13 + \\
 & + q1 p2 q7 q8 p9 q12 q13 + q1 q2 p3 q7 q8 p9 q12 q13 + q1 q2 q3 p4 q7 q8 p9 q12 q13 + \\
 & + q1 q2 q3 q4 p5 p6 q7 q8 p9 q12 q13 + p1 q7 q8 q9 p10 q12 q13 + q1 p2 q7 q8 q9 p10 q12 q13 + \\
 & + q1 q2 p3 q7 q8 q9 p10 q12 q13 + q1 q2 q3 p4 q7 q8 q9 p10 q12 q13 + \\
 & + q1 q2 q3 q4 p5 p6 q7 q8 q9 p10 q12 q13 + p1 q7 q8 q9 q10 p11 q12 q13 + \\
 & + q1 p2 q7 q8 q9 q10 p11 q12 q13 + q1 q2 p3 q7 q8 q9 q10 p11 q12 q13 + \\
 & + q1 q2 q3 p4 q7 q8 q9 q10 p11 q12 q13 + q1 q2 q3 q4 p5 p6 q7 q8 q9 q10 p11 q12 q13 + \\
 & + p12 + q12 p13 = \underline{0.000029}
 \end{aligned} \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{безопасности}} = & q1 q2 q3 q4 q5 p6 q12 q13 + q7 q8 q9 q10 q11 q12 q13 + \\
 & + q1 q2 q3 q4 q6 q12 q13 - q1 q2 q3 q4 q6 q7 q8 q9 q10 q11 q12 q13 - \\
 & - q1 q2 q3 q4 q5 p6 q7 q8 q9 q10 q11 q12 q13 = \underline{0.999971}
 \end{aligned} \tag{27}$$

На рис.10 приведена диаграмма вкладов показателей надежности отдельных элементов в безопасность выполнения заправочной операции, полученная с помощью ПК АСМ.

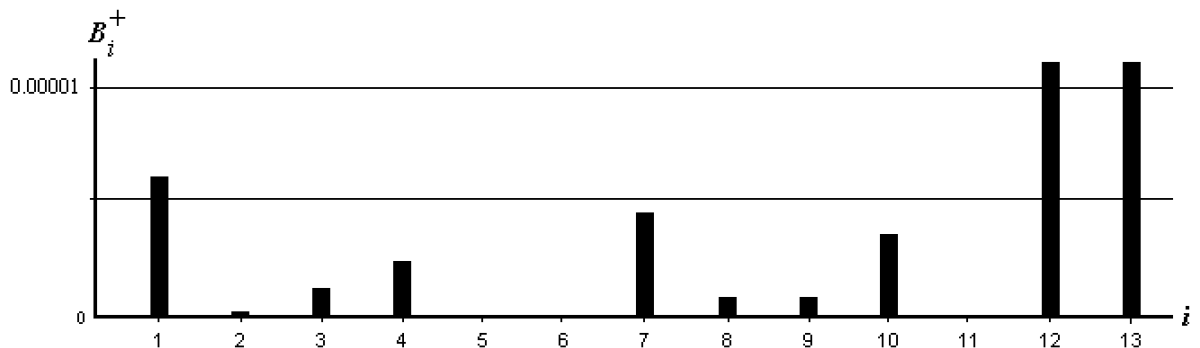


Рис.10. Диаграмма вкладов элементов в безопасность выполнения заправочной операции

