



Управление техническими системами

СКИФ



Авиационный колледж ДГТУ

Лекционный курс

Автор

Смирнов Ю. А.

Ростов-на-Дону,
2019

Аннотация

В учебном пособии представлены основы автоматического регулирования и управления, системы управления летательных аппаратов и оборудования, технические средства автоматизации производства.



Автор

Смирнов Юрий Александрович –

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

Сфера научных интересов – Вычислительная техника
и автоматика

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЛЕКЦИЯ №1	5
по теме: Понятие о САУ. Принципы управления.	5
ЛЕКЦИЯ №2	21
по теме: Основные виды объектов управления. Их описание.....	21
ЛЕКЦИЯ №3	37
по теме: Классификация САУ по целям управления.	37
ЛЕКЦИЯ №4	45
по теме: Частотные характеристики САУ.	45
ЛЕКЦИЯ №5	57
по теме: Временные, операторные и частотные характеристики типовых звеньев. ...	57
ЛЕКЦИЯ №6	71
по теме: Устойчивость непрерывных линейных САУ.	71
ЛЕКЦИЯ №7	91
По теме: Оценки качества переходного процесса	91
ЛЕКЦИЯ №8	106
по теме: Корректирующие устройства и методы их синтеза.	106
ЛЕКЦИЯ №9	127
по теме: Развитие систем управления летательных аппаратов.	127
ЛЕКЦИЯ №10.....	141
по теме: САУ угловым положением ЛА. Автоматическое управление креном.	141
ЛЕКЦИЯ №11.....	169
По теме: САУ Автоматическое управление тангажом	169
ЛЕКЦИЯ №12.....	179
по теме: САУ движением центра масс летательных аппаратов.....	179
Лекция №13.....	198

Управление техническими системами

по теме: Автоматическое управление скоростью и высотой полета летательных аппаратов	198
Лекция № 14	205
по теме: Системы управления оборудованием	205
ЛЕКЦИЯ №15.....	216
по теме: Станки и системы ЧПУ	216
Лекция №16.....	232
по теме: Промышленные роботы и робототехнические системы	232
Лекция № 17	251
по теме: Системы автоматического контроля.	251
Лекция №18.....	264
по теме: Автоматические транспортные системы.....	264
Лекция №19.....	276
по теме: Автоматические складские системы.....	276
Лекция № 20	283
по теме: Примеры автоматизации технологических процессов.....	283
Лекция №21.....	301
по теме: Концепция компьютеризированного интегрированного производства (КИП) и автоматизация технологической подготовки производства в заготовительно-штамповочном производстве.....	301
Литература.....	312

ЛЕКЦИЯ №1

по теме: Понятие о САУ. Принципы управления.

Трудовая деятельность человека началась осознано с выполнения им определенных операций над предметами окружающего мира с помощью рук, ног. Затем он начал использовать некоторые предметы в качестве орудия труда - инструментов. На следующем этапе, который продолжается и сейчас, он эти инструменты начал совершенствовать. Главной целью совершенствования орудий труда долгое время было облегчение самого труда человека. По мере развития человечество создавало все более сложные орудия труда – механизмы и машины, которые выполняли производственные операции, а человеку было достаточно только управлять им. *Этот процесс можно назвать механизацией производства.* В механизированном процессе труда человеку отводится роль управляющего элемента, который контролирует ход процесса и совершает управляющие действия по улучшению этого процесса. Это можно представить в виде схемы, представленной на рис. 1.1.

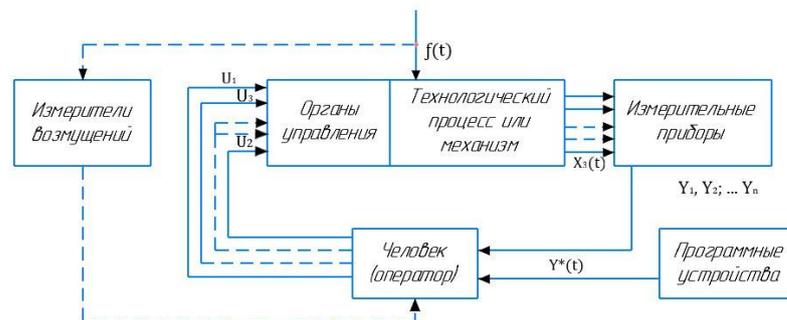


Рис. 1.1. Схема роли человека в механизированном процессе труда

Технологический процесс или работа устройства (представим его прямоугольником) характеризуется некоторыми величинами x_1, x_2, \dots, x_n – параметрами состояния , которые могут изменяться под действием каких-либо воздействий, как внешних так и внутренних. Для контроля за этими величинами создаются специальные измерительные приборы, по показаниям которых человек определяет отклонение технологического процесса от расчетного. Если такие отклонения наблюдаются, то он (человек) управляет технологическим процессом, создавая некоторое **управление** $U(t)$, влияющие на технологический процесс или работу механизма. Таким образом, можно представить, что человек, назовем его **оператором**, знает, как должны изменяться параметры состояния при расчетном режиме, т.е. знает программное изменение во времени

Управление техническими системами

$y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$, и сравнивают измеренные значения с программными. Тогда представим измеряемые величины, если их более одной, вектором размерности k : $[y] = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_k(t)]$, а его программное (расчетное) значение обозначим $[y^*] = [y_1^*, y_2^*, \dots, y_k^*]$. Разность этих векторов назовем – **ошибкой**:

$$[E(t)] = [y^*(t)] - [y(t)]. \quad (1.1)$$

По вектору ошибок оператор формирует управляющие воздействия, которых также может быть несколько, а поэтому охарактеризуем это воздействие вектором $[U(t)]$, имеющего размерность m .

Управляющие воздействия изменяют состояние специальных устройств (рули, заслонки, клапана и т.п.), влияющие на технологический процесс. Назовем эти устройства **органами управления**. Очевидно, что органы управления должны быть сконструированы еще при создании данного технологического процесса или устройства.

Программные значения вектора $[y^*(t)]$ человек может хранить в своей памяти или считывать их с некоторого запоминающегося устройства, куда они записаны заранее. Такое устройство назовем **программным (ПУ)**. Таким образом, человек-оператор измеряет отклонение регулируемых величин – вектор $[y(t)]$, сравнивает их с программными значениями $[y^*(t)]$ и формирует управляющие воздействия, обеспечивающие уменьшение ошибки. Такое управление называется **управлением по отклонению или управлением с отрицательной обратной связью**. Роль обратной связи выполняет оператор.

В тех случаях, когда оператор может измерять некоторые составляющие вектора возмущений $f(t)$, он может формировать управляющие воздействия с учетом возмущений. Это позволяет предупредить возможное отклонение регулируемых параметров $y_i(t)$ под влиянием этих возмущений и повысить точность системы – уменьшить ошибку $[y^*(t)] - [y(t)]$ за счет управляющих сил, противодействующих возмущениям. Такой принцип управления называется **управлением по возмущению**.

По мере усложнения технологических процессов и технических систем, перед операторами ставились все более сложные задачи, которые требовали от них :

Управление техническими системами

- анализа ситуации при получении измерений от увеличивающегося количества измерителей и принятия правильных решений об управлении в условиях ограниченного времени:
- умение оценить аварийные ситуации и принимать грамотные решения, минимизирующий ущерб:
- огромной скорости реагирования при быстросодействующих процессах:
- выполнения однообразных (рутинных, нетворческих) операций при обычном, нормальном функционировании систем.

Кроме того, во многих случаях оператор не может непосредственно управлять процессом или устройством по условиям работы: вредное производство, ракета и т.п. В этих случаях роль оператора должно выполнять некоторое автоматическое устройство – **регулятор**, который сформирует управляющие сигналы и осуществит управление $[U(t)]$. Такой регулятор должен состоять из вычислительного устройства и исполнительных устройств – **приводов**, осуществляющих управляющие воздействия. Система, работающая без человека (после ее включения), называется **системой автоматического управления – САУ**. Ее функциональную схему можно представить в виде рис. 1.2.

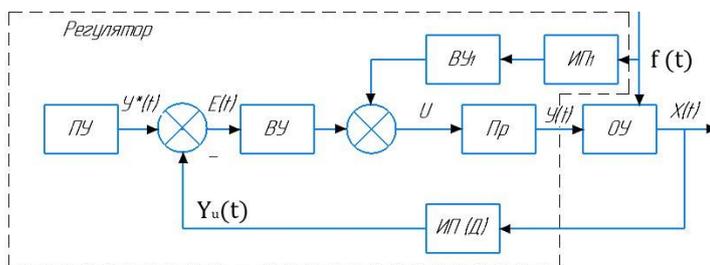


Рис. 1.2. Функциональная схема САУ

где *ОР* – объектом регулирования назовем устройство, управляемое технологическим процессом со своими органами управления;

ПУ – программное устройство, формирующее требуемое значение вектора $y^*(t)$;

ИП(Д) – измерительные преобразователи (датчики), обеспечивающие автоматическое измерение вектора $X(t)$ и преобразующие измерения в

Управление техническими системами

удобную для дальнейшего использования в системе форму – напряжение, ток, разность давлений и т.д.;

СУ – сравнивающее устройство, определяющее разность между программным и измерительным значением вектора параметров состояния процесса, т.е. такое же значение ошибки $E(t) = y^*(t) - y(t)$;

ВУ – вычислительное устройство или формирователь алгоритма управления (*ФАУ*);

Пр – привод – устройство, преобразующее маломощные управляющие сигналы $U(t)$ в отклонения органов управления $\varphi(t)$.

В случаях, когда необходимо и возможно реализовать управления по некоторым возмущениям, создается дополнительный канал - канал управления по возмущениям (показан пунктиром), состоящий из дополнительных измерений *ИП1* и вычислителей *ВУ1*. Управляющие сигналы этого канала $U(t)$ суммируются с сигналом управления регулятора по отклонению. Такая система называется **комбинированной**.

Все устройства, участвующие в формировании управляющих сигналов (*ПУ*, *СУ*, *ИП*, *ВУ*, *ПР* и *ИП*), составляют **регулятор**, который управляет объектом управления. Таким образом, можно сформировать *три основных принципа управления*:

1) **программное управление**, при котором управляющие сигналы $U(t)$ формируются только на основе некоторой заданной программы изменения $y^*(t)$, а обратная связь и измерение возмущений отсутствует, измерительные приборы (*ИП*) используются только при настройке системы.

При этом считается, что возмущения известны с достаточной степенью точности и их влияние учтено в программе управления. Достоинство – простота и дешевизна системы. Недостатки – накопление ошибок, т.е. отклонений $X(t)$ от $X^*(t)$ за счет неточности знания $f(t)$, а также за счет износа и старения элементов регулятора.

2) **управление по возмущению**. При этом вариации $f(t)$ контролируются измерительными преобразователями (*ИП1*) и вносятся поправки в управляющие воздействия с целью компенсации возмущений. Точность такой системы возрастает, но не все возмущения можно измерить.

Управление техническими системами

3) **управления по отклонению**, при котором осуществляется контроль текущего значения вектора состояния системы (процесса) $X(t)$ посредством измерения вектора $Y(t)$, сравнивается с программным значением и по вектору отклонения $E(t)$ формируются управляющие воздействия (управления).

Как следует из вышеприведенных рассуждений возможны и различные сочетания этих принципов управления.

1.1.2. Основные виды объектов управления. Их описание

Объектов управления великое множество. Выделим основные технические объекты:

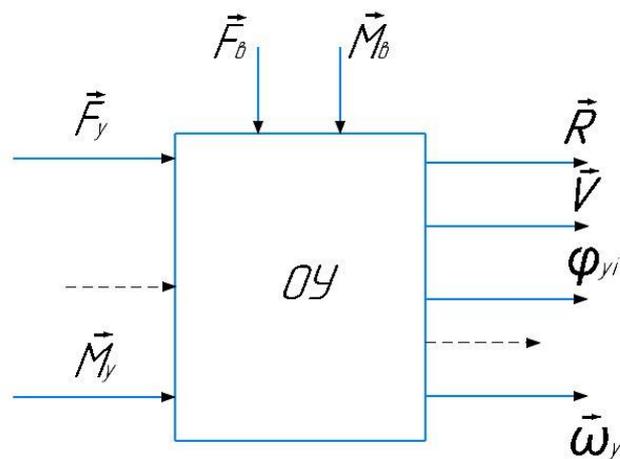


Рис. 1.3. Механические объекты управления

а) **управление движением механических объектов** (рис. 1.3). Для них управляемыми являются координаты перемещения (R), вектора скорости (V), углов поворота (φ) и угловые скорости (ω). Цель управления – желаемая траектория движения, изменение скорости движения во времени. К таким объектам относятся : корабли, самолеты, ракеты, самодвижущиеся тележки, подвижные механизмы станков и роботов и т.п. Управление осуществляется за счет управляющих сил (F_y) и моментов (M_y), которые компенсируют действие возмущающих сил (F_b) и моментов (M_b) и обеспечивают требуемое изменение управляющих координат.

б) **управление электротехническими (электронными) объектами** (рис. 1.4), в которых управляемыми координатами могут быть – изменение напряжения, тока, мощности, электрического поля, магнитной индукции, магнитного потока, а также параметры электрических элементов.

Управление техническими системами

Управление, заключающееся в обеспечении требуемого изменения этих параметров или поддержание их постоянными при действии возмущений $[F_e^{uш}]$, что обеспечивается за счет управляемых источников ЭДС $[E_y(t)]$ и тока $[I_y(t)]$.

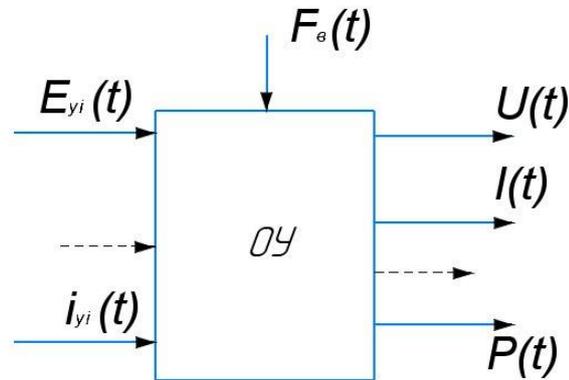


Рис. 1.4. Электротехнические (электронные) объекты управления

в) **управление теплотехническими процессами** (рис. 1.5). Управляемыми величинами являются, как правило, измерительные температуры в различных точках $t_j^o(t)$ объекта или перепады температуры $\theta_j^o(t)$, а управляющими величинами - подвод тепловой энергии в различные устройства системы. Цель управления: стабилизация температуры или ее изменение по некоторой временной или параметрической программе.

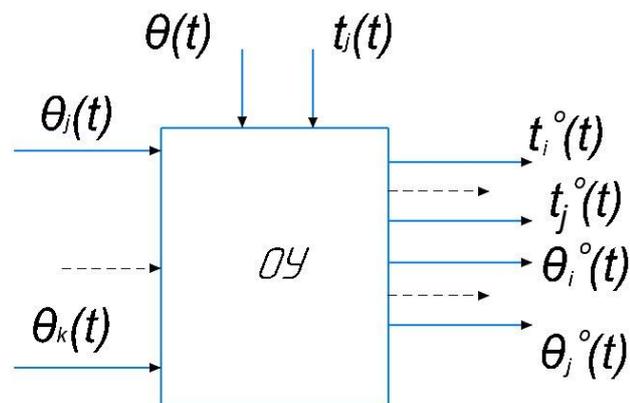


Рис. 1.5. Теплотехнические объекты управления (процессы)

г) **управление химическими биотехнологическими процессами** (рис. 1.6). В таких системах управляемыми величинами (параметрами процесса) являются температура, состав вещества, его химические свойства и т.п. Управляющие величины – изменение подачи вещества, топлива, освещенности, других облучений и прочие. Цель управления – получение продукции определенного качества.

Управление техническими системами

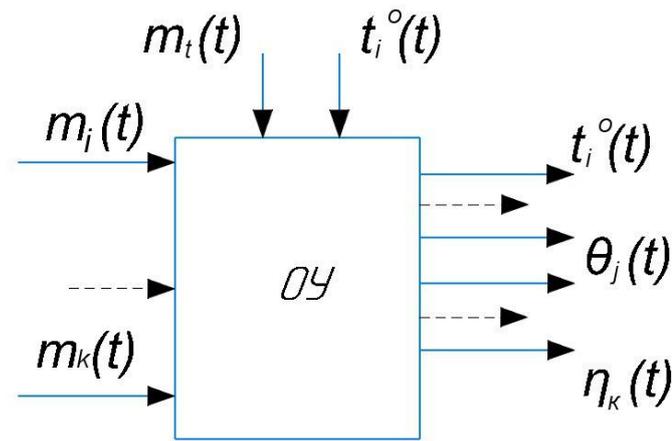


Рис. 1.6. Химические биотехнологические объекты управления (процессы)

На практике часто реализуются смешанные системы, например электро - механические, электро - химические и другие системы, т.е. системы автоматического управления бывают комплексными, но в любом случае при анализе объекта регулирования необходимо определить:

- управляемые (регулируемые) параметры,
- управляющие величины и органы управления,
- программу изменения управляемых (регулируемых) параметров, т.е. цели управления.

Кроме технических систем управления можно выделить объекты и системы управления в биологических организмах и социальных систем. Такие системы являются предметом изучения общей кибернетики.

Описание процессов в САУ являются одной из наиболее сложных задач. С целью обобщения будем считать, что совокупность управляемых параметров можно представить некоторым вектором $[X]$, имеющим размерность n , управляющих величин U также может быть несколько - m . Соответственно, может быть и несколько возмущений, которые описываются вектором $[f]$ размерности p .

Зависимости управляемых (регулируемых) параметров $[X]$ от возмущений $[f]$ и управляющих величин $[U]$ описываются системой нелинейных уравнений

$$F_i\{X, U, f, t\} = 0, \quad (1.2)$$

которые могут представлять системы алгебраических, дифференциальных или интегральных уравнений, если процессы в САУ непрерывны. Если часть

Управление техническими системами

элементов САУ являются дискретными, то для описания процессов в них используют разностные уравнения. Как правило система (1.2) представляет систему нелинейных уравнений, которые для исследования САУ линеаризуют при определенных условиях. Это позволяет существенно упростить исследования. Чаще всего линеаризованную систему уравнений представляют системой дифференциальных уравнений первого порядка

$$\dot{X} = AX + BU + F * f,$$

где X – вектор параметров, размерности n ; U – вектор управления, размерность m ; f – вектор возмущений, размерности p ; A, B, F – соответственно матрицы коэффициентов, определяемые свойством системы.

Если элементы матриц A, B, F постоянные во времени величины, то такие системы называются *стационарными*, или системами с постоянными параметрами. Возмущения f могут быть при этом детерминированными функциями времени, а могут быть и случайными.

Параметры САУ, т.е. составляющие матриц A, B, F , также могут быть функциями времени, и такие системы назовем САУ с **переменными параметрами**. Если же элементы матриц A, B, F изменяются случайным образом, то такие системы называются **стохастическими**.

Для исследований САУ различных типов разрабатываются и различные методики анализа и синтеза САУ, которые рассматриваются в курсе теории автоматического управления (ТАУ):

- методы исследования линейных детерминированных систем для САУ с постоянными параметрами при регулярных и случайных возмущениях;
- методы исследования нелинейности детерминированных систем при регулярных и случайных воздействиях;
- методы исследования дискретных САУ;
- методы исследования стохастических САУ, т.е. систем со случайно меняющимися параметрами матриц A, B, F .

1.1.3. Классификация САУ по целям управления

Классификация систем автоматического регулирования (САР) представлена на рис. 1.7.

Управление техническими системами



Рис. 1.7. Классификация САР

Классификация САУ по характеру изменения величин:

- 1) Системы непрерывного действия;
- 2) Системы импульсного действия с модуляцией (амплитудная – АМ, фазовая – ФМ, частотная – ЧМ, широтно-импульсная – ШИМ, частотно-импульсная – ЧИМ);
- 3) Системы дискретного действия (01001011110101100010101);
- 4) Системы релейного действия.

Классификация САУ по математическим признакам:

- Линейные системы;
- Нелинейные системы;
- Существенно нелинейные.

Классификация САУ по способу настройки:

1. Не адаптивные системы
2. Адаптивные системы:
 - ❖ Системы с переменной структурой,
 - ❖ Системы с самонастройкой программы,
 - ❖ Системы с самонастройкой параметров,
 - ❖ Системы с самонастройкой структуры.

Классификация САУ по типу ошибки в статике:

1. Статические САУ,
2. Астатические САУ.

Классификация САУ по алгоритмам функционирования (по назначению):

1. Системы стабилизации;

Управление техническими системами

2. Системы слежения;
3. Системы программного управления;
4. Системы телеуправления;
5. Системы самонаведения (снаряда), сопровождения (орудия), автопилотирования;
6. Системы компенсационных измерений.

СТАБИЛИЗАЦИЯ

Системы поддержания постоянства управляемой величины называют **системы стабилизации**. Цель функционирования этих систем можно записать в виде $X(t) = X_0(t) = const$.

Системы регулирования по отклонению имеют очень важную особенность: если регулятор состоит только из элементов, осуществляющих обычные аналитические преобразователи, то есть обладающих гладкими статическими характеристиками, регулирование по отклонению может уменьшить, но не устранить ошибку управления.

Рассмотрим систему, представленную на рис. 1.8.

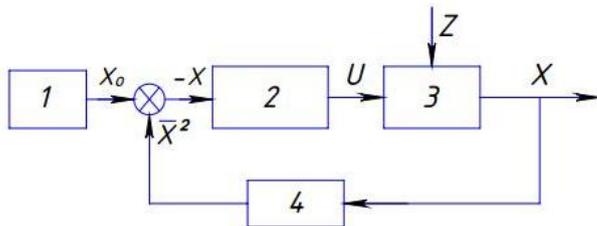


Рис. 1.8. Блок-схема статической системы

Уравнения статики системы имеют вид:

$$X = k_0 U + k_z Z,$$

$$U = k_p \Delta X = k_p (X_0 + X),$$

$$X^2 = k_{oc} X,$$

где k_{oc}, k_p, k_0, k_z – постоянные коэффициенты, называемые соответственно коэффициентами усиления объекта, регулятора, нагрузки и обратной связи.

Из предыдущей системы уравнений путем подстановки можно получить следующие отношения:

$$X = k_0 k_p (X_0 - k_{oc} X) = k_z Z,$$

$$X (1 + k_0 k_p k_{oc}) = k_0 k_p X_0 + k_z Z,$$

$$X = \left(k_0 k_p / (1 + k_0 k_p k_{oc}) \right) X_0 + \left(k_z / (1 + k_0 k_p k_{oc}) \right) Z.$$

Управление техническими системами

Таким образом, значение регулируемой величины зависит от нагрузки возмущения Z , уменьшая при ее возрастании.

Регулирование, при котором установившаяся ошибка $\Delta X = X_0 - X$ зависит от нагрузки, называется *статическим*.

Полученное выражение можно рассматривать в безразмерных отклонениях $\varphi = \Delta X / X_{min}$ и $X = \Delta Z / Z_{НОМ}$,

где $\Delta X = X - X_{min}$; $\Delta Z = Z - Z_{НОМ}$. При этом вводится понятие статизма, который равен относительной крутизне регулировочной характеристики

$$\delta = -dx / d\lambda .$$

Если регулировочная характеристика прямолинейна (рис. 1.9), то:

$$\delta = + \frac{\Delta \varphi_{max}}{\Delta \lambda_{max}} = \frac{(X_{max} - X_{min})}{X_{min}} \cdot \frac{X_{max} - X_{min}}{Z_{НОМ} - 0} .$$

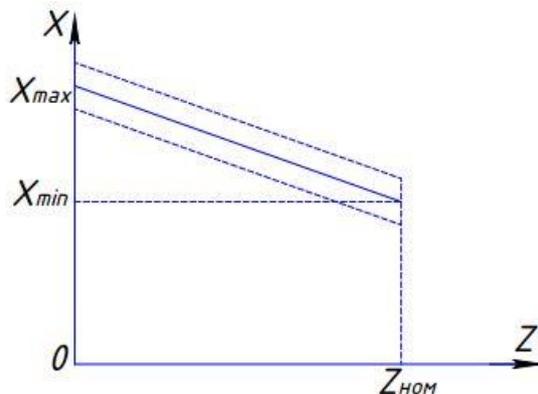


Рис. 1.9. Регулировочная характеристика

Статизм – это величина относительной статической ошибки при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной.

Если статическая ошибка недопустима, то используют метод управления, при котором она, из-за структурных особенностей системы, равна нулю. Такое регулирование называется *астатическим*.

Для получения астатического регулирования необходимо устранить жесткую зависимость между управляющим и регулируемым сигналом. Для этого в цепь управления вводят астатическое звено, которое описывается уравнением:

$$U = k \int \Delta x dt \text{ или } du / dt = k \Delta x .$$

Управление техническими системами

Регулировочная характеристика идеального астатического регулирования представляет собой прямую линию, параллельную оси нагрузки (рис. 1.10):

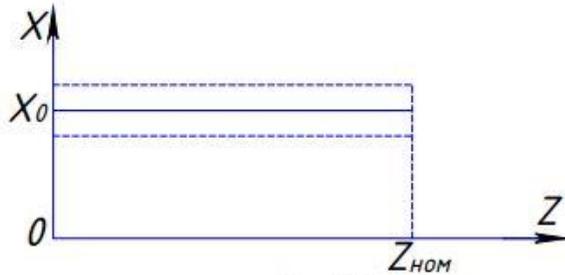


Рис. 1.10. Регулировочная характеристика идеального астатического регулирования

ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

Алгоритм функционирования при программном управлении задан и поэтому в таких системах существует специальное устройство, задающее изменение регулируемой величины по заданной программе $X^*(t)$. Управление этого вида можно осуществить по любому фундаментальному принципу или по их комбинации. Обычно используют два вида систем программного управления: *системы с временной программой* и *параметрической программой*. В первом случае задатчик вырабатывает непосредственно $X^*(t)$. Движение рабочего органа во втором случае осуществляется по заданной в пространстве траектории, причем закон движения во времени мало существенен. Этот способ управления в свою очередь можно разделить на два вида. Первый из них состоит в том, что движение по каждой пространственной координатной оси выполняется *отдельным приводом*. Движение по одной из осей принимается равномерным, а остальные перемещения указываются с первым таким образом, чтобы обеспечить требуемую траекторию.

Второй способ заключается в том, что требуемая траектория описывается при помощи системы параметрических уравнений, а не относительно времени, а затем решающее устройство задает скорость движения по отдельным осям этой системы.

СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ

В следящих системах алгоритм функционирования заранее не известен. Регулируемая величина должна воспроизводить изменение некоторого внешнего фактора, то есть отслеживать его. Например наведения орудия по движущейся цели. Системы такого вида могут быть выполнены в соответствии с любым фундаментальным принципом управления. От систем программного управления

Управление техническими системами

следящие системы отличаются тем, что вместо задатчика программы в ней будет использовано устройство слежения за изменением внешнего фактора.

СИСТЕМЫ С ПОИСКОМ ЭКСТРЕМУМА

ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА (рис. 1.11)

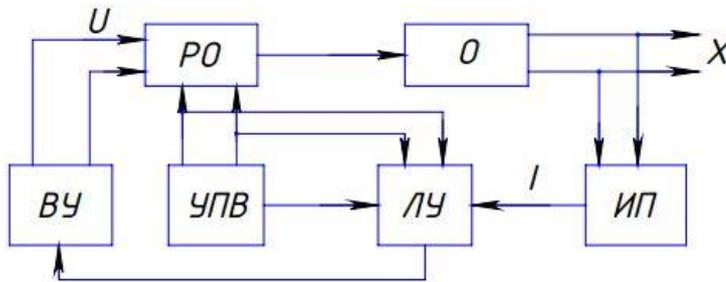


Рис. 1.11. Система с поиском экстремума показателя качества:

ИПЭ – измерительно-преобразовательный элемент; ЛУ – логическое устройство; ВУ – вычислительное устройство; РО – регулирующий орган; УПВ – устройство пробных воздействий; О – объект управления

Для многих процессов показатель качества может быть выражен в любой момент времени функцией текущих координат системы. Управление можно считать оптимальным, если оно обеспечивает поддержание этого показателя в точке экстремума.

Если точка настройки под действием каких-либо факторов окажется смещенной неизвестно в каком направлении, следует воздействовать на регулятор, чтобы вернуться к ней. Поэтому экстремальное управление начинают с поиска, т.е. выполняют пробные движения в каком-либо направлении, а затем анализируют реакцию системы на эти пробы. По результатам анализа вырабатывают управляющие воздействия, приближающее систему к экстремуму.

Для поиска экстремума необходим чувствительный элемент, обнаруживающий экстремум. Один из способов обнаружения экстремума функции одной переменной $y = F(x)$ состоит в измерении производной dy/dx . Необходимое и достаточное условие обнаружения экстремума:

$$dy/dx = 0, d^2y/dx^2 < 0 \text{ для max};$$

$$dy/dx = 0, d^2y/dx^2 > 0 \text{ для min}.$$

Управление техническими системами

Вычислительное устройство программируется на основе следующих методов: Гаусса-Зайделя, градиента, наискорейшего спуска и других, то есть ВУ представляет собой микроЭВМ. Прямой метод определения производной трудно реализуем, поэтому используют метод анализа знаков, способ запоминания наибольшего и наименьшего значения из ряда измерений. В рабочей зоне системы может оказаться несколько экстремумов, а названные позволяют обнаружить только один из них, то есть локальный экстремум. Для нахождения глобального экстремума необходимо посмотреть всю рабочую область, сравнивая между собой локальные экстремумы. В этих системах измеряется значение управляемой величины, значит они относятся к классу систем управления по замкнутому контуру.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ (рис. 1.12)

В управлении динамическими системами оптимизация существенна для переходных процессов, в которых показатель эффективности зависит не только от текущих значений координат, но и от характера их изменения в прошлом, настоящем и будущем. Этот показатель или критерий управления выражается некоторым функционалом от координат, их производных и времени.

Нахождение оптимального управления требует решения задачи методами вариационного исчисления. Поэтому основной составляющей системы оптимального управления становится микроЭВМ.

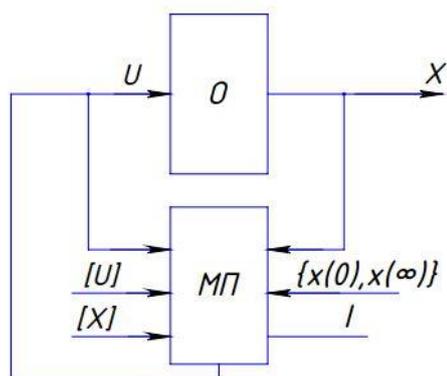


Рис. 1.12. Структура системы оптимального управления

На вход микроЭВМ (микропроцессора МП) поступает информация о текущих значениях координат X с выхода объекта, об управляющих воздействиях U , о внешних воздействиях Z . Кроме этого, задаются граничные условия $X(0), X(\infty)$ и критерий оптимальности J . А также информация о допустимых значениях $\{U\}, \{X\}$. Вычислительное устройство определяет

оптимальное управление $U(t)$. Эти системы могут быть как разомкнутыми, так и замкнутыми.

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ (рис. 1.13)

Очень часто внешние возмущения приводят к изменению не только координат, но и параметров системы. Изменение параметров могут приводить не только к потере качества функционирования системы, но и к полной потере ее работоспособности. Иногда в рамках принятого изначального принципа управления невозможно устранить потерю качества. Это можно сделать путем изменения параметров, а иногда и структуры системы.

Системы, автоматически изменяющие значение своих параметров или структуры на основании анализа состояния так, чтобы сохранялось качество ее работы, называются *адаптивными системами* (т.е. приспособляющимися). Адаптивные системы с изменением параметров настройки иногда называют *самонастраиваемыми*, а системы с изменением структуры и алгоритма управления – *самоорганизующимися*.

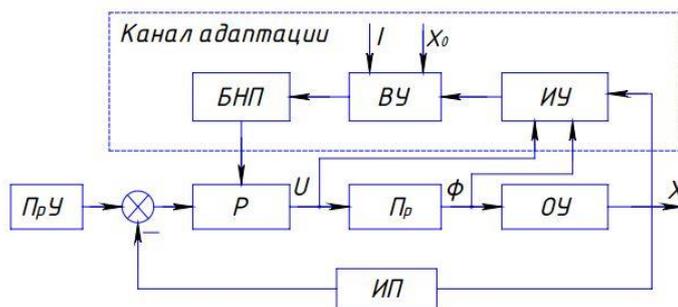


Рис. 1.13. Структура адаптивной системы:

БНП – блок настройки параметров; ИУ – измерительное устройство; ВУ – вычислительное устройство;

P – регулятор; ПрУ – программное устройство

Обычно адаптивная система содержит в качестве «ядра» контур, реализующий фундаментальный принцип управления, а контур адаптации пристраивается как вторичный. Он обычно состоит из устройства измерения ИУ, управления УУ и может быть как разомкнутым, так и замкнутым.

1.1.4. Понятие информационного процесса

Из анализа видов систем автоматического управления очевидно следует, что основой любого управления является сбор информации о состоянии объекта управления. Таким образом, информационный процесс является неотъемлемой частью процесса управления.

Управление техническими системами

Информационным называют процесс, который представляет собой следствие установления связи между двумя материальными объектами. Один из них является источником или генератором информации, другой ее приемник. С философской точки зрения природа информации связана с всеобщим свойством отражения. Отражение - это результат воздействия одной материальной системы на другую. Это воспроизведение особенностей или изменений одной системы в другую. Отражение может трактоваться как модель системы. Существует два подхода к определению информации: философский и кибернетический. Первый подход, называемый атрибутивным, основан на том, что информация присутствует во всех материальных системах. Неорганической природе тоже присуще свойство отражения, а где есть отражение, есть передача информации. Второй подход или предполагает, что информация свойственна лишь живым существам, обществу, кибернетическим устройствам. Другим важным понятием является сигнал. Сигнал – это материальный носитель информации (предмет, явление, процесс). Кибернетический подход допускает в качестве сигнала лишь тот процесс, который способен измерить внутреннюю модель внешнего мира некоторой самоорганизующейся системой. Таким образом, в любой самоорганизующейся системе имеется отражающая подсистема, которую называют информационной системой.

Особым видом сигналов являются знаки, которые в отличие от естественных сигналов создаются самоорганизующейся системой для передачи и хранения информации. Любой информационный процесс содержит три составляющие: рецептация, интерпретация и коммуникация (рис. 1.14).

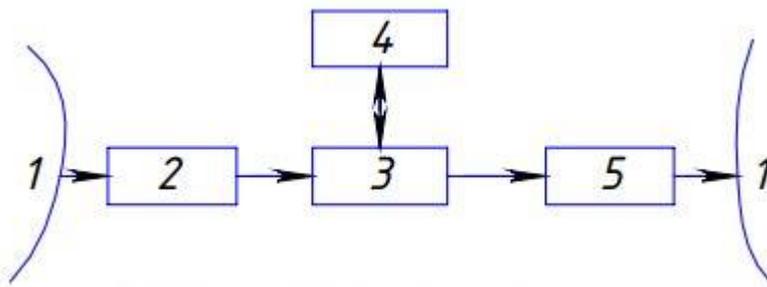


Рис. 1.14. Функциональная схема информационного процесса

Внешний мир (1) воздействует на подсистему восприятия информации (2) (рецептативная система). Подсистема (2) отбирает информацию не от всех взаимодействующих с ней физических процессов, а лишь от значимых в смысле некоторого критерия. Интерпретирующая подсистема производит обработку информации (3) и производит поднастройку модели внешнего мира (4).

Подсистема коммуникации (5) осуществляет передачу обработанной блоком (3) информации во внешний мир.

ЛЕКЦИЯ №2

по теме: Основные виды объектов управления. Их описание.

Чтобы составить уравнения динамики системы автоматического управления или регулирования, система разбивается на звенья. Затем рассматривается каждое звено системы в отдельности (рис. 1.1).

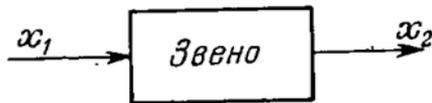


Рис. 1.1

Рис. 1.1. Обозначение звена системы

Входная x_1 и выходная x_2 величины соответствуют физическим величинам, выражающим воздействие предыдущего звена на данное звено (x_1) и воздействие данного звена на последующее (x_2). Например, в электродвигателе следящей системы роль величины x_1 будет играть напряжение в цепи возбуждения, x_2 - угловая скорость вала. Для самолета x_1 - угол поворота руля, x_2 - отклонение оси самолета по курсу.

Звено системы может являться техническим устройством любой физической природы, конструкции и назначения. Поэтому составление уравнения динамики каждого конкретного звена системы является предметом рассмотрения соответствующей конкретной области технических наук (электротехники, теплотехники, динамики полета и т. п.), к которой и следует каждый раз обращаться. Допустим, что в результате составления уравнения динамики какого-нибудь конкретного звена получилось линейное дифференциальное уравнение второго порядка

$$a_0 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + a_1 \frac{dx_2}{dt} + a_2 x_2 = b_0 \frac{dx_1}{dt} + b_1 x_1. \quad (1.3)$$

В теории автоматического регулирования принято приводить уравнение звена к стандартному виду в символической записи

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)x_2 = k_1(\tau_1 p + 1)x_1, \quad (1.4)$$

где p обозначает операцию дифференцирования ($p = \frac{d}{dt}$).

Здесь введены *постоянные времени*, которые в данном случае будут

$$T_1 = \frac{a_1}{a_2}, T_2^2 = \frac{a_0}{a_2}, \tau_1 = \frac{b_0}{b_1}$$

и *коэффициент усиления* (передаточное число) звена

$$k_1 = \frac{b_1}{a_2}.$$

Очевидны следующие размерности этих постоянных:

$$T_1 [c], T_2^2 [c^2], \tau_1 [c], k_1 \left[\frac{\text{разм.} x_2}{\text{разм.} x_1} \right].$$

В установившемся состоянии, когда $x_1 = \text{const}$ и $x_2 = \text{const}$, получаем из (1.4) уравнение

$$k_1 \left[\frac{\text{разм.} x_2}{\text{разм.} x_1} \right]$$

и соответствующую ему линейную *статическую характеристику* звена (рис. 1.16), причем коэффициент усиления k_1 определяет крутизну наклона этой характеристики ($k_1 = \text{tg} \alpha$ с учетом размерностей x_2 и x_1). Условимся в дальнейшем на статических характеристиках писать крутизну k_1 (коэффициент усиления), как показано на рис. 1.16, б, вместо обозначения угла.

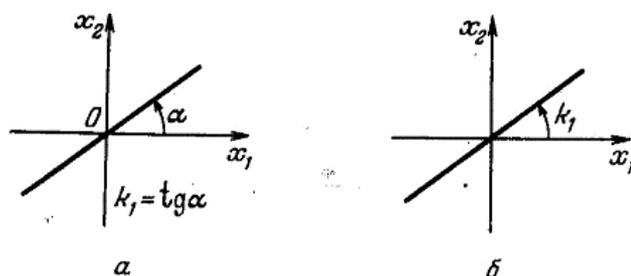


Рис. 1.16. Статическая характеристика звена

Управление техническими системами

Линеаризация уравнения звена. В общем случае при составлении уравнения динамики звена системы оно оказывается нелинейным

$$F(x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2) = 0. \quad (1.5)$$

Обычно при исследовании процесса регулирования уравнение звена можно линеаризовать (для тех случаев, когда этого сделать нельзя, используются методы теории нелинейных систем). Линеаризация уравнения динамики звена (1.5) основана на том, что в процессе регулирования все величины мало отклоняются от их программных значений — иначе система не выполнила бы своей задачи и не была бы системой регулирования или управления.

Допустим, что установившиеся (программные) значения переменных x_1 и x_2 являются постоянными x_1^0, x_2^0 . Тогда можно записать

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1^0 + \Delta x_1(t), & \dot{x}_1 &= \Delta \dot{x}_1, \\ x_2 &= x_2^0 + \Delta x_2(t), & \dot{x}_2 &= \Delta \dot{x}_2, & \ddot{x}_2 &= \Delta \ddot{x}_2, \end{aligned}$$

где символом Δ обозначены отклонения в процессе регулирования.

Из (1.5) можно записать уравнение звена в установившемся состоянии

$$F(x_1^0, 0, x_2^0, 0, 0) = 0. \quad (1.6)$$

Разложив левую часть уравнения (1.5) в ряд Тейлора, получим

$$F^0 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^0 \Delta x_1 + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_1}\right)^0 \Delta \dot{x}_1 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^0 \Delta x_2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_2}\right)^0 \Delta \dot{x}_2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{x}_2}\right)^0 \Delta \ddot{x}_2 + \dots = 0$$

где нуликом сверху обозначена подстановка $(x_1^0, 0, x_2^0, 0, 0)$.

Вычитая из данного выражения уравнение (1.6) и отбросив все последующие члены разложения как малые высшего порядка, придем к линейному уравнению динамики звена в виде (1.3), если опустить значки Δ и понимать под x_1 и x_2 отклонения, причем

$$a_0 = \left(\frac{\partial F}{\partial \ddot{x}_2}\right)^0, \quad a_1 = \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_2}\right)^0, \quad a_2 = \left(\frac{\partial F}{\partial x_2}\right)^0, \quad b_0 = -\left(\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_1}\right)^0, \quad b_1 = -\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^0.$$

После этого можно перейти к стандартной записи (1.4).

Такому способу линеаризации поддаются те нелинейные уравнения, для которых возможно разложение в ряд Тейлора. Линеаризацию уравнений можно

производить и графически, если имеется, например, зависимость $F(x_1)$ при постоянном $x_2 = x_2^0$ и $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \ddot{x}_2 = 0$ (рис. 1.17). Проведя касательную к заданной кривой $F(x_1)$ в точке x_1^0 , найдем тангенс угла наклона касательной β , что с учетом масштабов даст значение коэффициента $\left(\frac{\partial F}{\partial x_1}\right)^0$.

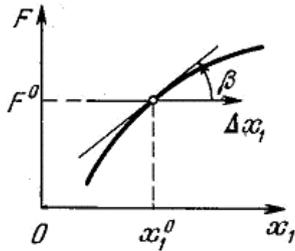


Рис. 1.17

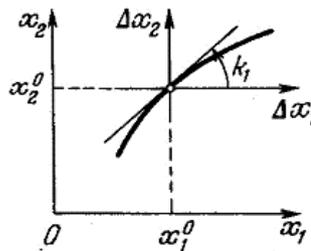


Рис. 1.18

Аналогично, если задана нелинейная статическая характеристика звена $x_2 = f(x_1)$, ее можно линеаризовать путем проведения касательной (рис.1.18), сведя таким образом к линейной (рис.1.16).

Передаточная функция звена. Ее определение дается на базе преобразования Лапласа. Запишем преобразования Лапласа для выходной и входной величин звена:

$$X_2(s) = L\{x_2(t)\} = \int_0^{\infty} x_2(t)e^{-st} dt, \quad X_1(s) = L\{x_1(t)\}.$$

Пусть даны начальные условия

$$x_2(0) = x_{20}, \quad \left(\frac{dx_2}{dt}\right)_{t=0} = \dot{x}_{20}, \quad x_1(0) = x_{10}.$$

Тогда

$$L\left\{\frac{dx_1}{dt}\right\} = sX_1 - x_{10}, \quad L\left\{\frac{dx_2}{dt}\right\} = sX_2 - x_{20}, \quad L\left\{\frac{d^2x_2}{dt^2}\right\} = s^2X_2 - sx_{20} - \dot{x}_{20}.$$

Применив это преобразование к дифференциальному уравнению звена

$$T_2^2 \frac{d^2x_2}{dt^2} + T_1 \frac{dx_2}{dt} + x_2 = k \left(\tau_1 \frac{dx_1}{dt} + x_1 \right),$$

получим

$$X_2 = \frac{k_1(\tau_1 s + 1)}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1} X_1 + \frac{B(s)}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}, \quad (1.7)$$

где через $B(s)$ обозначен многочлен, включающий в себя все члены с величинами начальных условий. *Передаточной функцией звена $W(s)$ называется отношение изображений Лапласа выходной и входной величин, т. е.*

$$W(s) = \frac{X_2(s)}{X_1(s)}, \quad (1.8)$$

при нулевых начальных условиях. В данном случае согласно (1.7) имеем

$$W(s) = \frac{k_1(\tau_1 s + 1)}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}. \quad (1.9)$$

Сравнивая полученное выражение (1.9) с дифференциальным уравнением звена (1.4), видим, что формально передаточную функцию звена можно составлять как отношение операторных многочленов правой и левой частей уравнения звена. И наоборот, зная передаточную функцию (1.9) звена, легко написать его дифференциальное уравнение, имея в виду, что числитель передаточной функции соответствует правой части уравнения (1.4), а знаменатель передаточной функции (1.9) — левой части уравнения (1.4).

В общем случае передаточная функция звена имеет вид

$$W(s) = \frac{k_{1N}(s)}{L(s)}, \quad (1.10)$$

где $N(s)$ и $L(s)$ - многочлены с коэффициентами 1 в младших членах, причем степень $N(s)$, как правило, ниже степени $L(s)$.

Дифференциальное уравнение звена. В общем случае в соответствии с (1.10) уравнение звена можно представить в форме

$$L(p)x_2 = k_1 N(p)x_1 \quad \left(p = \frac{d}{dt} \right).$$

Характеристическое уравнение звена имеет вид

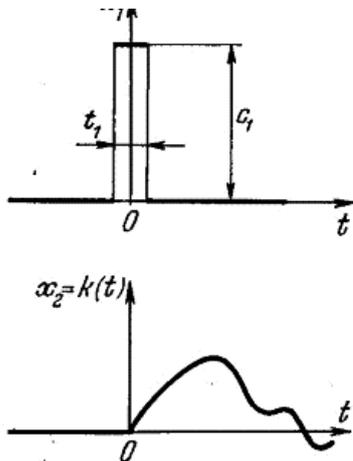
$$L(\lambda) = 0,$$

так что корни λ_i характеристического уравнения звена являются полюсами его передаточной функции.

Весовая функция звена. Весовой функцией звена $k(t)$ называется оригинал (т.е. обратное преобразование Лапласа) передаточной функции, а именно:

$$k(t) = L^{-1}\{W(s)\} = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} W(s)e^{st} ds = \sum_{i=1}^n \operatorname{Res}_{s=s_i} [W(s)e^{st}] ,$$

где s_i - все полюса передаточной функции $W(s)$. Иногда вместо $k(t)$ применяют обозначение $\omega(t)$. В этой формуле Res обозначает вычеты (см. теорию функций комплексного переменного).



Поскольку при нулевых начальных условиях согласно (1.10) $X_2(s) = W(s)X_1(s)$, то в случае, если $X_1 = 1$, т. е. если $x_1(t) = \delta(t)$ — дельта-функция, будет иметь место равенство $x_2(t) = k(t)$.

Известно, что δ -функция представляет собой единичный мгновенный импульс (рис. 1.19), для которого $t_1 \rightarrow 0$, $c_1 \rightarrow \infty$, причем площадь $t_1 c_1 = 1$.

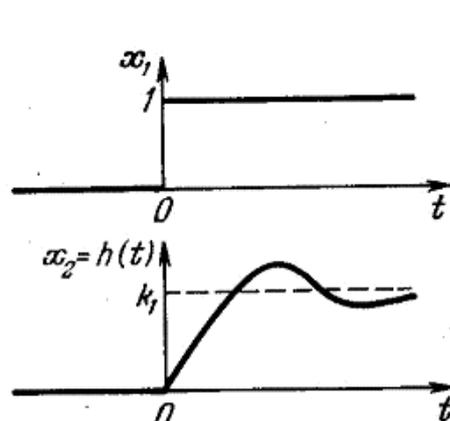
Рис. 1.19. δ - и весовая функции звена

Следовательно, физический смысл весовой функции звена есть реакция звена на единичный мгновенный импульс, поданный на вход звена. Иначе говоря, *весовая функция $k(t)$ представляет собой переходный процесс* на выходе звена (рис.1.19) при подаче на его вход единичного импульса. Поэтому весовую функцию часто называют *импульсной переходной функцией*. Зная весовую функцию звена $k(t)$, можно определить его передаточную функцию:

$$W(s) = L\{k(t)\}. \tag{1.11}$$

Переходная функция звена. *Переходной функцией $h(t)$ называется реакция звена на единичное ступенчатое воздействие* (рис. 1.20), т. е. переходный процесс на выходе x_2 при единичном скачке $\mathbf{1}(t)$ на входе звена x_1 . Следовательно, здесь имеем

откуда



$$X_1(s) = L\{\mathbf{1}(t)\} = \frac{1}{s},$$

$$X_2(s) = W(s)X_1(s),$$

$$x_2(t) = h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{1}{s} W(s) \right\}.$$

Рис. 1.20. Единичная и весовая функции

Поскольку известно, что (имея в виду обобщенные функции) $\delta(t) = \frac{d1(t)}{dt}$,

то можно написать следующее соотношение между весовой и переходной функциями звена:

$$k(t) = \frac{dh(t)}{dt}.$$

Частотные характеристики звена. Частотными характеристиками называются формулы и графики, характеризующие реакцию звена на синусоидальное входное воздействие в установившемся режиме, т. е. вынужденные синусоидальные колебания звена.

Если на вход звена подается (рис. 1.21)

$$x_1 = \sin \omega t,$$

то на выходе будет (в установившемся режиме)

$$x_2 = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где A – амплитуда (точнее, усиление амплитуды), а φ — фаза (точнее, сдвиг по фазе).

Применяется символическая запись синусоидальных колебаний в виде

$$x_1 = e^{j\omega t}.$$

Строго говоря, $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$, что геометрически изображается вращающимся единичным вектором (рис. 1.22). Проекции последнего на прямоугольные оси дают $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$.

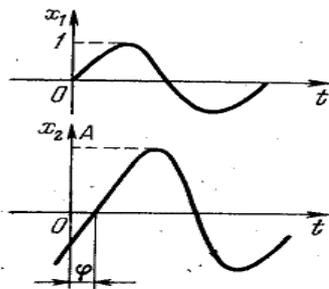


Рис. 1.21

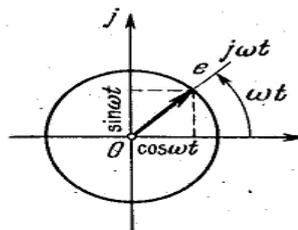


Рис. 1.22

Поэтому для суждения о вынужденных синусоидальных колебаниях звена достаточно формально исследовать реакцию звена на символический сигнал $e^{j\omega t}$. Пусть, например, уравнение звена имеет вид

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)x_2 = k_1(\tau_1 p + 1)x_1.$$

Используем символическую запись:

$$x_1 = e^{j\omega t}, \quad px_1 = j\omega e^{j\omega t}, \quad x_2 = Ae^{j(\omega t + \varphi)}, \quad px_2 = Aj\omega e^{j(\omega t + \varphi)},$$

$$p^2 x_2 = A(j\omega)^2 e^{j(\omega t + \varphi)}.$$

Подставив эти величины в уравнение звена, получим

$$\left[T_2^2 (j\omega)^2 + T_1 (j\omega) + 1 \right] Ae^{j[\omega t + \varphi]} = k_1 (\tau_1 j\omega + 1) e^{j\omega t},$$

откуда

$$Ae^{j\varphi} = \frac{k_1 (\tau_1 j\omega + 1)}{T_2^2 (j\omega)^2 + T_1 (j\omega) + 1}.$$

Сравнивая это выражение с передаточной функцией данного звена (1.9) видим, что

$$Ae^{j\varphi} = [W(s)]_{s=j\omega} = W(j\omega). \quad (1.12)$$

Отсюда находим

$$A = |W(j\omega)|, \quad \varphi = \arg W(j\omega). \quad (1.13)$$

В общем виде согласно (1.10) имеем

$$W(j\omega) = \frac{k_1 N(j\omega)}{L(j\omega)}.$$

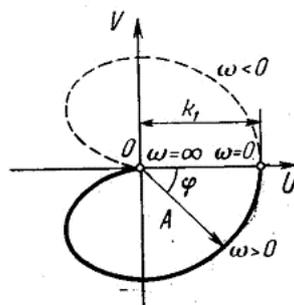


Рис. 1.23. Годограф функции $W(j\omega)$

Выражение (1.12) представляет амплитудно-фазовую частотную характеристику звена. Иногда $W(j\omega)$ называют частотной передаточной функцией звена. Выражения (1.13) называются соответственно амплитудной

Управление техническими системами

частотной характеристикой звена и фазовой частотной характеристикой звена. Графически амплитудно-фазовая частотная характеристика (1.12) изображается: на комплексной плоскости (рис. 1.23) в полярных координатах (A , φ), как годограф функции $W(j\omega)$. Можно строить амплитудно-фазовую частотную характеристику и в прямоугольных координатах (U , V) (рис. 1.23), выделив в выражении $W(j\omega)$ вещественную и мнимую части:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega).$$

При этом $U(\omega)$ называют *вещественной частотной характеристикой*, а $V(\omega)$ — *мнимой*.

Заметим, что угол φ показан на рис. 1.23 как отрицательный (отложен по часовой стрелке), поскольку чаще всего реакция на выходе звена имеет отставание по фазе по сравнению с входной величиной.

При этом частоту ω изменяют от 0 до ∞ (сплошная кривая на рис. 1.23) или же от $-\infty$ до $+\infty$, когда добавляется еще симметричная к ней пунктирная кривая. Симметрия кривых при $\omega < 0$ и $\omega > 0$ объясняется тем, что передаточная функция $W(s)$ согласно (1.22) есть отношение многочленов (дробно-рациональная функция). Поэтому

$$W(-j\omega) = \overline{W(j\omega)},$$

т.е.

$$U(-\omega) = U(\omega), \quad V(-\omega) = -V(\omega),$$

где чертой сверху обозначено комплексно-сопряженное выражение.

Графики амплитудной и фазовой частотных характеристик (1.13) тоже изображаются графически (рис. 1.24), причем амплитуда является четной функцией, т.е. $A(-\omega) = A(\omega)$, а фаза — нечетной функцией, т.е. $\varphi(-\omega) = -\varphi(\omega)$.

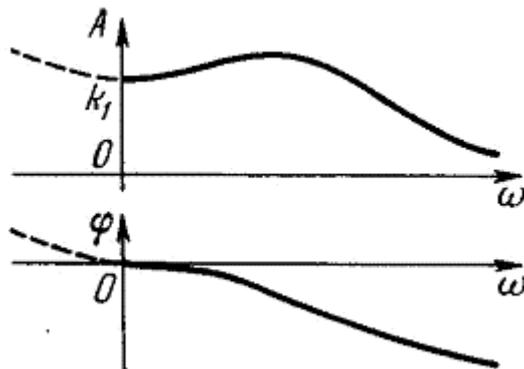


Рис. 1.24. АЧХ и ФЧХ

Логарифмические частотные характеристики. В практических применениях чаще всего амплитудную и фазовую частотные характеристики изображают в логарифмическом масштабе. Впоследствии увидим, что такие логарифмические частотные характеристики очень удобны для инженерных расчетов.

При построении логарифмической амплитудной частотной характеристики (ЛАЧХ) по оси ординат откладывают величину

$$Lm(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)|, \quad (1.14)$$

единицей измерения для которой является децибел. По оси абсцисс откладывается частота $\omega \left[\frac{1}{c} \right]$ в логарифмическом масштабе (рис. 1.25).

Равномерной единицей на оси абсцисс является декада — любой отрезок, на котором значение частоты ω увеличивается в десять раз. Точка пересечения ЛАХ с осью абсцисс называется частотой среза ω_c .

Начало координат обычно помещают в точке $\omega=1$, так как $\lg 1=0$. Точка же $\omega=0$ лежит в $-\infty$. Однако в зависимости от интересующего нас диапазона частот можно начало координат брать в другой точке ($\omega=0,1$; $\omega=10$ или др.). Важно иметь в виду, что ось абсцисс ($Lm=0$) согласно (1.14) соответствует значению $A=1$, т.е. прохождению амплитуды сигнала через звено в натуральную величину. Верхняя полуплоскость ЛАХ соответствует значениям $A>1$ (усиление амплитуды), а нижняя полуплоскость — значениям $A<1$ (ослабление амплитуды).

При построении логарифмической фазовой частотной характеристики (ЛФХ) отсчет углов φ идет по оси ординат в обычном масштабе в угловых градусах (рис. 1.25). По оси абсцисс откладывается по-прежнему частота ω в логарифмическом масштабе.

Между частотными характеристиками и весовой функцией существуют соотношения, определяемые из (1.11) подстановкой $s = j\omega$, а именно:

$$W(j\omega) = \int_0^{\infty} k(t) e^{-j\omega t} dt, \quad k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W(j\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Эти формулы представляют собой известные преобразования Фурье.

Управление техническими системами

Как видим, все рассмотренные виды динамических характеристик звеньев (передаточная функция, дифференциальное уравнение, весовая функция, переходная функция, амплитудно-фазовая частотная характери-

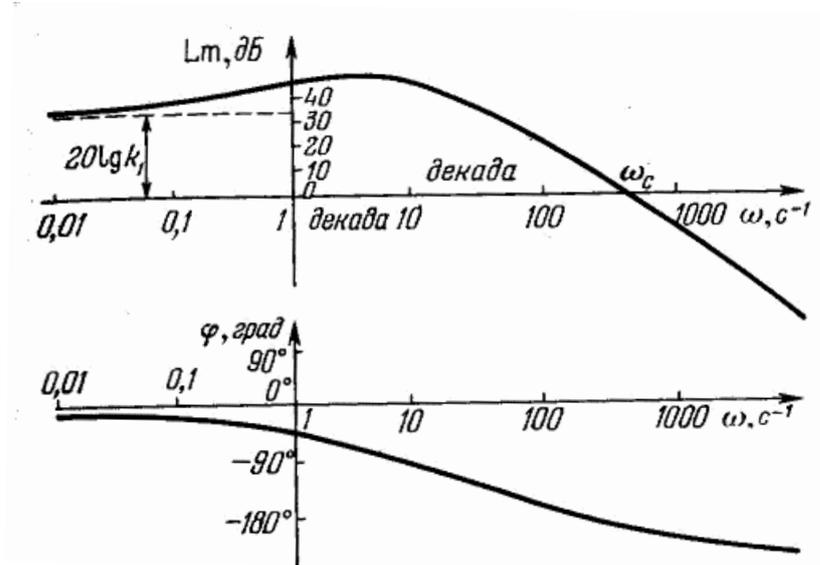
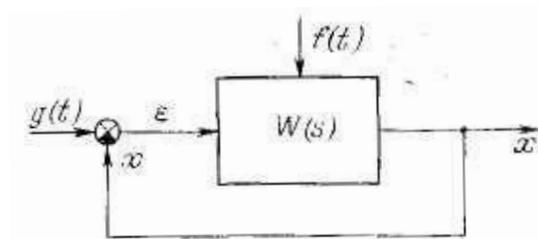


Рис. 1.25. Логарифмические АЧХ и ФЧХ

ка) связаны между собой определенными зависимостями. Поэтому все они эквивалентны друг другу в определении динамических свойств звена системы управления.

1.2.2. Передаточные функции и уравнения замкнутой системы

Из цепи звеньев любой сложности, показанной здесь одним прямоугольником (рис. 1.26), получается замкнутая система при помощи единичной



отрицательной обратной связи. Эту обратную связь называют *главной* в отли

Рис. 1.26. Блок-схема САУ с единичной отрицательной связью

чие от местных обратных связей, которые могут быть, как мы видели, внутри в составе разомкнутой цепи звеньев. Пусть имеются (рис. 1.26) внешние воздействия: $g(t)$ — задающее и $f(t)$ — возмущающее. В общем случае могут быть

Управление техническими системами

введены несколько возмущающих воздействий, приложенных в разных местах системы.

Задана передаточная функция разомкнутой цепи

$$\frac{X}{E} = W(s) \quad (1.15)$$

в виде отношения многочленов с единичными коэффициентами при младших членах, т.е.

$$W(s) = \frac{KN(s)}{L(s)}, \quad (1.16)$$

где K — общий коэффициент усиления разомкнутой цепи.

Передаточные функции замкнутой системы записываются отдельно для каждой комбинации входа и выхода, а значит, и для каждого внешнего воздействия в отдельности.

Разделим каналы прохождения сигналов в системе от каждого внешнего воздействия. Возмущающее воздействие $f(t)$ может быть приложено в любом месте. Но, используя второе правило структурных преобразований, всегда можно выделить ту часть схемы, через которую проходят сигналы от $f(t)$ на выход x . Это показано на рис. 1.27 в виде передаточной функции $M(s)$.

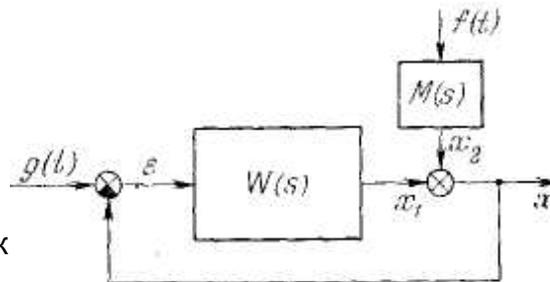


Рис. 1.27. Блок схема САУ с возмущающим воздействием

Для задающего воздействия $g(t)$ схема прохождения сигналов сохраняется в полном виде $W(s)$. На выходе имеем формально

$$x = x_1 + x_2$$

(на самом деле $M(s)$ входит в общую схему как часть $W(s)$).

Основные соотношения, следовательно, в изображениях по Лапласу будут иметь вид

$$E = G - X, \quad (1.17)$$

$$X = W(s)E + M(s)F. \quad (1.18)$$

В расчетах автоматических систем применяют три основные вида передаточных функций замкнутой системы.

Управление техническими системами

1. Главная передаточная функция замкнутой системы (при $f(t) = 0$):

$$\Phi(s) = \frac{X}{G}.$$

Из формулы (1.17) и (1.18) при $F = 0$ имеем

$$X = W(s)(G - X),$$

откуда

$$\Phi(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)} = \frac{KN(s)}{L(s) + KN(s)}. \quad (1.19)$$

Последнее вытекает из формулы (1.16).

2. Передаточная функция замкнутой системы для ошибки (при $f(t) = 0$)

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{E}{G}.$$

По формуле (1.17) получаем $\frac{E}{G} = \frac{G - X}{G} = 1 - \Phi(s),$

откуда $\Phi_\varepsilon(s) = \frac{1}{1 + W(s)} = \frac{L(s)}{L(s) + KN(s)}. \quad (1.20)$

3. Передаточная функция замкнутой системы по возмущающему воздействию (при $g(t) = 0$):

$$\Phi_f(s) = \frac{X}{F}.$$

Из формул (1.17) и (1.18) при $G = 0$ имеем

$$\frac{X}{F} X = W(s)(-X) + M(s)F,$$

откуда

$$\Phi_f(s) = \frac{M(s)}{1 + W(s)} = \frac{R(s)}{L(s) + KN(s)}, \quad (1.21)$$

где $R(s) = L(s)M(s)$, причем многочлен $R(s)$ зависит от места приложения возмущающего воздействия. Заметим, что поскольку при $g(t) = 0$ имеем $E = -X$, то передаточная функция замкнутой системы для ошибки по возму-

щающему воздействию $\Phi_{\varepsilon f}(s) = \frac{E}{F}$ будет той же, что и для регулируемой

величины $\Phi_f(s)$ с точностью до знака.

Управление техническими системами

Важно отметить, что знаменатель всех видов передаточной функции замкнутой системы один и тот же.

Для замкнутой системы в целом (рис. 1.21) имеем

$$X = \Phi(s)G + \Phi_f(s)F = \frac{W(s)}{1+W(s)}G + \frac{M(s)}{1+W(s)}F$$

или
$$X = \frac{KN(s)}{L(s) + KN(s)}G + \frac{R(s)}{L(s) + KN(s)}F$$

Умножая все на общий знаменатель и переходя к оригиналам, получим дифференциальное уравнение замкнутой системы для регулируемой величины x в виде

$$[L(p) + KN(p)]x = KN(p)g(t) + R(p)f(t). \quad (1.22)$$

Итак, зная передаточные функции звеньев системы, можно чисто алгебраическим путем найти общее дифференциальное уравнение всей замкнутой системы в целом при любой ее сложности. В этом состоит, в частности, одно из важных практических преимуществ использования аппарата передаточных функций.

Фигурирующие здесь операторные многочлены $L(p)$ и $KN(p)$ соответствуют знаменателю и числителю передаточной функции разомкнутой цепи $W(p)$, а операторный многочлен $R(p)$ зависит от места приложения возмущающего воздействия $f(t)$.

Дифференциальное уравнение замкнутой системы (1.22) записывают также в виде

$$D(p)x = KN(p)g(t) + R(p)f(t), \quad (1.23)$$

где

$$D(p)x = L(p) + KN(p). \quad (1.24)$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы будет

$$D(\lambda) = 0 \text{ или } L(\lambda) + KN(\lambda) = 0. \quad (1.25)$$

Очевидно, что корни $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, n)$ этого характеристического уравнения равны полюсам передаточной функции замкнутой системы (1.19).

Как видим, порядок дифференциального уравнения замкнутой системы (1.23), как и разомкнутой цепи определяется степенью n многочлена $L(p)$ (так

как степень $N(p)$ ниже). Однако коэффициенты обоих уравнений существенно отличны друг от друга за счет прибавления многочлена $KN(p)$. Поэтому и все динамические свойства процессов в замкнутой системе будут существенно отличаться от таковых в разомкнутой цепи, состоящей из тех же самых звеньев.

В развернутом виде в обычной записи уравнение динамики замкнутой системы (1.23) получает вид

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx}{dt} + a_n x = f_1(t),$$

где

$$f_1(t) = b_0 \frac{d^m g(t)}{dt^m} + \dots + b_m g(t) + \beta_0 \frac{d^r f(t)}{dt^r} + \dots + \beta_r f(t).$$

На основании передаточных функций (1.20) и (1.21) с изменением знака последней можно выразить ошибку замкнутой системы, точнее ее изображение по Лапласу, в виде

$$E = \Phi_\varepsilon(s)G - \Phi_f(s)F$$

и записать дифференциальное уравнение замкнутой системы для ошибки

$$[L(p) + KN(p)]\varepsilon = L(p)g(t) - R(p)f(t).$$

Здесь левая часть уравнения, а значит, и характеристическое уравнение, остаются теми же, что и для регулируемой величины (1.22). Правая же часть меняется существенно перед задающим воздействием, а перед возмущающим воздействием меняется только знак. Физически это понятно, ибо все изменения регулируемой величины под влиянием возмущающего воздействия включаются целиком в ошибку.

Уравнение замкнутой системы может быть записано и иначе — в виде системы уравнений звеньев типа (1.4), обычно второго и первого порядка (но возможно и более высокого для некоторых звеньев). Однако уравнение второго порядка всегда можно привести к двум уравнениям первого порядка. Например, положив для простоты в (1.2) $b_0 = 0$ и обозначив

$$\frac{dx_2}{dt} = x_3,$$

получим

$$a_0 \frac{dx_3}{dt} = b_1 x_1 - a_2 x_2 - a_1 x_3.$$

Управление техническими системами

Представив в аналогичном виде уравнения всех звеньев, запишем уравнения динамики замкнутой системы в нормальной форме Коши

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n, \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n, \\ \frac{dx_n}{dt} &= a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \dots + a_{nn}x_n. \end{aligned} \quad (1.27)$$

причем в правых частях не обязательно входят все n переменных. Поэтому многие коэффициенты здесь будут нулями. В некоторые уравнения добавятся справа еще задающее $g(t)$ и возмущающее $f(t)$ воздействия.

Характеристическое уравнение этой системы имеет вид

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{12} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (1.28)$$

или в развернутом виде

$$a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1}\lambda + a_n = 0.$$

Заметим, что фигурирующие здесь n переменных (x_1, x_2, \dots, x_n) называют *координатами состояний данной системы*. Их число равно общему порядку системы n . Каждая совокупность конкретных числовых значений всех этих координат характеризует состояние системы в определенный момент времени. Как видно из составления уравнений (1.27) координаты состояния x_i не обязательно все соответствуют реальным физическим величинам воздействий между звеньями системы. Часть из них могут вводиться, искусственно. Это фактически координаты математической модели системы.

Система уравнений (1.27) может быть записана в матричной форме

$$\frac{dx}{dt} = Ax, \quad (1.29)$$

а характеристическое уравнение (1.28) соответственно в виде

$$\det[A - \lambda E] = 0, \quad (1.30)$$

где x — вектор-столбец всех координат состояния, A — матрица коэффициентов, E — единичная матрица, т. е.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \text{L} \\ x_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \text{L} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \text{L} & a_{2n} \\ \text{L} & \text{L} & \text{L} & \text{L} \\ a_{n1} & a_{n2} & \text{L} & a_{nn} \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \text{L} & 0 \\ 0 & 1 & \text{L} & 0 \\ \text{L} & \text{L} & \text{L} & \text{L} \\ 0 & 0 & \text{L} & 1 \end{bmatrix}.$$

Согласно этим обозначениям краткая запись (1.29) расшифровывается подробно в виде (1.27), а запись (1.30) — в виде (1.28), что соответствует также другой краткой записи $D(\lambda) = 0$, примененной выше в (1.25).

ЛЕКЦИЯ №3

по теме: Классификация САУ по целям управления.

1. Составление структурных схем САУ

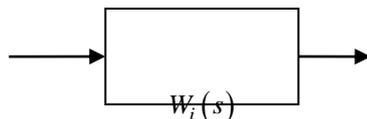
Структурные схемы САУ состоят из отдельных функциональных элементов и отражают в наглядной форме состав и функциональные связи между отдельными функциональными элементами.

С помощью структурных схем удается:

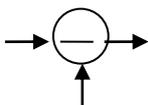
1. Уточнить внутреннее строение системы.
2. Найти место включения дополнительных элементов и связей, улучшающих качество динамических процессов, происходящих в системе.
3. Получить расчетные схемы, удобные для расчетов САУ соответствующими методами анализа и синтеза.

В структурных схемах используются следующие обозначения функциональных элементов:

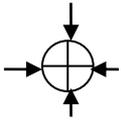
1. Элемент системы (статический или динамический)



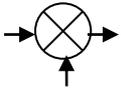
2. Сравнивающий элемент



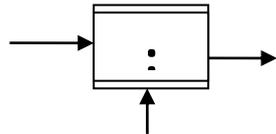
3. Сумматор



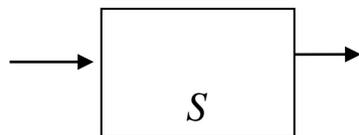
4. Блок перемножения



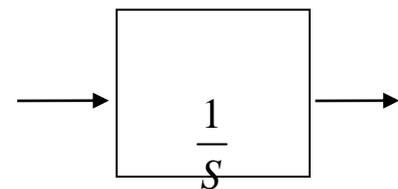
5. Блок деления



6. Блок дифференцирования

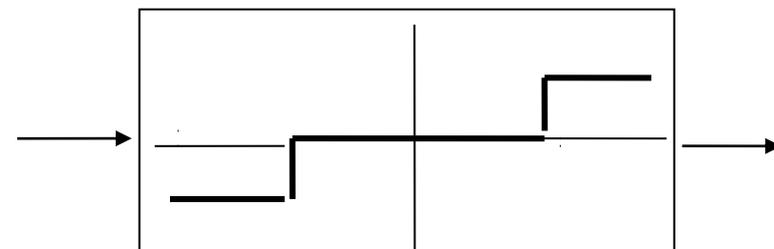


7. Блок интегрирования

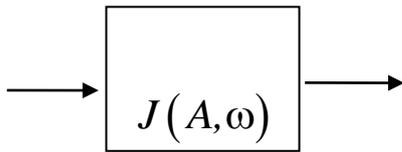


8. Линии связей -----

9. Нелинейные элементы



10. Эквивалентные нелинейные элементы



Последовательность составления структурных схем САУ:

1. Составляется функциональная схема САУ, состоящая из отдельных функциональных элементов.
2. Динамика поведения каждого функционального элемента описывается дифференциальными уравнениями.
3. По дифференциальным уравнениям динамики поведения каждого функционального элемента составляется его передаточная функция, которая может состоять из передаточных функций нескольких звеньев, включенных параллельно или последовательно в зависимости от того, в каком виде представлено выражение передаточной функции элемента:

Если ПФ элемента представлена в виде выражения

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{K(p)}{D(p)} = \frac{k_m \prod_{i=1}^n (p - q_i)}{d_n \prod_{i=1}^n (p - p_i)}, \quad (1)$$

где p_i – полюсы и q_i – нули функции $W(p)$, соответствующие корням уравнений $D(p) = 0$ и $K(p) = 0$, не имеющих одинаковых значений, а значит и дробь (1) не может быть сокращена,

то ее можно заменить последовательным соединением инерционных, колебательных и форсирующих звеньев в зависимости от значений нулей и полюсов числителя и знаменателя ПФ элемента.

3.2. Если ПФ элемента (1) с помощью разложения на элементарные дроби м. б. преобразована к виду

$$W(p) = \sum_{i=1}^n \frac{K(p_i)}{D'(p_i)(p - p_i)} = \frac{K(0)}{D(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{pK(p_i)}{p_i D'(p_i)(p - p_i)}, \quad (2)$$

где функция $W(p)$ не имеет кратных полюсов, то ее можно заменить параллельным соединением инерционных и колебательных звеньев, причем число последних равно числу пар комплексно-сопряженных полюсов.

Управление техническими системами

3.3. Если ПФ многосвязного элемента представляет собой матрицу передаточных функций, например с двумя входными и выходными сигналами

$$W_{ik}(p) = \begin{vmatrix} W_{11}(p) & W_{12}(p) \\ W_{21}(p) & W_{22}(p) \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где

$$W_{11}(p) = \frac{K_{11}(p)}{D_1(p)}; \quad W_{12}(p) = \frac{K_{12}(p)}{D_1(p)};$$

$$W_{21}(p) = \frac{K_{21}(p)}{D_2(p)}; \quad W_{22}(p) = \frac{K_{22}(p)}{D_2(p)},$$

соответствующие системе уравнений

$$Y_1(p) = W_{11}(p)X_1(p) + W_{12}(p)X_2(p)$$

$$Y_2(p) = W_{21}(p)X_1(p) + W_{22}(p)X_2(p),$$

то структурная схема м. б. представлена из звеньев $W_{ik}(p)$ в виде рис. 1.

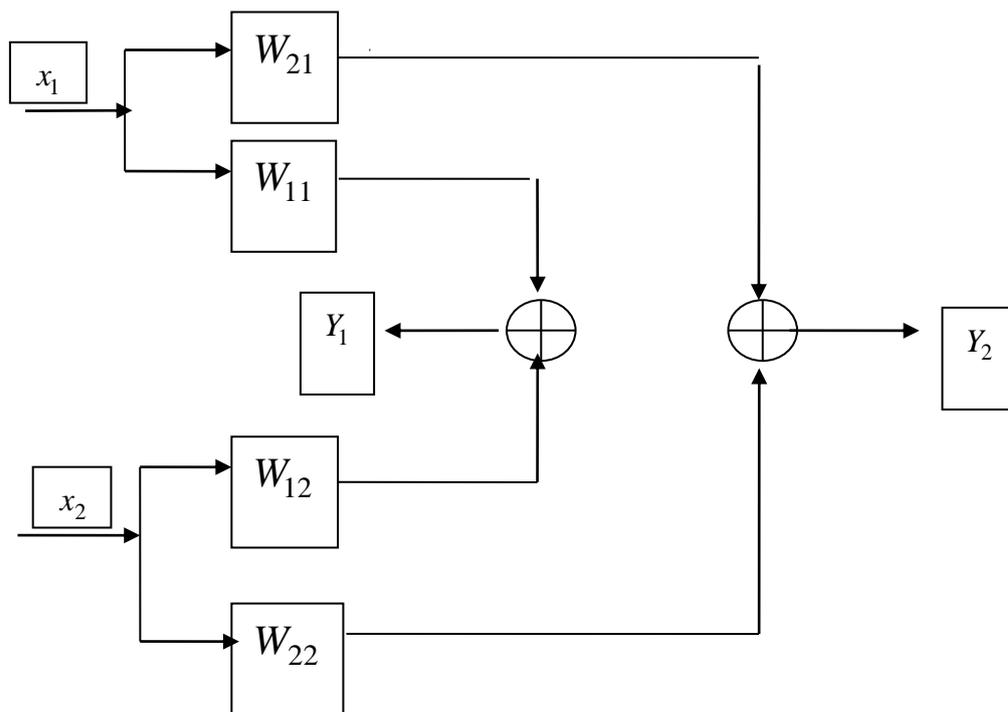


Рис. 1.

4. Зная передаточную функцию каждого из звеньев структурной схемы, по известным правилам соединения звеньев легко составить зависимость между управляемыми величинами и всеми внешними воздействиями САУ.

В результате составления структурной схемы САУ, она может иметь сложную структуру, характеризующуюся:

- последовательным соединением звеньев;
- параллельным соединением звеньев;
- прямыми связями;
- обратными связями;
- перекрестными связями;
- многосвязностью;
- многоконтурностью.

Поэтому возникает необходимость преобразования структурных схем.

1. Преобразование структурных схем

Для удобства расчетов автоматических систем бывает необходимо преобразовать структурную схему системы к какому-либо желаемому виду. Например, для построения логарифмических частотных характеристик, как мы видели, наиболее удобно иметь цепь последовательно соединенных звеньев.

Приведем здесь некоторые простейшие правила, пользуясь которыми можно производить преобразования структуры разомкнутой цепи системы автоматического управления к желаемому виду.

1. Можно использовать *любую из трех формул* (2.1), (2.2), (2.3) для разных случаев соединения звеньев:

- последовательно соединенных звеньев

$$W(s) = \prod_{i=1}^n W_i(s); \quad (2.1)$$

- параллельно соединенных звеньев

$$W(s) = \frac{Y}{X} = \sum_{i=1}^n W_i(s); \quad (2.2)$$

- с местной обратной связью

$$W(s) = \frac{W_1(s)W_2(s)W_3(s)}{1 + W_{i\bar{n}}(s)W_2(s)}. \quad (2.3)$$

Пусть, например, задана структурная схема цепи звеньев в виде рис. 2.7. Тогда, пользуясь формулами (2.2) и (2.3), ее можно преобразовать к цепи последовательно соединенных звеньев (рис. 2.8), где

$$W_8(s) = W_3(s) + W_4(s), \quad W_9(s) = \frac{W_6(s)}{1 + W_{\text{вн}}(s)W_6(s)},$$

а затем написать и общую передаточную функцию всей цепи

$$W(s) = W_1(s)W_2(s)W_8(s)W_5(s)W_9(s)W_7(s).$$

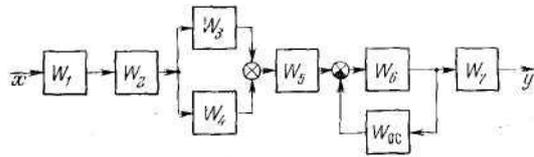


Рис. 2.7

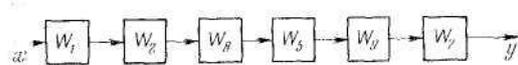


Рис. 2.8

2. Можно формально *переносить* внешнее воздействие вперед или назад по цепи таким образом, чтобы не менялась передача сигнала на выход этой цепи. Например, если внешнее воздействие приложено как показано на рис. 2.9, а, то его можно перенести по цепи вперед, добавив передаточную

функцию тех звеньев, через которые сделан перенос (W2, рис. 2.9,б).

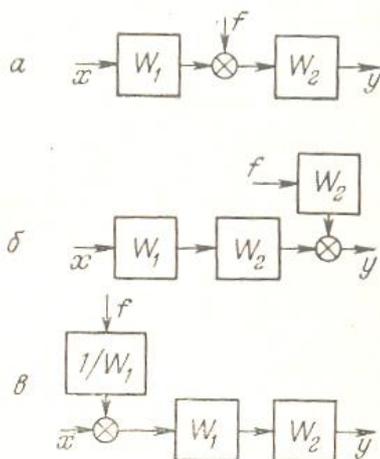


Рис. 2.9

При переносе внешнего воздействия по цепи назад следует добавлять передаточную функцию, $\left(\frac{1}{W_1}, \text{рис. 2.9, в}\right)$, обратную передаточной функции звеньев, через которые сделан перенос.

Очевидно, что пользуясь этими правилами, мы сохраняем передачу сигнала от внешнего воздействия f на выход системы.

3. Последовательно соединенные звенья можно менять местами без изменения общей передаточной функции цепи. Это следует из формулы (2.1).

4. Можно производить перенос звена *параллельного контура* вперед или назад по цепи с соответствующими добавлениями. Например, разветвление к звену W3 параллельного контура в схеме рис. 2.10, а можно перенести вперед по

Управление техническими системами

цепи, добавив передаточную функцию, обратную передаточной функции звеньев, через которые был сделан перенос

При переносе же его по цепи назад надо добавить передаточную функцию тех звеньев, через которые был сделан перенос (W_1 , д.д.н. 2.10, а)

5. Переноса место включения звена обратной связи (рис. 2.11, а) вперед или назад, поступаем точно так же, как и в предыдущем случае (соответственно рис. 2.11, б и в).

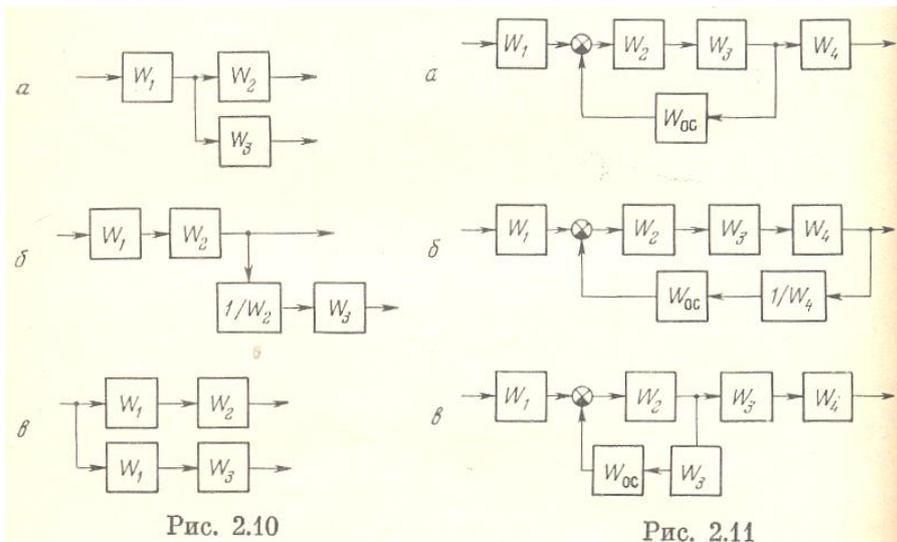


Рис. 2.10

Рис. 2.11

Ограничимся этими основными правилами структурных преобразований. По аналогии с ними можно производить желаемые преобразования любых структурных схем.

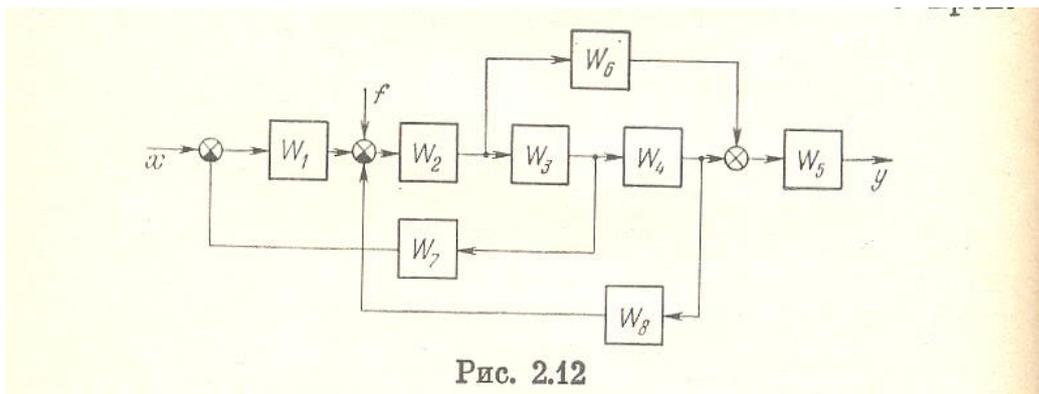


Рис. 2.12

Приведем пример получения общей передаточной функции сложной разомкнутой цепи (рис. 2.12) с использованием структурных преобразований.

Первый шаг преобразования показан на рис. 2.13, где, согласно правилам 4 и 5, имеем

$$W_9(s) = \frac{W_6(s)}{W_3(s)}, \quad W_{10}(s) = W_4(s)W_8(s)$$

и, кроме того, по правилу 2 сделан перенос назад внешнего воздействия f .

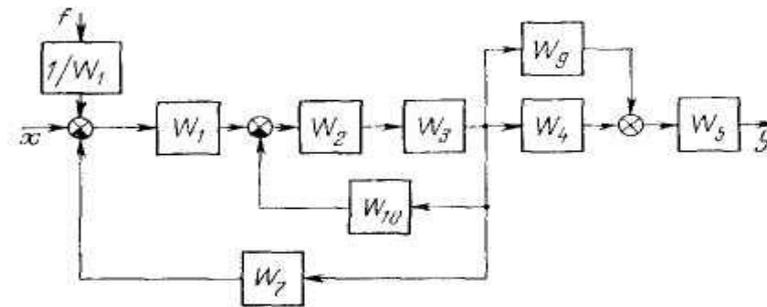


Рис. 2.13

Второй шаг преобразования изображен на рис. 2.14, где, согласно правилу 1, получаем

$$W_{11}(s) = \frac{W_1(s)W_2(s)W_3(s)}{1 + W_{10}(s)W_2(s)W_3(s)} = \frac{W_1(s)W_2(s)W_3(s)}{1 + W_2(s)W_3(s)W_4(s)W_8(s)},$$

$$W_{12}(s) = W_4(s) + W_9(s) = \frac{W_3(s)W_4(s) + W_6(s)}{W_3(s)}$$

Наконец, на основании схемы рис. 2.14 находим окончательно общие передаточные функции всей разомкнутой цепи по каждой из двух входных

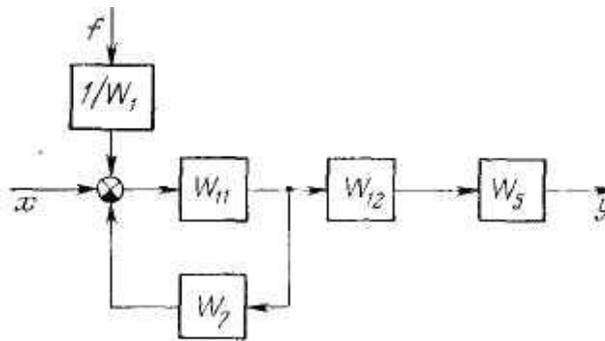


Рис. 2.14

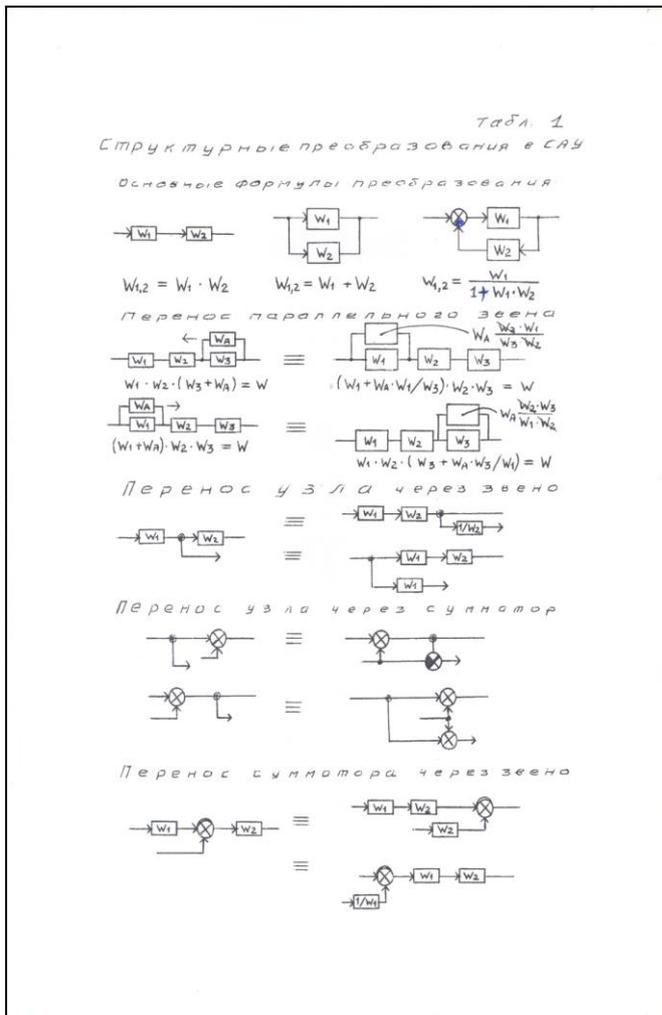
величин x и f

отдельно

$$W_x(s) = \frac{Y}{X} = \frac{W_{11}(s)W_{12}(s)W_5(s)}{1 + W_7(s)W_{11}(s)},$$

$$W_f(s) = \frac{Y}{F} = \frac{W_{11}(s)W_{12}(s)W_5(s)}{W_1(s)[1 + W_7(s)W_{11}(s)]}.$$

Аналогично этому примеру можно производить структурные преобразования, приводя к желаемым простым видам любые сложные структуры самых различных систем.



ЛЕКЦИЯ №4

по теме: Частотные характеристики САУ.

1. Частотные характеристики звена

Частотными характеристиками называются формулы и графики, характеризующие реакцию звена на синусоидальное входное воздействие в установившемся режиме, т. е. вынужденные синусоидальные колебания звена.

Если на вход звена подается (рис. 1.7)

$$x_1 = \sin \omega t,$$

то на выходе будет (в установившемся режиме)

$$x_2 = A \sin(\omega t + \varphi),$$

где A – амплитуда (точнее, усиление амплитуды), а φ — фаза (точнее, сдвиг по фазе).

Применяется символическая запись синусоидальных колебаний в виде

$$x_1 = e^{j\omega t}.$$

Строго говоря, $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$, что геометрически изображается вращающимся единичным вектором (рис. 1.8). Проекции последнего на прямоугольные оси

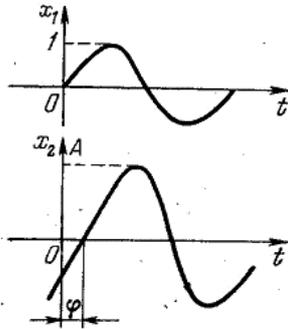


Рис. 1.7

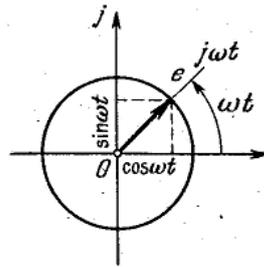


Рис. 1.8

дают $\cos \omega t$ и $\sin \omega t$. Поэтому для суждения о вынужденных синусоидальных колебаниях звена достаточно формально исследовать реакцию звена на символический сигнал $e^{j\omega t}$.

Пусть, например, уравнение звена имеет вид

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)x_2 = k_1(\tau_1 p + 1)x_1.$$

Используем символическую запись:

$$\begin{aligned} x_1 &= e^{j\omega t}, & p x_1 &= j\omega e^{j\omega t}, \\ x_2 &= A x_1 e^{j(\omega t + \varphi)}, & p x_2 &= A j\omega e^{j(\omega t + \varphi)}, \\ p^2 x_2 &= A(j\omega)^2 e^{j(\omega t + \varphi)}. \end{aligned}$$

Подставив эти величины в уравнение звена, получим

$$\left[T_2^2 (j\omega)^2 + T_1 (j\omega) + 1 \right] A e^{j(\omega t + \varphi)} = k_1 (\tau_1 j\omega + 1) e^{j\omega t}$$

откуда

$$A e^{j\varphi} = \frac{k_1 (\tau_1 j\omega + 1)}{T_2^2 (j\omega)^2 + T_1 (j\omega) + 1}.$$

Сравнивая это выражение с передаточной функцией данного звена (1.7) видим, что

$$A e^{j\varphi} = [W(s)]_{s=j\omega} = W(j\omega). \quad (1.10)$$

Отсюда находим

$$A = |W(j\omega)|, \quad \varphi = \arg W(j\omega). \quad (1.11)$$

В общем виде согласно (1.8) имеем

$$W(j\omega) = \frac{k_1 N(j\omega)}{L(j\omega)}.$$

Выражение (1.10) представляет амплитудно-фазовую частотную характеристику звена. Иногда $W(j\omega)$ называют частотной передаточной функцией звена. Выражения в (1.11) называются соответственно амплитудной частотной характеристикой звена и фазовой частотной характеристикой звена.

Графически амплитудно-фазовая частотная характеристика (1.10) изображается: на комплексной плоскости (рис. 1.9) в полярных координатах (A, φ), как годограф функции $W(j\omega)$. Можно строить амплитудно-фазовую частотную

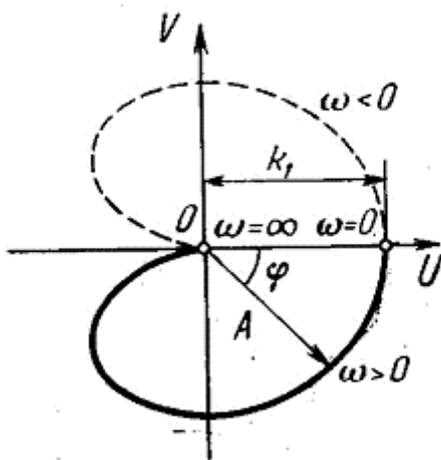


Рис. 1.9

характеристику и в прямоугольных координатах (U, V) (рис. 1.9), выделив в выражении $W(j\omega)$ вещественную и мнимую части:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega).$$

При этом $U(\omega)$ называют вещественной частотной характеристикой, а $V(\omega)$ — мнимой.

Заметим, что угол φ показан на рис. 1.9 как отрицательный (отложен по часовой стрелке), поскольку чаще всего реакция на выходе звена имеет отставание по фазе по сравнению с входной величиной.

При этом частоту ω изменяют от 0 до ∞ (сплошная кривая на рис. 1.9) или же от $-\infty$ до $+\infty$, когда добавляется еще симметричная к ней пунктирная кривая. Симметрия кривых при $\omega < 0$ и $\omega > 0$ объясняется тем, что передаточная функция $W(s)$ согласно (1.8) есть отношение многочленов (дробно-рациональная функция). Поэтому

$$W(-j\omega) = \overline{W(j\omega)},$$

т.е.

$$U(-\omega) = U(\omega), \quad V(-\omega) = V(\omega),$$

где чертой сверху обозначено комплексно-сопряженное выражение.

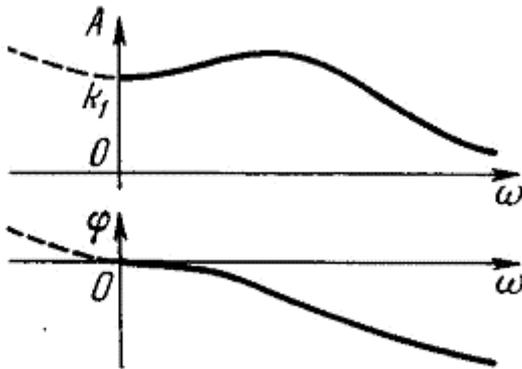


Рис. 1,10

Графики амплитудной и фазовой частотных характеристик (1.11) тоже изображаются графически (рис. 1.10), причем амплитуда является четной функцией, т.е. $A(-\omega) = A(\omega)$, а фаза — нечетной функцией, т.е. $\varphi(-\omega) = -\varphi(\omega)$.

Логарифмические частотные характеристики. В практических применениях чаще всего амплитудную и фазовую частотные характеристики

изображают в логарифмическом масштабе. Впоследствии увидим, что такие логарифмические частотные характеристики очень удобны для инженерных расчетов.

При построении логарифмической амплитудной частотной характеристики (ЛАХ) по оси ординат откладывают величину

$$Lm(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg |W(j\omega)|, \quad (1.12)$$

единицей измерения для которой является децибел. По оси абсцисс откладывается частота $\omega \left[\frac{1}{c} \right]$ в логарифмическом масштабе (рис. 1.11).

Равномерной единицей на оси абсцисс является декада — любой отрезок, на котором значение частоты ω увеличивается в десять раз. Точка пересечения ЛАХ с осью абсцисс называется частотой среза ω_c .

Начало координат обычно помещают в точке $\omega=1$, так как $\lg 1=0$. Точка же $\omega=0$ лежит в $-\infty$. Однако в зависимости от интересующего нас диапазона частот можно начало координат брать в другой точке ($\omega=0,1$; $\omega=10$ или др.). Важно иметь ввиду, что ось абсцисс ($Lm=0$) согласно (1.12) соответствует значению $A=1$, т.е. прохождению амплитуды сигнала через звено в натуральную величину. Верхняя полуплоскость ЛАХ соответствует значениям $A>1$ (усиление амплитуды), а нижняя полуплоскость — значениям $A<1$ (ослабление амплитуды).

При построении логарифмической фазовой частотной характеристики (ЛФХ) отсчет углов φ идет по оси ординат в обычном масштабе в угловых

градусах (рис. 1.11). По оси абсцисс откладывается по-прежнему частота ω логарифмическом масштабе.

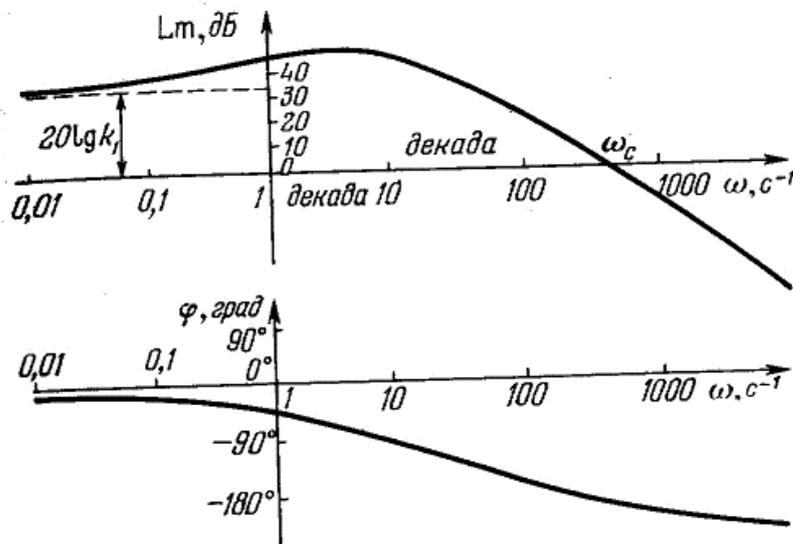


Рис. 1.11

Между частотными характеристиками и весовой функцией существуют соотношения, определяемые из (1.9) подстановкой $s = j\omega$, а именно:

$$W(j\omega) = \int_0^{\infty} k(t) e^{-j\omega t} dt, \quad k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W(j\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Эти формулы представляют собой известные преобразования Фурье.

Как видим, все рассмотренные виды динамических характеристик звеньев (передаточная функция, дифференциальное уравнение, весовая функция, переходная функция, амплитудно-фазовая частотная характеристика) связаны между собой определенными зависимостями. Поэтому все они эквивалентны друг другу в определении динамических свойств звена системы управления.

2. Частотные характеристики разомкнутой цепи звеньев

Рассмотрим получение частотных характеристик на примере, из которого будет ясен общий метод. Пусть задана передаточная функция разомкнутой цепи в виде

$$W(s) = \frac{K(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}{s(T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + 2\zeta T_2 s + 1)(T_3 s + 1)},$$

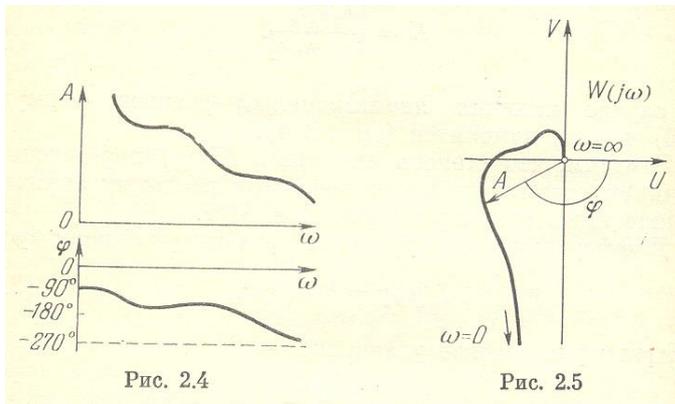
Причем $\zeta = 0,6$ (при таком ζ можно будет не учитывать «горба» амплитудной частотной характеристики колебательного звена).

Амплитудная и фазовая частотные характеристики имеют вид

$$A = \frac{K}{\omega} \sqrt{\frac{(\tau_1^2 \omega^2 + 1)(\tau_2^2 \omega^2 + 1)}{(T_1^2 \omega^2 + 1) \left[(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + 4\zeta^2 T_2^2 \omega^2 \right] (T_3^2 \omega^2 + 1)}}$$

$$\varphi = -90^\circ + \arctg \tau_1 \omega + \arctg \tau_2 \omega - \arctg T_1 \omega - \arctg \frac{2\zeta T_2 \omega}{1 + T_2^2 \omega^2} - \arctg T_2 \omega.$$

Их можно изобразить графически (2.4), а по ним — построить и амплитудно-фазовую частотную характеристику (рис. 2.5).



Логарифмическую амплитудно-частотную характеристику можно строить непосредственно по заданной передаточной функции. Для этого надо помнить, что согласно характеристикам типовых звеньев, каждому сомножителю типа $(Ts + 1)$ в знаменателе соответствует точка излома характеристики при $\omega = \frac{1}{T}$ последующим наклоном -20 дб/дек, а каждому сомножителю такого же типа в числителе соответствует точка излома при $\omega = \frac{1}{\tau}$ с последующим наклоном $+20$ дб/дек. Сомножителю же типа $(T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1)$ в знаменателе соответствует излом при $\omega = \frac{1}{T}$ с наклоном -40 дб/дек, если $0,5 < \zeta < 1$. При $\zeta < 0,5$ нужно добавочно строить «горб».

Таким образом, пронумеровав по порядку все сомножители передаточной функции

Управление техническими системами

$$W(s) = \frac{K \begin{matrix} 1 \\ \tau_1 s + 1 \end{matrix} \begin{matrix} 2 \\ \tau_2 s + 1 \end{matrix} \begin{matrix} 3 \\ \tau_3 s + 1 \end{matrix}}{s \begin{matrix} 4 \\ T_1 s + 1 \end{matrix} \begin{matrix} 5 \\ T_2^2 s + 2\zeta_6 T_2 s + 1 \end{matrix} \begin{matrix} 6 \\ T_3 s + 1 \end{matrix} \begin{matrix} 7 \end{matrix}},$$

для каждого из них получим характеристики, показанные на рис. 2.6, а и обозначенные там цифрами в кружках. Простое сложение их дает искомую логарифмическую амплитудную частотную характеристику $L_m(\omega)$ данной разомкнутой цепи звеньев, показанную на рис. 2.6, б. На рис. 2.6, в согласно написанной выше формуле изображена фазовая частотная характеристика $\varphi(\omega)$.

Из рис. 2.6 видно, что легко можно строить непосредственно суммарную характеристику $L_m(\omega)$ по передаточной функции $W(s)$ (помня указанное выше правило изломов), не изображая отдельных частей характеристики (т.е. можно обойтись без рис. 2.6, а). При этом частоты в точках изломов $\left(\frac{1}{\tau_1}, \frac{1}{T_1}, \dots \right)$

называются сопрягающими частотами.

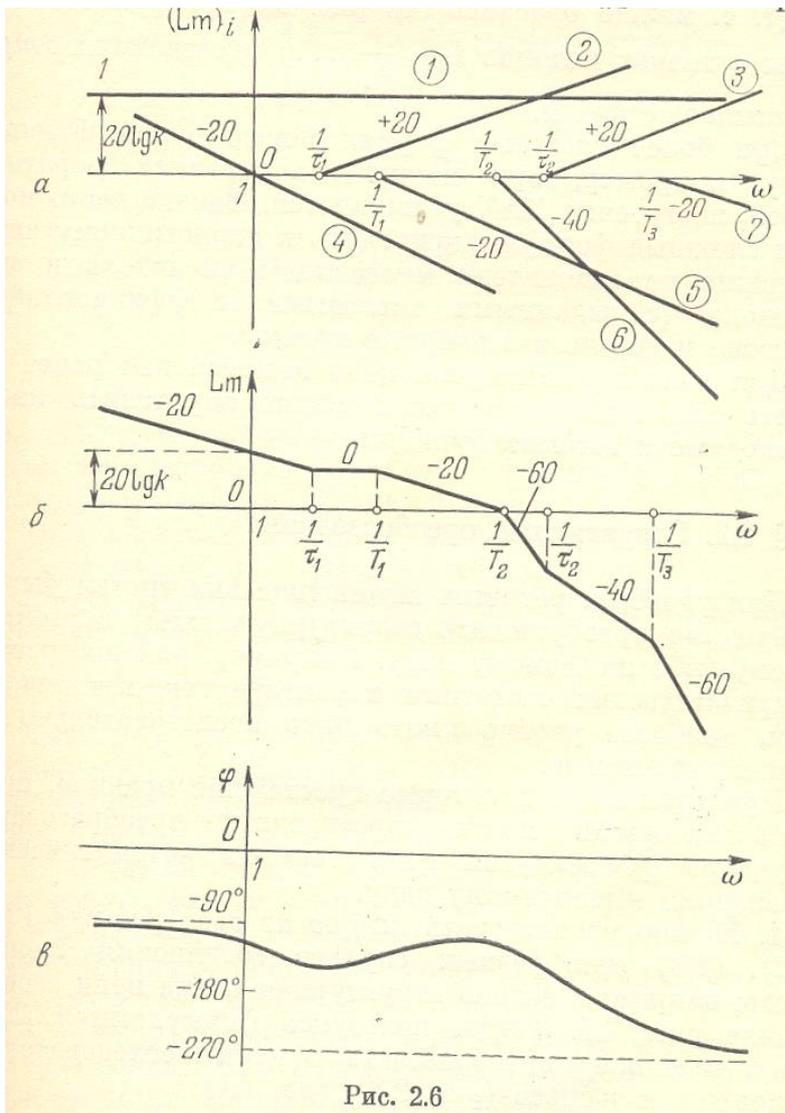


Рис. 2.6

При более сложных формулах передаточной функции $W(s)$, например, при наличии внутренних обратных связей, построение ЛАХ усложняется. Однако часто можно и сложные формулы приводить к аналогичному виду, разложив на множители многочлены числителя и знаменателя (с заданными числовыми коэффициентами). Имеются и другие инженерные приемы.

3. Частотные характеристики замкнутой системы

В соответствии с главной передаточной функцией замкнутой системы (2.13) можем записать формулу амплитудно-фазовой частотной характеристики замкнутой системы в виде

$$\hat{O}(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{1 + W(j\omega)}, \quad (2.25)$$

причем

$$W(j\omega) = \frac{KN(j\omega)}{L(j\omega)}$$

представляет собой выражение амплитудно-фазовой частотной характеристики разомкнутой цепи для данной системы.

Амплитудно-фазовые частотные характеристики можно представить в виде

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

$$\hat{O}(j\omega) = A_{\zeta}(\omega)e^{j\varphi_{\zeta}(\omega)}$$

где $A_3(\omega)$ и $\varphi_3(\omega)$ —соответственно амплитудная и фазовая частотные характеристики замкнутой системы. Последние можно выразить через $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ разомкнутой цепи.

Согласно формуле (2.25) имеем

$$A_{\zeta}e^{j\varphi_{\zeta}} = \frac{Ae^{j\varphi}}{1 + Ae^{j\varphi}}$$

или, взяв обратные величины слева и справа, получим новое равенство

$$\frac{e^{-j\varphi_{\zeta}}}{A_{\zeta}} = \frac{e^{-j\varphi}}{A} + 1.$$

Подставим сюда $e^{j\varphi} = \cos\varphi - j\sin\varphi$ и приравняем затем отдельно вещественные и мнимые части. Получим два равенства

$$\frac{\cos\varphi_{\zeta}}{A_{\zeta}} = \frac{\cos\varphi}{A} + 1, \quad \frac{\sin\varphi_{\zeta}}{A_{\zeta}} = \frac{\sin\varphi}{A}.$$

Сложив для начала, квадраты этих уравнений, а затем, поделив одно из них на другое, получим искомый результат

$$A_{\zeta}(\omega) = \frac{A(\omega)}{\sqrt{A^2(\omega) + 2A(\omega)\cos\varphi(\omega) + 1}}, \quad (2.26)$$

$$\varphi_{\zeta}(\omega) = \arctg \frac{\sin\varphi(\omega)}{A(\omega) + \cos\varphi(\omega)}.$$

Для разомкнутой цепи, как мы знаем, чаще всего используются логарифмические частотные характеристики $Lm(\omega)$, $\varphi(\omega)$.

Будем считать, что из предыдущей начальной стадии расчета системы эти характеристики известны. Они будут исходными для определения по формулам (2.26) характеристик замкнутой системы $A_3(\omega)$ и $\varphi_3(\omega)$. Чтобы не иметь дело на практике с такими формулами, составлены [36] *номограммы замыкания* (рис.

Управление техническими системами

2.17). Отложив на осях абсцисс и ординат заданные значения $\varphi(\omega)$ и $Lm(\omega)$, находим значения $A_3(\omega)$ и $\varphi_3(\omega)$ на поле номограммы в точке с этими координатами. Таким образом, по точкам строится вся частотная характеристика замкнутой системы.

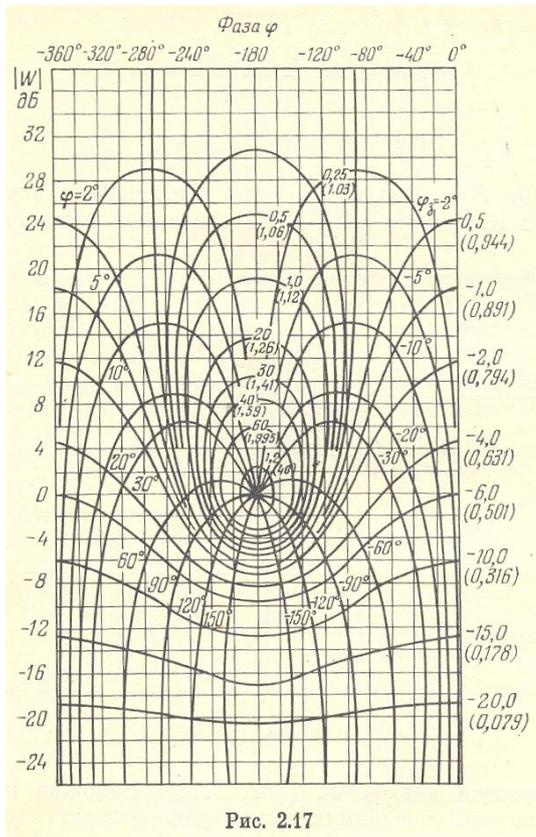


Рис. 2.17

Существует и другое представление частотной характеристики замкнутой системы

$$\hat{O}(j\omega) = P(j\omega) + jQ(j\omega),$$

где $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ называются вещественной и мнимой частотными характеристиками. Представив исходную амплитудно-фазовую частотную характеристику разомкнутой цепи системы в виде

$$W(j\omega) = U(j\omega) + jV(j\omega)$$

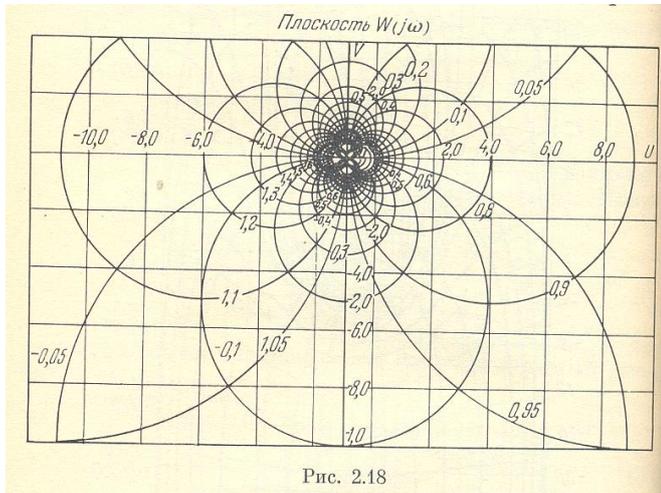
и подставив ее в формулу (2.25), найдем

$$P(\omega) = \frac{U(\omega)[1+U(\omega)] + V^2(\omega)}{[1+U(\omega)]^2 + V^2(\omega)} \tag{2.27}$$

$$Q(\omega) = \frac{V(\omega)}{[1+U(\omega)]^2 + V^2(\omega)}.$$

Управление техническими системами

Линии $P=\text{const}$ и $Q=\text{const}$ оказываются окружностями на плоскости (U,V) . На основании этого строится круговая диаграмма (рис. 2.18).



Наложив на поле этой диаграммы заданную амплитудно-фазовую частотную характеристику разомкнутой цепи $W(j\omega)$, построенную в координатах U и V , в точках пересечения ее с окружностями $P=\text{const}$ и $Q=\text{const}$ получим значения вещественной $P(\omega)$ и мнимой $Q(\omega)$ частотных характеристик замкнутой системы.

Вещественная характеристика $P(\omega)$ является четной, а мнимая $Q(\omega)$ нечетной функциями ω (рис. 2.19).

Наконец, вещественную и мнимую частотные характеристики замкнутой системы можно определять и по заданным логарифмическим частотным характеристикам разомкнутой цепи. Для этого подставим выражение

$$W(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

в формулу (2.25). Получим

$$\hat{O}(j\omega) = \frac{A(\omega)[\cos\varphi(\omega) + j\sin\varphi(\omega)]}{1 + A(\omega)[\cos\varphi(\omega) + j\sin\varphi(\omega)]}$$

Выделяя вещественную и мнимую части, найдем

$$P(\omega) = \frac{A(\omega)[A(\omega) + \cos\varphi(\omega)]}{A^2(\omega) + 2A(\omega)\cos\varphi(\omega) + 1} \tag{2.28}$$

$$Q(\omega) = \frac{A(\omega)\sin\varphi(\omega)}{A^2(\omega) + 2A(\omega)\cos\varphi(\omega) + 1}$$

На базе исходных логарифмических частотных характеристик, по этим формулам построены также

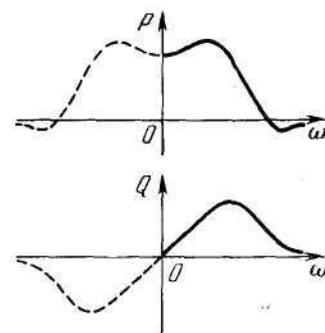


Рис. 2.19

Управление техническими системами

соответствующие номограммы для вещественной $P(\omega)$ и мнимой $Q(\omega)$ характеристик.

Все рассмотренные частотные характеристики замкнутой системы базировались на выражении главной передаточной функции, когда входом является задающее воздействие $g(t)$, а выходом — регулируемая величина x .

Аналогичным путем могут быть построены частотные характеристики замкнутой системы по возмущающему воздействию $f(t)$, для чего надо пользоваться соответствующей передаточной функцией

$$\hat{O}_f(s) = \frac{R(s)}{L(s) + KN(s)} \quad \text{и} \quad \text{д} \text{е} \quad s = j\omega$$

При этом очертание частотных характеристик будет зависеть от вида многочлена $R(s)$, т. е. от места приложения возмущающего воздействия $f(t)$.

ЛЕКЦИЯ №5**по теме: Временные, операторные и частотные характеристики типовых звеньев.**

Типы звеньев систем автоматического управления и регулирования различаются по виду их передаточной функции (или дифференциального уравнения), определяющей все их динамические свойства и характеристики.

Основные типы звеньев делятся на три группы: позиционные, дифференцирующие и интегрирующие.

Позиционными звеньями называются такие, в передаточной функции которых

$$W(s) = \frac{k_1 N(s)}{L(s)}, \quad (1.13)$$

многочлены $N(s)$ и $L(s)$ имеют свободные члены (равные 1), т. е. эти звенья обладают статической характеристикой $x_2 = k_1 x_1$ (при $s=0$), определяющей их установившееся состояние (свойство позиционности).

У *дифференцирующих звеньев* в выражении (1.13) отсутствует свободный член числителя, т. е. для однократно дифференцирующего звена передаточная функция

$$W(s) = \frac{k_1 s N_1(s)}{L(s)}, \quad (1.14)$$

где $N_1(s)$ имеет свободный член, равный 1. Для двукратно дифференцирующего звена

$$W(s) = \frac{k_1 s^2 N_1(s)}{L(s)}. \quad (1.15)$$

Передаточные функции *интегрирующих звеньев* имеют соответственно вид

$$W(s) = \frac{k_1 N(s)}{s L_1(s)} \text{ или } \frac{k_1 N(s)}{s^2 L_1(s)}, \quad (1.16)$$

где $L_1(s)$ имеет свободный член, равный 1, как и $N(s)$. Знание характеристик типовых звеньев столь же необходимо для расчетов систем управления, как знание таблицы умножения в арифметике.

Управление техническими системами

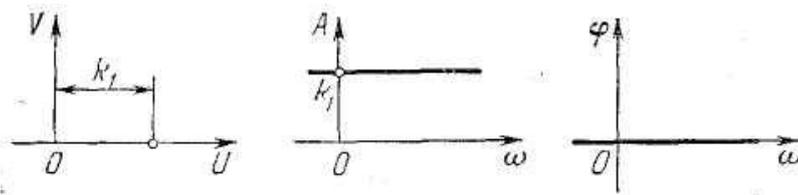


Рис. 1.12

В данном параграфе изучим свойства основных типов позиционных звеньев.

Идеальное усилительное (безынерционное) звено. Уравнение и передаточная функция звена:

$$x_2 = k_1 x_1, \quad W(s) = k_1,$$

$$W(j\omega) = k_1, \quad A(\omega) = k_1, \quad \varphi(\omega) = 0.$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (рис. 1.12):

Переходная и весовая функции:

$$h(t) = k_1 \quad (t > 0), \quad k(t) = k_1 \delta(t).$$

Примерами таких безынерционных звеньев могут служить жесткие механические и гидравлические передачи, электронный усилитель сигналов на низких частотах, гироскоп и некоторые другие измерительные датчики.

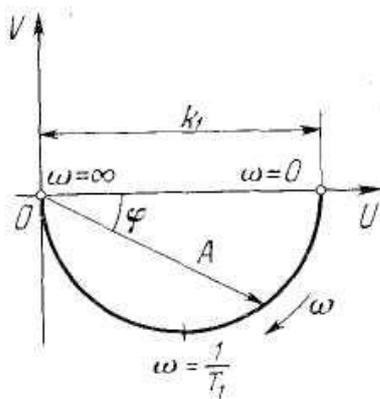


Рис. 1.13

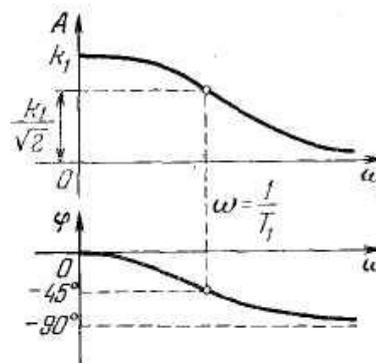


Рис. 1.14

Апериодическое (инерционное) звено. Уравнение и передаточная функция звена:

$$(T_1 p + 1)x_2 = k_1 x_1, \quad W(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1}.$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика звена (рис. 1.13) имеет вид полуокружности и описывается выражениями

$$W(j\omega) = \frac{k_1}{T_1 j\omega + 1} \quad W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega),$$

$$U(\omega) = \frac{k_1}{T_1^2 \omega^2 + 1}, \quad V(\omega) = -\frac{k_1 T_1 \omega}{T_1^2 \omega^2 + 1}$$

Амплитудная и фазовая частотные характеристики соответственно будут (рис. 1.14):

$$A(\omega) = \frac{k_1}{\sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctg T\omega.$$

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика звена имеет вид

$$Lm(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg k_1 - 20 \lg \sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1}.$$

Эта характеристика обладает асимптотами:

а) при $\omega \rightarrow 0$; $Lm(\omega) \rightarrow 20 \lg k_1$,

б) при $\omega \rightarrow \infty$; $Lm(\omega) \rightarrow 20 \lg k_1 - 20 \lg T_1 \omega$

Последняя будет наклонной прямой с наклоном -20 дБ/дек, а первая— горизонтальная прямая (рис. 1.15). Пересекаются они в точке $\omega = \frac{1}{T_1}$. Сама ЛАХ

(пунктир на рис. 1.15) близка к этим асимптотам. Наибольшее ее отклонение будет в точке $\omega = \frac{1}{T_1}$, а именно:

$$\Delta = 20 \lg k_1 - \left(20 \lg k_1 - 20 \lg \sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1} \right) = 3,03 \text{ дб}.$$

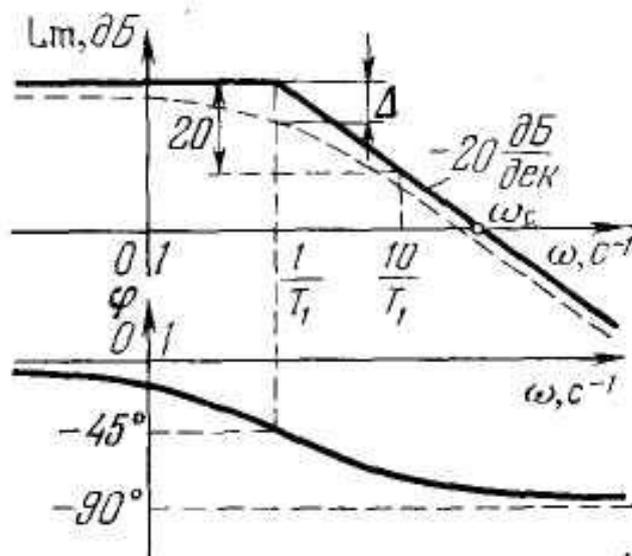


Рис. 1.15

Управление техническими системами

В инженерных расчетах такой разницей пренебрегают и считают, что логарифмическая амплитудная частотная характеристика апериодического звена имеет вид ломаной, состоящей из двух прямых, показанных на рис. 1.15.

Видно, что чем меньше постоянная времени звена T_1 , тем больший диапазон частот ($0 < \omega < \omega_c$) входного сигнала «пропускает» звено с усилением, так как (см. рис. 1.15)

$$\omega_c = \frac{k_1}{T_1}$$

Переходная функция, согласно решению уравнения звена, при $x_1=1(t)$ и нулевых начальных условиях имеет вид

$$h(t) = k_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right), t > 0,$$

а весовая функция

$$k(t) = \frac{dh}{dt} = \frac{k_1}{T_1} e^{-\frac{t}{T_1}}, t > 0$$

Обе они изображены на рис. 1.16.

Постоянная времени T_1 определяет наклон касательной в начале кривой (рис. 1.16). Следовательно, величина T_1 характеризует степень инерционности

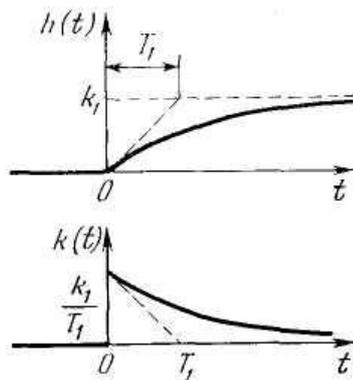


Рис. 1.16

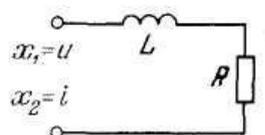


Рис. 1.17

звена, т.е. длительности переходного процесса. Практически с точностью до 5 % переходный процесс считается затухающим за время

$$t_{\text{п}} = 3T_1. \quad (1.17)$$

Примером апериодического звена является (в первом приближении) электродвигатель, если x_1 — управляющее напряжение, x_2 — угловая скорость

вала. Другой пример — цепочка LR (рис. 1.17), в которой x_1 — входное напряжение u , а x_2 — ток в цепи i .

Апериодическое звено второго порядка. Уравнение и передаточная функция звена имеют вид

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1)x_2 = k_1 x_1, \quad W(s) = \frac{k_1}{T_2^2 s^2 + T_1 s + 1}$$

причем предполагается, что

$$T_1 \geq 2T_2,$$

так как при этом корни характеристического уравнения

$$\lambda_{1,2} = -\frac{T_1 \pm \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}}{2T_2^2}$$

будут вещественными. Передаточную функцию апериодического звена второго порядка, разложив знаменатель на сомножители, можно записать в виде

$$W(s) = \frac{k_1}{(T_3 s + 1) + (T_4 s + 1)^2},$$

где

$$T_{3,4} = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4} - T_2^2}.$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (рис. 1.18 и 1.19) звена:

$$W(j\omega) = \frac{k_1}{(T_3 j\omega + 1) + (T_4 j\omega + 1)^2},$$

$$A(\omega) = \frac{k_1}{\sqrt{(T_3^2 \omega^2 + 1) + (T_4^2 \omega^2 + 1)}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctg T_3 \omega - \arctg T_4 \omega.$$

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика звена:

$$Lm(\omega) = 20 \lg A(\omega) = 20 \lg k_1 - 20 \lg \sqrt{(T_3^2 \omega^2 + 1) + (T_4^2 \omega^2 + 1)}.$$

Истинная характеристика близка к ломаной линии (рис. 1.20), которая и применяется в инженерных расчетах. Она получена следующим образом.

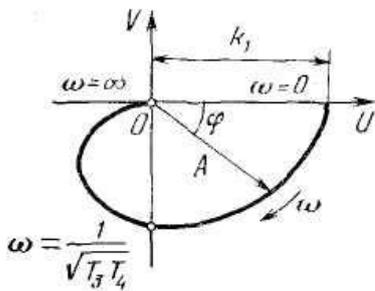


Рис. 1.18

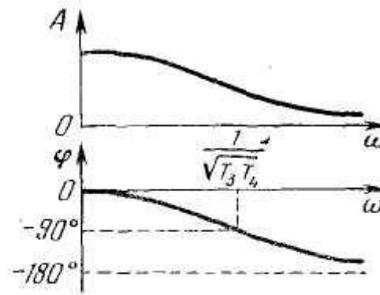


Рис. 1.19

Первые два слагаемые дают результат, показанный на рис. 1.15. Третье же слагаемое добавляет еще наклон — 20 дБ/дек, начиная с частоты $\omega = \frac{1}{T_4}$. Там же (рис. 1.20) показана и логарифмическая фазовая характеристика $\varphi(\omega)$.

В граничном случае, когда $T_1 = 2T_2$, имеем $T_3 = T_4$ и все три отмеченные на осях абсцисс характерные точки совпадают в одну. Если же $T_1 < 2T_2$, звено переходит в колебательное (см. выше). Поэтому постоянная T_1 , определяющая

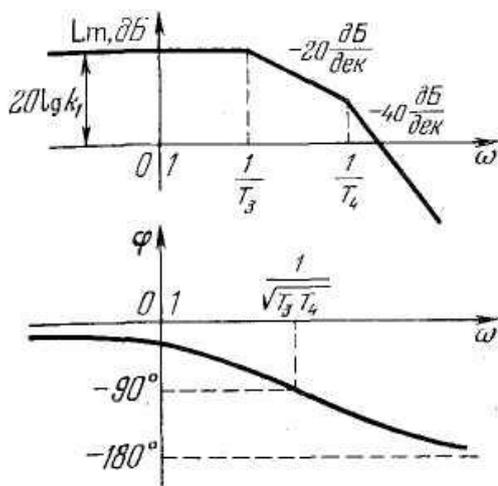


Рис. 1.20

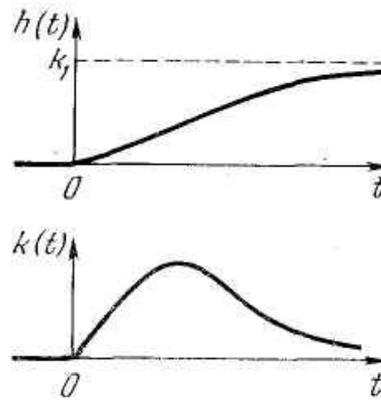


Рис. 1.21

инерционность звена, является в то же время демпфирующим фактором (увеличение T_1 приводит к отсутствию колебаний). Переходная и весовая функции апериодического звена 2-го порядка, получаемые аналогично предыдущему, имеют вид (рис. 1.21).

$$h(t) = k_1 \left(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_3}} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-\frac{t}{T_4}} \right),$$

$$k(t) = \frac{k_1}{T_3 - T_4} \left(e^{-\frac{t}{T_3}} - e^{-\frac{t}{T_4}} \right), \quad t > 0.$$

Примерами такого звена являются двигатель постоянного тока при учете инерционности цепи якоря, электромашинный усилитель, двойная цепочка LR .

Колебательное звено. Уравнение звена имеет вид

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) x_2 = k_1 x_1,$$

причем предполагается

$$T_1 < 2T_2,$$

так что корни характеристического уравнения — комплексные.

Общепринята запись передаточной функции колебательного звена в виде

$$W(s) = \frac{k_1}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1},$$

где $T_1 = T_2$, $\xi = \frac{T_1}{2T_2}$, причем $0 < \xi < 1$ так как при $\xi \geq 1$ звено становится

апериодическим (второго порядка).

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (рис. 1.22 и 1.23) звена:

$$W(s) = \frac{k_1}{T^2 (j\omega)^2 + 2\xi T j\omega + 1},$$

$$A(\omega) = \frac{k_1}{\sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + 4\xi^2 T^2 \omega^2}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctg \frac{2\xi T \omega}{1 - T^2 \omega^2}.$$

В случае, если $1 > \xi > 0,707$ амплитуда A (рис. 1.23) уменьшается с увеличением ω , т.е. $A(\omega) \leq k_1$. При $\xi < 0,707$ появляется «горб» у характеристики $A(\omega)$, который

уходит в бесконечность при $\xi \rightarrow 0$. Поэтому величина $\xi = \frac{T_1}{2T_2}$ называется

параметром затухания. Отсюда видна роль постоянных времени T_1 и T_2 в уравнении звена: постоянная T_2 «раскачивает» колебания,

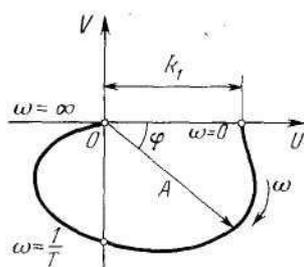


Рис. 1.22

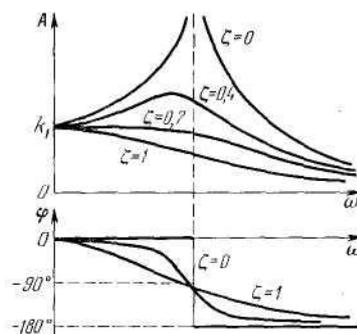


Рис. 1.23

а T_1 — «демпфирует» их.

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика звена

$$Lm(\omega) = 20 \lg k_1 - 20 \lg \sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + 4 \xi^2 T^2 \omega^2}.$$

При $\omega \rightarrow \infty$ получаем $Lm(\omega) \rightarrow 20 \lg k_1 - 40 \lg T \omega$, как показано на рис. 1.24.

Поэтому при значениях $0,5 < \xi < 1$ характеристика близка к ломаной (рис. 1.24).

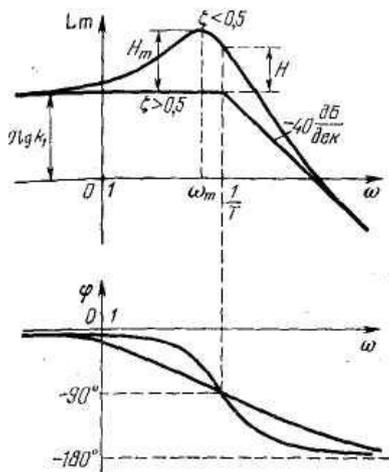


Рис. 1.24

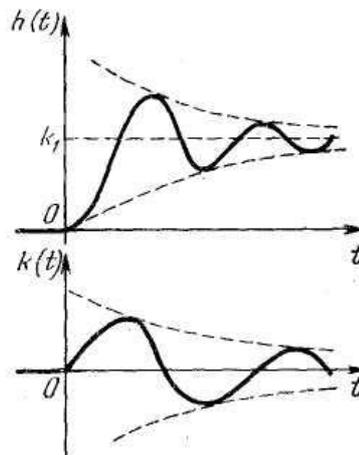


Рис. 1.25

Если же $\xi < 0,5$, то получается заметный «горб» (рис. 1.24). Тут необходимо вычислять превышение

$$H_m = 20 \lg \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}}$$

на частоте

$$\omega_m = \frac{1}{T} \sqrt{1 - 2\xi^2}.$$

В упрощенных расчетах достаточно находить (см. рис. 1.24):

$$H = 20 \lg \frac{1}{2\xi^2} \text{ при } \omega = \frac{1}{T}.$$

Переходная и весовая функции колебательного звена изображены на рис. 1.25. Они, как решения дифференциального уравнения звена, имеют вид соответственно

$$h(t) = k_1 \left[1 - e^{-\frac{\xi}{T}t} \left(\cos \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T}t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T}t \right) \right],$$

$$k(t) = \frac{k_1 \xi}{T \sqrt{1-\xi^2}} e^{-\frac{\xi}{T}t} \sin \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T}t, t > 0.$$

Здесь огибающая (пунктир на рис. 1.25) и частота колебаний определяются формулами соответственно

$$k_1 e^{-\frac{\xi}{T}t}, \quad \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T}.$$

Поэтому аналогично (1.17) длительность переходного процесса можно оценить практически в виде

$$t_{\Pi} = 3 \frac{T}{\xi}.$$

Примеры колебательных звеньев изображены на рис. 1.26. При $\zeta = 0$ колебания становятся незатухающими, а при $\zeta = 1$ колебания вырождаются в апериодический процесс.

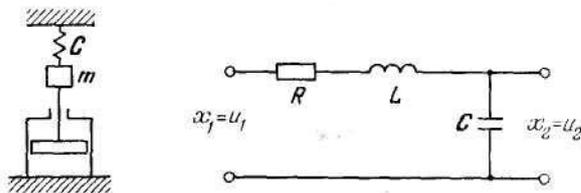


Рис. 1.26

Частный случай колебательного звена при $\zeta = 0$, когда $h(t)$ и $k(t)$ становятся незатухающими (периодическими), носит название консервативного звена.

2. Типы интегрирующих и дифференцирующих звеньев и их характеристики

Определение понятия интегрирующих и дифференцирующих звеньев было дано в общем виде в предыдущем параграфе. Здесь рассмотрим основные их типы.

Идеальное интегрирующее звено. Уравнение и передаточная функция звена имеют вид

$$x_2 = k_1 \int x_1 dt \quad \text{или} \quad px_2 = k_1 x_1, \quad W(s) = \frac{k_1}{s}.$$

Управление техническими системами

Амплитудно-фазовая частотная характеристика звена (рис. 1.27):

$$W(j\omega) = -j \frac{k_1}{\omega}, \quad A(\omega) = \frac{k_1}{\omega}, \quad \varphi(\omega) = -90^\circ.$$

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика

$$Lm(\omega) = 20 \lg k_1 - 20 \lg \omega.$$

Поскольку на оси абсцисс откладываются значения $\lg \omega$, то мы имеем здесь уравнение прямой, проходящей через точку $20 \lg k_1$ при $\omega=1$ с наклоном -20 дБ/дек. Это и показано на рис. 1.28 вместе с фазовой частотной характеристикой.

Переходная и весовая функция (рис. 1.29) имеют вид

$$h(t) = k_1 t, \quad k(t) = k_1, \quad t > 0.$$

Примеры идеальных интегрирующих звеньев изображены на рис. 1.30.

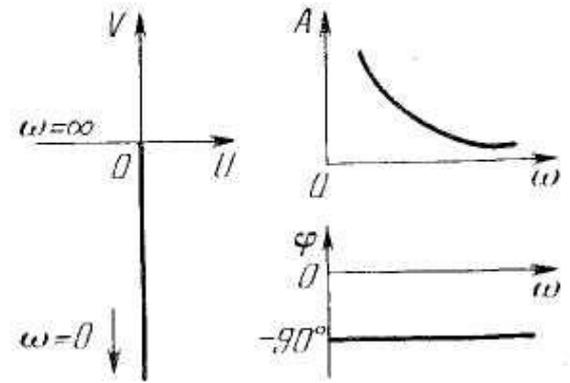


Рис. 1.27

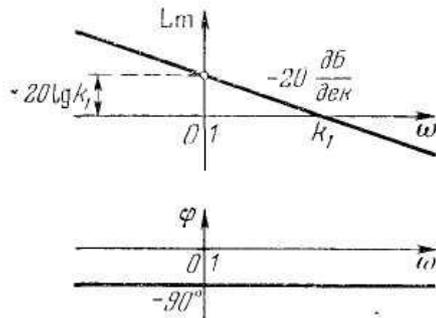


Рис. 1.28

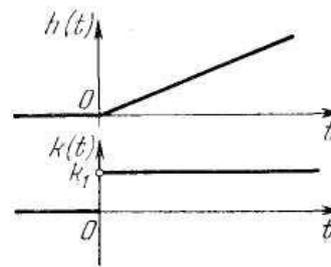


Рис. 1.29

Инерционное интегрирующее звено. Уравнение и передаточная функция звена

$$(T_1 p + 1) p x_2 = k_1 x_1, \quad W(s) = \frac{k_1}{s(T_1 s + 1)}.$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика:

$$W(j\omega) = \frac{k_1}{j\omega(T_1 j\omega + 1)},$$

$$A = \frac{k_1}{\omega(T_1^2 \omega^2 + 1)}, \quad \varphi = -90^\circ - \arctg T_1 \omega.$$

Вещественная и мнимая части амплитудно-фазовой характеристики имеют вид

$$U(\omega) = \frac{k_1 T_1}{T_1^2 \omega^2 + 1}, \quad V(\omega) = -\frac{k_1}{\omega(T_1^2 \omega^2 + 1)}.$$

Отсюда видно, что при $\omega \rightarrow 0$ имеем $U \rightarrow -k_1 T_1$, $V \rightarrow -\infty$, что и отражено на рис. 1.31.

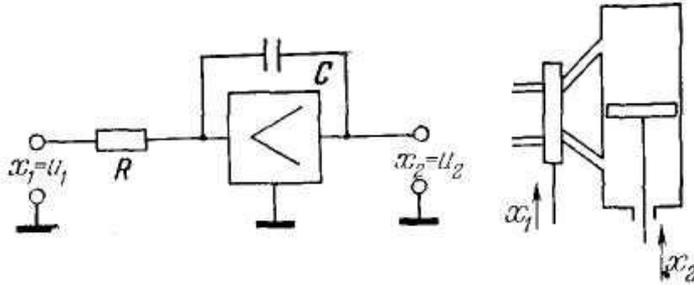


Рис. 1.30

Логарифмическая амплитудная частотная характеристика

$$Lm(\omega) = 20 \lg k_1 - 20 \lg \omega - 20 \lg \sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1}.$$

Здесь к прежней прямой добавляется наклон -20 дБ/дек,

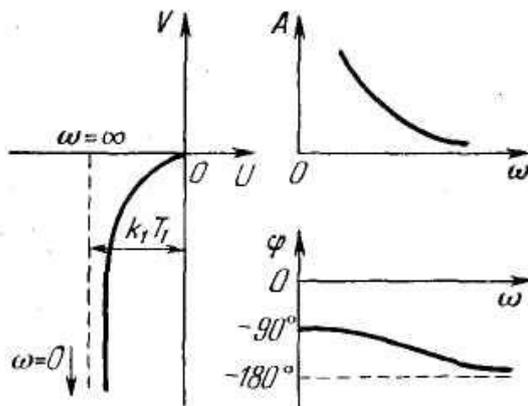


Рис. 1.31

начиная с частоты $\omega = \frac{1}{T_1}$ что показано на рис. 1.32. Там же изображена и логарифмическая фазовая частотная характеристика.

Переходная и весовая функции, как решения уравнения звена соответственно при $x_1 = 1(t)$ и $x_1 = \delta(t)$ изображенные на рис. 1.33, имеют вид

$$h(t) = k_1 \left[t - T_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \right], \quad t > 0,$$

$$k(t) = k_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right), \quad t > 0.$$

Следовательно, за счет постоянной времени T_1 , вместо идеального интегрирования (рис. 1.29), здесь получается интегрирование с инерционным запаздыванием (рис. 1.33).

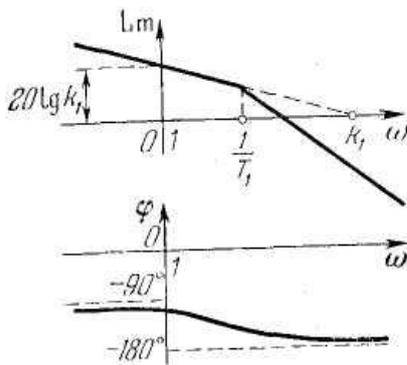


Рис. 1.32

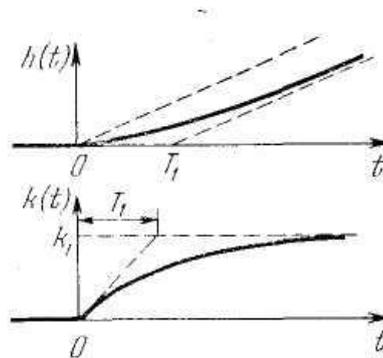


Рис. 1.33

Примером такого инерционного интегрирующего звена является электродвигатель, если выходной величиной считать угол поворота вала двигателя.

Идеальное дифференцирующее звено. Уравнение и передаточная функция звена:

$$x_2 = k_1 p x_1, \quad W(s) = k_1 s.$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (рис. 1.34) звена:

$$W(j\omega) = jk_1\omega, \quad A = k_1\omega, \quad \varphi = +90^\circ.$$

В реальных системах такой вид характеристики звена возможен лишь в ограниченной полосе частот, так как неограниченное увеличение амплитуды с ростом частоты требует бесконечной энергии.

Логарифмические частотные характеристики (рис. 1.35):

$$Lm(\omega) = 20lg k_1 + 20lg \omega, \quad \varphi = +90^\circ.$$

В отличие от интегрирующего звена, здесь имеют место положительный наклон +20дБ/дек и положительная фаза. Наличие положительной фазы означает опережение сигнала на выходе звена по отношению к входу. Физически это связано с тем, что, как видно из уравнения,

Управление техническими системами

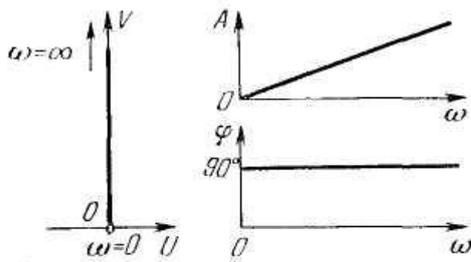


Рис. 1.34

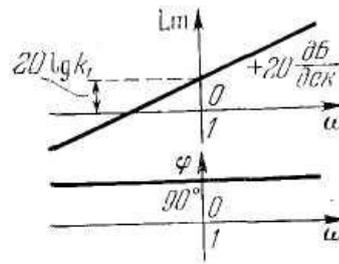


Рис. 1.35

звено реагирует на скорость изменения входной величины, т. е. не на саму величину x_1 , а на тенденцию изменения ее в будущем. Как говорят, звено обладает предсказанием.

Переходная и весовая функции имеют вид

$$h(t) = k_1 \delta(t), \quad k(t) = k_1 \frac{d\delta}{dt}, \quad t > 0.$$

Примерами такого типа звена являются (рис. 1.36) тахогенератор и RC-цепочка с усилителем.

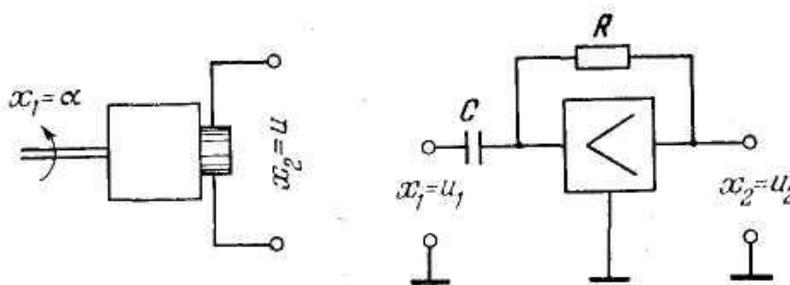


Рис. 1.36

Идеальное звено с введением производной. Уравнение и передаточная функция звена:

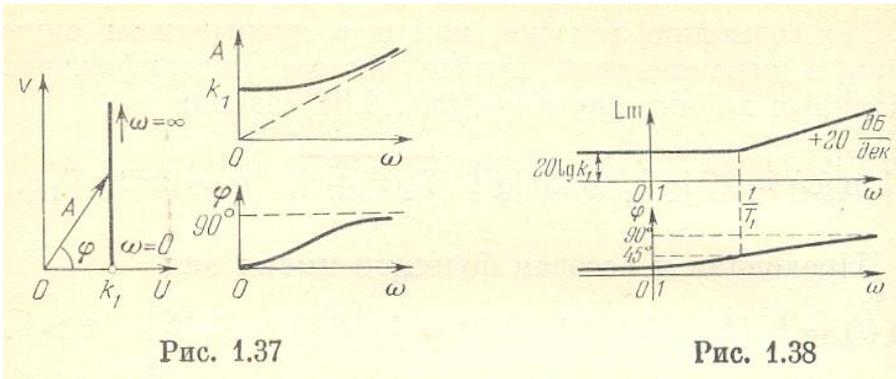
$$x_2 = k_1(1 + T_1 p)x_1, \quad W(s) = k_1(1 + T_1 s).$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (рис. 1.37):

$$W(j\omega) = k_1(1 + jT_1\omega), \quad A = k_1 \sqrt{T_1^2\omega^2 + 1}, \quad \varphi = \arctg T_1\omega.$$

Это возможно так же, как и в предыдущем случае, лишь в ограниченной полосе частот. Логарифмические частотные характеристики (рис. 1.38) звена:

$$Lm(\omega) = 20 \lg k_1 + 20 \lg \sqrt{T_1^2\omega^2 + 1}, \quad \varphi = \arctg T_1\omega.$$



Переходная и весовая функции имеют вид

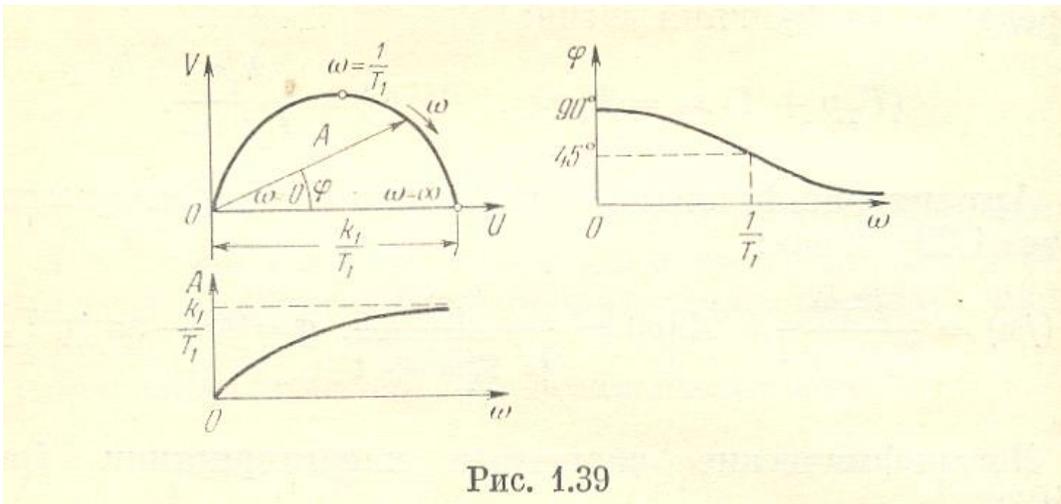
$$h(t) = k_1 [1 + T_1 \delta(t)], \quad k(t) = k_1 \left[\delta(t) + T_1 \frac{d\delta}{dt} \right], \quad t > 0.$$

Инерционное дифференцирующее звено. Уравнение и передаточная функция звена:

$$(T_1 p + 1)x_2 = k_1 p x_1, \quad W(s) = \frac{k_1 s}{T_1 s + 1}.$$

Амплитудно-фазовая частотная характеристика (рис. 1.39) звена:

$$W(j\omega) = \frac{jk_1\omega}{T_1 j\omega + 1}, \quad A(\omega) = \frac{k_1\omega}{\sqrt{T_1^2\omega^2 + 1}}, \quad \varphi = 90^\circ - \arctg T_1\omega.$$



Примерами такого типа звена являются (рис. 1.42) обычная цепочка RC, трансформатор, механический демпфер с пружиной. Здесь мы видим реальное ограничение амплитуды при увеличении частоты (рис. 1.40).

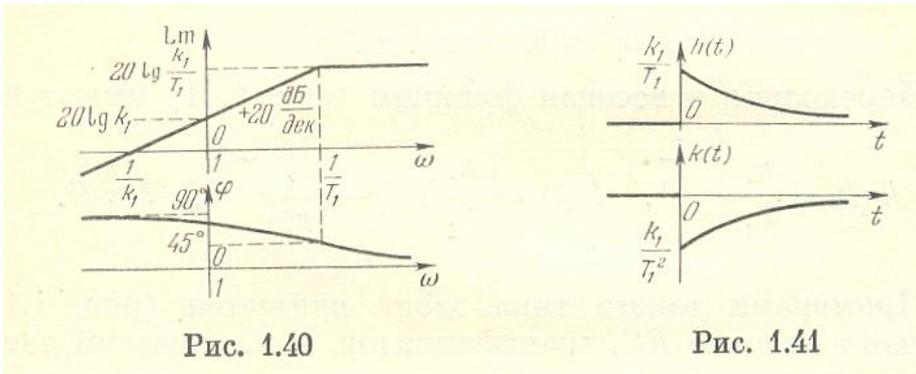


Рис. 1.40

Рис. 1.41

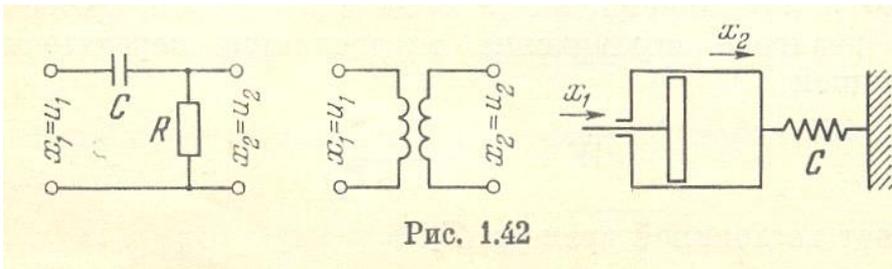


Рис. 1.42

Аналогично и для инерционного звена с введением производной реальное ограничение определяется передаточной функцией

$$W(s) = k_1 \frac{1 + T_1 s}{1 + T_2 s}$$

за счет постоянной времени T_2 .

ЛЕКЦИЯ №6

по теме: Устойчивость непрерывных линейных САУ.

1. Понятие устойчивости линеаризованных систем

Устойчивость систем автоматического управления является одним из важнейших условий ее работоспособности, так как устойчивость включает в себя требование затухания переходных процессов во времени. Очевидно, что система с расходящимся процессом была бы неработоспособной

Все реальные системы в технике и в природе, как правило, являются в большей или меньшей степени нелинейными. Всегда существует много факторов, отклоняющих реальные характеристики от прямолинейных. Однако многие системы можно считать близкими к линейным и с необходимой для практики точностью проектировать как линейные. Для этого производится линеаризация характеристик и уравнений для реальных звеньев системы (см. § 1.1).

Большое практическое значение имеют, конечно, и существенно нелинейные системы. Они рассматриваются отдельно в другом учебном пособии.

Управление техническими системами

Итак, обратимся к линейным системам, рассматривая их как результат линеаризации реальных систем, т. е. к *линеаризованным* системам. Можно сказать, что линейная система является идеализированной (приближенной) математической моделью реальной системы.

Рассмотрим сначала идеально линейную систему. Под *устойчивостью линейной системы* понимают свойство затухания переходного процесса с течением времени, иначе говоря,— следующее свойство собственного (свободного) движения системы:

$$x_{\text{соб}}(t) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad t \rightarrow \infty. \quad (4.1)$$

Из формул (3.5) для случая разных корней и (3.6) при наличии кратных корней характеристического уравнения системы видно, что свойство (4.1) имеет место тогда и только тогда, когда все корни ($i = 1, 2, \dots, n$) обладают *отрицательными вещественными частями*. Это иллюстрируется графиками для составляющих решения, соответствующих вещественному корню и паре комплексных корней (рис. 4.1).

Если же хотя бы один вещественный корень λ_i характеристического уравнения будет положительным, или если хотя бы одна пара комплексных корней будет иметь положительную вещественную часть, то переходный процесс будет расходящимся (рис. 4.2).

Если в характеристическом уравнении системы имеется хотя бы один нулевой корень $\lambda_i = 0$ или хотя бы одна пара чисто мнимых корней $\lambda_{i,i+1} = \pm j\omega$, а все остальные корни имеют отрицательные вещественные части, то будем говорить, что система находится на границе устойчивости. Это следует из того, что нулевой корень можно рассматривать как границу между отрицательным и положительным, а чисто мнимый корень — как границу между комплексными корнями с отрицательной и положительной вещественными частями.

Управление техническими системами

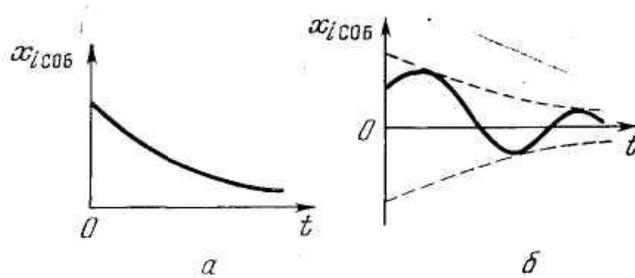


Рис. 4.1

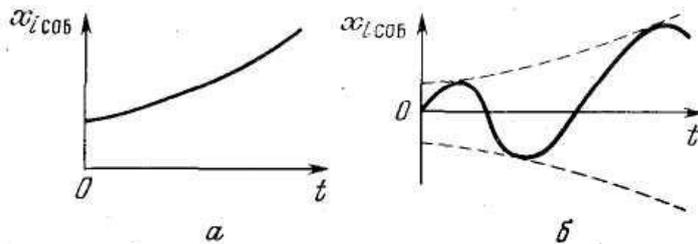


Рис. 4.2

Поведением замкнутой системы на границе устойчивости пока интересоваться не будем, так как работоспособная система автоматического регулирования должна быть устойчивой с запасом и не приближаться к этой границе.

Условие устойчивости линейной системы выражается, следовательно, в том, что все корни характеристического уравнения λ_i должны располагаться в левой полуплоскости комплексного переменного λ (рис. 4.3). Мнимая ось ω плоскости корней служит границей устойчивости.

Можно выделить три типа границ устойчивости линейной системы, которые характеризуются соответственно:

- 1) нулевым корнем $\lambda_i=0$;
- 2) парой чисто мнимых корней $\lambda_{1,2} = \pm j\omega$;
- 3) бесконечно удаленным корнем λ_i .

Заметим, что бесконечность на комплексной плоскости рассматривается как бесконечно удаленная точка, противоположная нулевой. Поэтому она тоже является границей между положительной (правой) и отрицательной (левой) полуплоскостями.

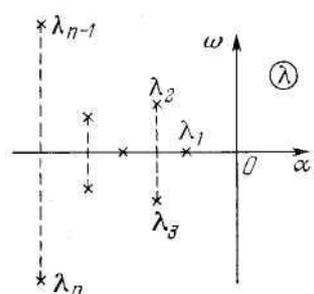


Рис. 4.3

В первом случае ($\lambda_1=0$) граница устойчивости называется *апериодической*, а во втором случае ($\lambda_{1,2} = \pm j\omega$)—*колебательной*, причем значение мнимой части корня ω равно частоте незатухающих колебаний

Управление техническими системами

системы на границе устойчивости, так как при $\lambda_{1,2} = \pm j\omega$ имеем решение

$$x_{\text{своб}} = A \sin(\omega t + \beta),$$

где A и β определяются начальными условиями.

Перейдем теперь к *реальным системам*, которые исследуются в линеаризованном виде. Прежде всего, надо дать общее определение понятия устойчивости и определить, как может влиять на устойчивость небольшое отличие реальной системы от ее линейной математической модели. Надо быть уверенным, что исследование устойчивости проектируемой линейной системы обеспечит затем устойчивость и системы реальной с малыми нелинейностями.

Общее определение *понятия устойчивости любой динамической системы по Ляпунову* выглядит следующим образом.

Запишем уравнения динамики нелинейной системы n -го порядка в нормальной форме Коши

$$\frac{dy_i}{dt} = F_i(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.2)$$

при отсутствии возмущающих воздействий. Устойчивость рассматривается как свойство свободного движения системы после начального отклонения ее, вызванного любыми причинами.

Пусть $y^*(t)$ обозначает некоторый установившийся процесс работы системы или, как говорят, *невозмущенное движение*. Отклонение *возмущенного движения* $y(t)$, определяемого уравнениями (4.2) при начальных условиях $y(t_0)$, обозначим через $x(t)$:

$$x_i(t) = y_i(t) - y_i^*(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (4.3)$$

Тогда можно написать уравнения возмущенного движения в отклонениях в виде

$$\frac{dx_i}{dt} = \Phi_i(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (4.4)$$

а невозмущенное движение будет $x^* = 0$. Переменные x_i являются координатами состояния системы. В общем случае конкретное выражение уравнений (4.4) зависит от вида установившегося процесса $y^*(t)$, так как они получаются из (4.2) подстановкой (4.3). Поэтому, исследуя уравнения (4.4), вообще говоря, не-

Управление техническими системами

обходимо указывать, об устойчивости какого установившегося режима или невозмущенного движения $y^*(t)$ идет речь.

Невозмущенное (установившееся) движение $y_i^*(t)$ системы n -го порядка можно представить геометрически условно в n -мерном пространстве (с добавлением еще оси времени t) в виде некоторой кривой (рис. 4.4). Возмущенное движение $y(t)$, вызванное начальным отклонением при $t = t_0$ изобразится другой кривой (рис. 4.4).

В отклонениях $x(t)$, т.е. в пространстве координат состояния системы, эта кривая возмущенного движения будет выглядеть как показано на рис. 4.5. При этом невозмущенное движение $x^* = 0$ изобразится прямой линией, совпадающей с осью t .

Невозмущенное движение системы $x^* = 0$ называется *устойчивым*, если, задав трубку сколь угодно малого n -мерного сечения ε (рис. 4.5), можно подобрать в начальный момент t_0 такую область начальных условий δ , зависящую от ε , что в дальнейшем с увеличением t возмущенное движение $x(t)$ не выйдет из заданной трубки ε .

Аналитическое определение *понятия устойчивости по Ляпунову* формулируется следующим образом.

Невозмущенное движение системы $x^* = 0$ называется *устойчивым*, если при заданном $\varepsilon > 0$, сколь бы оно мало ни было, существует такое $\delta > 0$, зависящее от ε , что при начальных условиях

$$|x_i(t_0)| < \delta \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

в дальнейшем движении ($t_0 < t < \infty$) будет все время соблюдаться условие

$$|x_i(t)| < \varepsilon \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Заметим, что в этом аналитическом определении области ε и δ , в отличие от рис. 4.5, выглядят «прямоугольными» (в n -мерном пространстве), что не имеет принципиального значения.

Невозмущенное движение $x^* = 0$ будет *неустойчивым*, если указанное условие не выполняется хотя бы для одного из x_i

Если в рамках указанного выше условия имеем $x(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, то невозмущенное движение $x^* = 0$ называется *асимптотически устойчивым*.

Если же $x(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ после любых больших начальных отклонений, то система называется *устойчивой в целом* (или «в большом»).

Управление техническими системами

Обратимся теперь к *линеаризованной системе*. Уравнения (4.4) в процессе линеаризации (разложением в ряд Тейлора) получают вид

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in} + \varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (4.5)$$

где через φ_i , обозначены члены высокого порядка, начиная со второго.

Получаемая отсюда линейная система путем отбрасывания малых нелинейностей φ_i , называется *первым приближением*:

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in} \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Для него можно написать характеристическое уравнение

$$D(\lambda) = \begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Для нелинейных систем, к которым применимо разложение вида (4.5), существуют следующие три теоремы Ляпунова об исследовании устойчивости по первому приближению:

- невозмущенное движение $x^*=0$ устойчиво независимо от вида малых нелинейностей φ_i , если все корни характеристического уравнения $D(\lambda)=0$ имеют отрицательные вещественные части;
- невозмущенное движение $x^*=0$ неустойчиво независимо от вида малых нелинейностей φ_i если хотя бы один корень характеристического уравнения $D(\lambda)=0$ имеет положительную вещественную часть;
- в случае наличия в каких-либо корнях характеристического уравнения $D(\lambda)=0$ нулевой вещественной части при всех остальных отрицательных, ничего нельзя сказать об устойчивости невозмущенного движения $x^*=0$ по первому приближению без специального исследования полного уравнения (4.5) с малыми нелинейностями φ_i

Третий случай для *линейной теории* автоматического управления не представляет интереса, так как наличие нулевого корня или чисто мнимых корней характеристического уравнения будет означать просто границу устойчивости линейной системы. А система не должна находиться не только на границе устойчивости, но даже и вблизи нее.

Поэтому для наших целей достаточно использовать первые две теоремы, которые и являются обоснованием всей излагаемой ниже теории устойчивости линеаризованных систем, основанной на требовании к корням характеристического уравнения, указанном в начале данного параграфа.

Заметим, что поскольку требование к корням обеспечивает свойство $x_{\text{соб}}(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$ при любых начальных условиях, то *линейная система оказывается всегда при этом устойчивой асимптотически и в целом («в большом»)*. Речь идет, конечно, об обыкновенных линейных системах с постоянными параметрами.

1. Алгебраические критерии устойчивости

Выше было сформулировано условие устойчивости линейной системы в виде требования к корням характеристического уравнения. Однако вычисление корней уравнения высокой степени затруднительно. Поэтому были выведены *критерии устойчивости*, позволяющие судить об устойчивости или неустойчивости системы непосредственно по коэффициентам характеристического уравнения без вычисления его корней.

Различные формы таких критериев рассматриваются в курсах высшей алгебры. В теории автоматического регулирования наибольшее применение из алгебраических критериев устойчивости получили критерий Рауса и критерий Гурвица. Мы ограничимся одним последним.

Предварительно рассмотрим необходимое условие устойчивости.

Пусть характеристическое уравнение линейной системы $D(\lambda)=0$ в развернутой форме имеет вид

$$a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1}\lambda + a_n = 0. \quad (4.6)$$

Докажем, что *необходимым условием устойчивости является положительность всех коэффициентов характеристического уравнения*, т.е.

$$a_1 > 0, a_2 > 0, \dots, a_{n-1} > 0, a_n > 0, \text{ если } a_0 > 0 \quad (4.7)$$

(этому условию удовлетворяет и случай всех отрицательных коэффициентов, если $a_0 < 0$, так как можно поменять все знаки на обратные).

Для доказательства разложим левую часть характеристического уравнения (4.6) на множители:

$$a_0(\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2)\dots(\lambda - \lambda_n) = 0, \quad a_0 > 0.$$

Пусть все корни его имеют отрицательные вещественные части

$$\lambda_1 = -|\alpha_1|, \lambda_{2,3} = -|\alpha_2| \pm j\omega_2, \dots, \lambda_n = -|\alpha_n|.$$

Управление техническими системами

Подставив их в уравнение, получим

$$a_0(\lambda + |\alpha_1|)(\lambda + |\alpha_2| - j\omega_2)(\lambda + |\alpha_2| + j\omega_2) \dots (\lambda + |\alpha_n|) = 0.$$

Поскольку средние два сомножителя дают

$$[(\lambda + |\alpha_2|)^2 + \omega^2],$$

то видно, что после перемножения всех скобок получим в уравнении только положительные коэффициенты. Это и требовалось доказать.

Однако в общем случае положительность коэффициентов уравнения недостаточна для устойчивости системы. В самом деле, положительные коэффициенты уравнения могут получиться и при положительных вещественных частях *комплексных* корней. Но *все вещественные корни* при положительных коэффициентах уравнения будут обязательно отрицательными.

Только в частных случаях, когда имеется уравнение *первой или второй* степени, положительность коэффициентов оказывается *необходимым и достаточным* условием устойчивости (это легко проверить). А при $n \geq 3$ это условие лишь необходимо, но недостаточно, ибо оно обеспечивает отрицательность только вещественных корней.

Приведем теперь *критерий устойчивости Гурвица* без доказательства. Он формулируется следующим образом.

Для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы были *положительными* n *главных определителей* следующей матрицы коэффициентов характеристического уравнения (4.6) данной системы:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_n \end{bmatrix}, \quad (a_0 > 0).$$

В первой строке матрицы пишутся коэффициенты с нечетными индексами, во второй — с четными. Концы строк заполняются нулями, так чтобы матрица имела n столбцов, где n —порядок уравнения системы. Третья и четвертая строки получаются сдвигом первых двух на одно место вправо и т.д.

Указанные главные определители имеют вид

$$\Delta_1 = a_1 > 0, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} > 0, \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0, \dots \quad (4.8)$$

Управление техническими системами

Они называются определителями Гурвица.

Последний определитель Гурвица, как видно из приведенной выше матрицы, равен

$$\Delta_n = \Delta_{n-1} a_n.$$

Поэтому его положительность сводится при $\Delta_{n-1} > 0$ к условию $a_n > 0$.

Наиболее важным, как увидим далее, является предпоследний определитель Гурвица Δ_{n-1} .

Для систем первого и второго порядка критерий Гурвица сводится просто к положительности коэффициентов a_0, a_1, a_2 . Для системы третьего порядка характеристическое уравнение имеет вид

$$a_0 \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 = 0,$$

а условие устойчивости по Гурвицу будет

$$\Delta_{n-1} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad (n = 3), \quad (4.9)$$

причем остальные неравенства сводятся к требованию положительности коэффициентов a_0, a_1, a_2, a_3 .

Условие (4.9) записывается еще в виде

$$a_1 a_2 > a_0 a_3 \quad (4.10)$$

(произведение средних коэффициентов уравнения должно быть больше произведения крайних). Этот критерий для систем третьего порядка ранее был получен И. А. Вышнеградским.

Аналогично для системы четвертого порядка

$$a_0 \lambda^4 + a_1 \lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_3 \lambda + a_4 = 0$$

условием устойчивости по Гурвицу будет положительность всех коэффициентов характеристического уравнения и выполнение неравенства

Для устойчивости систем пятого и шестого порядков требуется, кроме положительности коэффициентов, выполнение двух неравенств типа (4.9), (4.11), но более сложной формы. Для систем седьмого и восьмого порядков — трех неравенств и т.д. Сложность этих неравенств быстро возрастает с увеличением порядка системы n .

Поэтому для общих исследований особенно удобен критерий Гурвица при $n \leq 4$. Но при числовом задании всех коэффициентов легко проверить устойчивость системы, конечно, и при любом n .

Найдем *границы устойчивости*. Апериодическая граница устойчивости (нулевой корень) будет согласно уравнению (4.6) в том случае, когда $a_n = 0$, но при условии положительности всех определителей Гурвица (кроме последнего).

Пара чисто мнимых корней в характеристическом уравнении (колебательная граница устойчивости) появляется при

$$\Delta_{n-1} = 0, \quad (4.12)$$

если при этом все остальные определители Гурвица положительны (для систем третьего и четвертого порядка это последнее означает просто положительность коэффициентов уравнения).

Наконец, граница устойчивости, соответствующая бесконечному корню, будет, согласно уравнению (4.6), при $a_0 = 0$. В самом деле, если все уравнение разделить на λ^n , то получим

$$a_0 + a_1 \frac{1}{\lambda} + \dots + a_{n-1} \frac{1}{\lambda^{n-1}} + a_n \frac{1}{\lambda^n} = 0.$$

Отсюда видно, что при $a_0 = 0$ имеем $\frac{1}{\lambda} = 0$, а значит $\lambda = \infty$.

3. Критерий устойчивости Михайлова. Построение областей устойчивости

Возьмем характеристический многочлен линейной системы n-го порядка

$$D(\lambda) = a_0 \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n \quad (4.14)$$

с положительными коэффициентами (необходимое условие устойчивости).

Подставив в него чисто мнимое значение $\lambda = j\omega$, получим

$$D(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega), \quad (4.15)$$

где

$$\begin{aligned} X &= a_n - a_{n-2}\omega^2 + \dots, \\ Y &= a_{n-1}\omega - a_{n-3}\omega^3 + \dots \end{aligned} \quad (4.16)$$

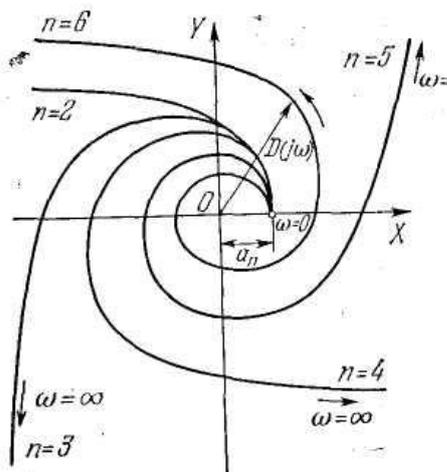


Рис. 4.9

Изобразим годограф этого выражения на комплексной плоскости (X, Y). Прежде всего заметим следующее:

при $\omega = 0$ имеем $X = a_n$, $Y = 0$
 при $\omega = \infty$ будет $X = +\infty$ и $Y = -\infty$

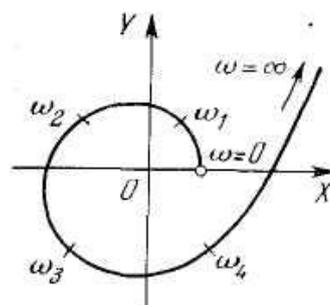


Рис. 4.10

Предельные значения $+\infty$ или $-\infty$

Управление техническими системами

зависят от показателя степени n . Из формул (4.16), где все a_i положительны, видно, что при $\omega = \infty$ для $n = 3$ будет $X = -\infty$, $Y = -\infty$; а для $n = 5$ ПОЛУЧИМ $X = +\infty$, $Y = +\infty$ и т.д. Поэтому годографы эти имеют для различных n примерно такие формы как показано на рис. 4.9. Эти годографы называются *кривыми Михайлова*.

Практически кривая Михайлова строится по точкам. Задают несколько разных значений ω в интервале между 0 и ∞ (достаточно по одной точке в каждом квадранте). По формулам (4.16) вычисляют для них координаты точек кривой Михайлова X и Y (рис. 4.10). Поэтому вдоль кривой Михайлова обычно имеются отметки конкретных значений ω .

Сформулируем теперь критерий устойчивости Михайлова, а затем докажем его.

Формулировка критерия. Для устойчивости линейной системы n -го порядка необходимо и достаточно, чтобы изменение аргумента функции $D(j\omega)$ при изменении ω от 0 до ∞ равнялось бы $n \frac{\pi}{2}$, т.е.

$$\Delta \arg D(j\omega) = n \frac{\pi}{2} \quad \text{при} \quad 0 \leq \omega \leq \infty. \quad (4.17)$$

Другими словами, требуется, чтобы кривая Михайлова (рис. 4.9) проходила последовательно n квадрантов против часовой стрелки (все время окружая начало координат). Например, видно, что кривые на рис. 4.9 соответствуют устойчивым системам, а на рис. 4.11 — неустойчивой системе при $n = 5$.

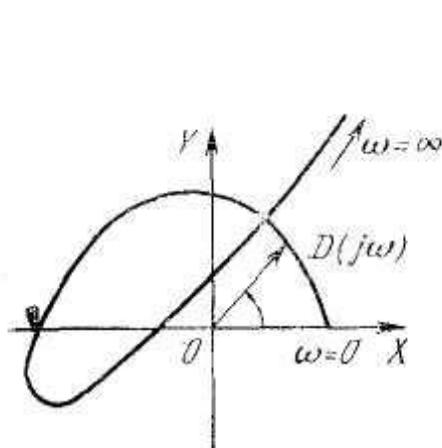


Рис. 4.11

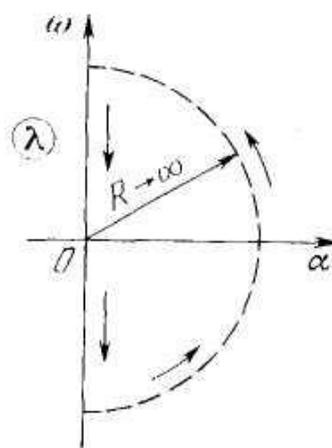


Рис. 4.12

Доказательство этого критерия следующее.

Возьмем на комплексной плоскости корней λ многочлена $D(\lambda)$ (4.14) контур, показанный на рис. 4.12. При обходе этого контура X функция $D(\lambda)$ согласно принципу аргумента, известному из теории функций комплексного переменного, должна получить приращение аргумента

Управление техническими системами

$$\Delta \arg D(\lambda) = m \cdot 2\pi, \quad (4.18)$$

где m — число корней внутри контура, т.е. в правой полуплоскости (полюса функции здесь отсутствуют). Представив $D(\lambda)$ в виде

$$D(\lambda) = \lambda^n \left(a_0 + \frac{a_1}{\lambda} + \dots + \frac{a_n}{\lambda^n} \right), \quad (4.19)$$

получим на первой (пунктирной) части контура, где $\lambda \rightarrow \infty$, приращение $\Delta_1 \arg \lambda = \pi$, а для многочлена $D(\lambda)$

$$\Delta_1 \arg D(\lambda) = \Delta \arg \lambda^n = n\pi,$$

так как внутри скобки в (4.19) все дроби обращаются в нули.

Поэтому для выполнения равенства (4.18) на второй части контура (мнимая ось на рис. 4.12), т. е. при

$$\lambda = j\omega, \quad +\infty \geq \omega \geq -\infty$$

должно согласно (4.18) получиться

$$\Delta_2 \arg D(\lambda) = (2m - n)\pi. \quad (4.20)$$

Но из (4.16) видно, что $X(\omega)$ четная, а $Y(\omega)$ нечетная функции ω , т. е.

$$D(-j\omega) = \overline{D(j\omega)}.$$

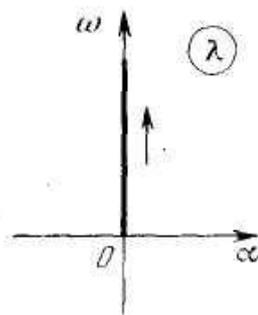


Рис. 4.13

Поэтому можно проходить лишь положительную часть мнимой оси и полученный результат удвоить.

Используя этот факт и меняя направление изменения ω , для положительной части мнимой оси (рис. 4.13), вместо (4.20) мы должны получить

$$\Delta \arg D(j\omega) = (n - 2m) \frac{\pi}{2} \quad \text{при } 0 \leq \omega \leq \infty. \quad (4.21)$$

Для устойчивости системы надо потребовать, чтобы все корни λ_i многочлена $D(\lambda)$ лежали в левой полуплоскости, т.е. чтобы $m = 0$, а значит, чтобы

$$\Delta \arg D(j\omega) = n \frac{\pi}{2} \quad \text{при } 0 \leq \omega \leq \infty,$$

что и требовалось доказать.

Формулу (4.21) можно использовать для подсчета числа корней m , лежащих справа, когда система неустойчива, а именно

$$m = \frac{n}{2} - \frac{\Delta \arg d(j\omega)}{\pi}, \quad (4.22)$$

Управление техническими системами

Например, если для системы пятого порядка ($n = 5$) получена кривая Михайлова в виде рис. 4.11, то, подсчитывая обороты вектора $D(j\omega)$ по чертежу, получаем

$$\Delta \arg D(j\omega) = \frac{\pi}{2}$$

и по формуле (4.22) находим $m=2$. Следовательно, данная система неустойчива за счет наличия в характеристическом уравнении $D(\lambda) = 0$ двух корней с положительной вещественной частью.

Рассмотрим теперь *определение границ устойчивости* по критерию Михайлова. Очевидно, что все три типа границ устойчивости можно объединить равенством $\lambda_1=j\omega_0$, включая $\omega_0=0$ и $\omega_0=\infty$.

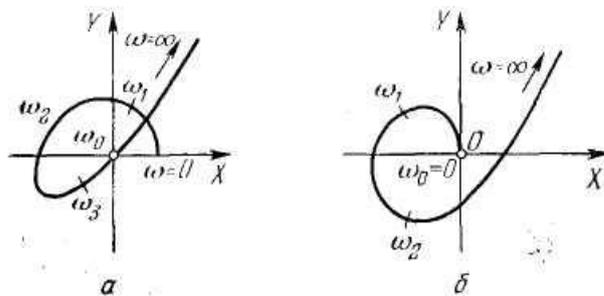


Рис. 4.14

Если характеристическое уравнение системы $D(\lambda)=0$ имеет корень $\lambda=j\omega_0$, то удовлетворяется равенство

$$D(j\omega_0) = 0,$$

откуда согласно (4.16) получаем

$$X(\omega_0) = 0, \quad Y(\omega_0) = 0. \quad (4.23)$$

Графически это означает попадание одной точки кривой Михайлова ($\omega = \omega_0$) в начало координат, как показано, например, на рис. 4.14.

Физический смысл величины $\omega = \omega_0$ — частота колебаний системы на границе устойчивости.

Важно отметить следующее. На границе устойчивости системы все остальные корни, кроме $\lambda = \pm j\omega_0$, должны лежать слева от мнимой оси плоскости λ . Иначе система будет неустойчивой. Поэтому, кроме условия (4.23), требуется, чтобы кривая Михайлова проходила бы все остальные квадранты, кроме пропущенного из-за прохождения через начало координат, как показано, например, для $n=5$, на рис. 4.14. Следовательно, например, рис. 4.15 соответствует не границе устойчивости, а неустойчивой системе.

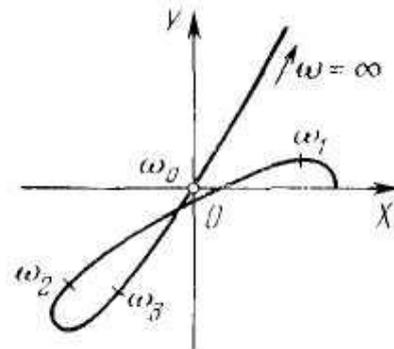


Рис. 4.15

Другими словами, очертание кривой Михайлова на границе устойчивости должно быть таким, чтобы *малой деформацией ее в начале координат* можно было удовлетворить критерию Михайлова. Это можно сделать на рис. 4.14, но не на рис. 4.15.

Аналитически это означает, что в дополнение к равенствам (4.23) должен удовлетворяться критерий устойчивости для многочлена

$$D_1(\lambda) = \frac{D(\lambda)}{\lambda^2 + \omega_0^2}, \quad (4.24)$$

в котором исключена пара чисто мнимых корней, а в случае нулевого корня

$$D_1(\lambda) = \frac{D(\lambda)}{\lambda}.$$

Заметим, что условие (4.24) надо проверять только при $l \geq 5$, так как при $l \leq 4$ оно сводится просто к положительности коэффициентов уравнения $D(K) = 0$ (которая предполагается с самого начала).

Выражения (4.23) используются для *построения областей устойчивости* системы на плоскости любых двух параметров A и B , выбираемых при проектировании системы (это могут быть, например, коэффициент усиления и постоянная времени). Тогда (4.23) можно записать в виде

$$X(\omega_0, A, B) = 0, \quad Y(\omega_0, A, B) = 0, \quad (4.25)$$

причем параметры A и B входят в коэффициенты этих выражений (коэффициенты характеристического уравнения системы).

Таким образом, выражения (4.25) представляют собой *уравнения* границ устойчивости, изображаемых в виде некоторых кривых на плоскости параметров A, B . Путем задания разных значений величины $\omega_0 (0 \leq \omega_0 \leq \infty)$ каждый раз из уравнений (4.25) определяются значения параметров A и B . В результате по точкам строятся границы устойчивости на плоскости A, B .

4. Частотный критерий устойчивости Найквиста

Частотный критерий устойчивости (критерий Найквиста) базируется на частотных характеристиках разомкнутой цепи системы автоматического управления и дает правила, согласно которым по виду частотной характеристики разомкнутой цепи можно судить об устойчивости замкнутой системы.

Рассмотрим разные случаи.

Система, устойчивая в разомкнутом состоянии. Передаточная функция разомкнутой цепи

Управление техническими системами

$$W(s) = \frac{KN(s)}{L(s)} = \frac{K(b_0s^m + \dots + 1)}{c_0s^n + \dots + 1}, \quad m < n. \quad (4.26)$$

Этот случай соответствует системам автоматического управления без астатизма. Введем вспомогательную функцию

$$W_1(s) = 1 + W(s) = \frac{L(s) + KN(s)}{L(s)} = \frac{D(s)}{L(s)},$$

где $D(s)$ — характеристический многочлен замкнутой системы, а $L(s)$ — характеристический многочлен разомкнутой цепи этой системы.

Подставим $s=j\omega$, получим

$$W_1(j\omega) = \frac{D(j\omega)}{L(j\omega)}.$$

По критерию Михайлова изменение аргумента $L(j\omega)$ при $0 \leq \omega \leq \infty$ равно $n \frac{\pi}{2}$,

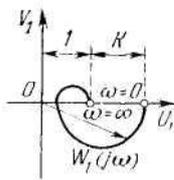


Рис. 4.17

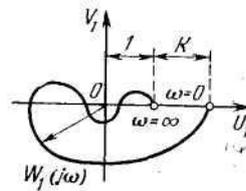


Рис. 4.18

так как предполагается, что разомкнутая цепь устойчива. С другой стороны, требуется, чтобы система была устойчивой в замкнутом состоянии. Для этого нужно

потребовать, чтобы изменение аргумента $D(j\omega)$ при $0 \leq \omega \leq \infty$ также равнялось $n \frac{\pi}{2}$.

Отсюда следует, что изменение аргумента $W_1(j\omega)$ должно быть:

$$\Delta \arg W_1(j\omega) = \Delta \arg D(j\omega) - \Delta \arg L(j\omega) = 0.$$

Это значит, что годограф $W_1(j\omega)$ не должен охватывать начало координат (рис. 4.17 и 4.18). Вернемся теперь к функции

$$W(j\omega) = W_1(j\omega) - 1,$$

которая представляет собой амплитудно-фазовую частотную характеристику разомкнутой цепи (рис. 4.19 и 4.20). Отсюда получаем следующую формулировку частотного критерия Найквиста.

Если разомкнутая цепь системы устойчива, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой цепи не охватывала точку (-1) (см. рис. 4.19 и 4.20).

График на рис. 4.19 соответствует случаю, когда устойчивость системы нарушится только с увеличением общего коэффициента усиления разомкнутой цепи K , а график на рис. 4.20 — случаю, когда и при уменьшении K система может стать неустойчивой (пропорционально величине K , согласно (4.26), меняются

радиус-векторы, всех точек характеристики). Неустойчивость замкнутой системы иллюстрируется на рис. 4.21 и 4.22.

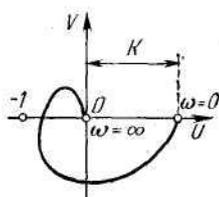


Рис. 4.19

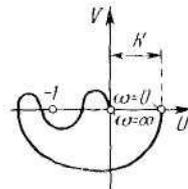


Рис. 4.20

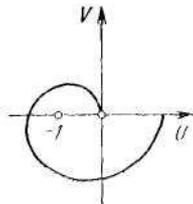


Рис. 4.21

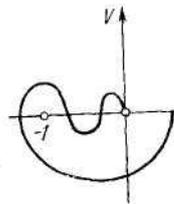


Рис. 4.22

Имея в виду сложные очертания амплитудно-фазовых характеристик (клювообразного вида как на рис. 4.20 и более сложные), к записанной выше формулировке частотного критерия добавляется разъяснение, что надо понимать под термином «нехват точки (-1)». Характеристика может пересекать отрицательную ось левее точки (-1), но тогда число положительных (сверху вниз) переходов характеристики через ось абсцисс левее точки (-1) должно равняться числу отрицательных переходов (снизу вверх).

Система, нейтральная в разомкнутом состоянии. Характеристический многочлен разомкнутой цепи $L(s)$ имеет нулевые корни, а все остальные корни имеют отрицательные вещественные части. Передаточная функция разомкнутой цепи $W(s)$ имеет соответственно нулевые полюса:

$$W(s) = \frac{KN(s)}{L(s)} = \frac{K(b_0s^m + \dots + 1)}{s^\nu(c_\nu s^{n-\nu} + \dots + 1)}, \quad m < n.$$

Это соответствует *астатическим системам*, причем ν — порядок астатизма.

Рассмотрим сначала случай $\nu=1$, т.е.

$$L(s) = s(c_1s^{n-1} + \dots + 1).$$

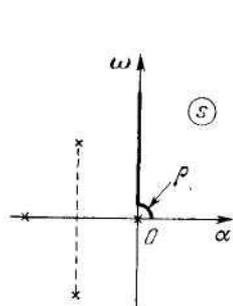


Рис. 4.23

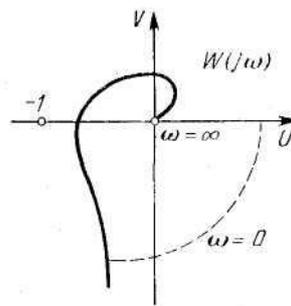


Рис. 4.24

Плоскость корней для $L(s)$ имеет вид, примерно как показано на рис. 4.23. Подстановка $s=j\omega$ при $0 \leq \omega \leq \infty$ означает перемещение вдоль оси ω от точки 0 вверх (рис. 4.23). При этом, чтобы все корни оставить слева, обойдем точку 0 по окружности малого радиуса, т. е.

$$s = \rho e^{j\varphi}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}.$$

Тогда при $s \rightarrow 0$ получим

$$W(s) \rightarrow \frac{K}{s} = \frac{K}{\rho e^{j\varphi}} = R e^{-j\varphi}, \quad 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2},$$

где $R = \frac{K}{\rho}$ — большая величина, причем $R \rightarrow \infty$ при $\rho \rightarrow 0$.

Следовательно, точке $\omega=0$ плоскости корней соответствует на характеристике $W(j\omega)$ четверть окружности бесконечного радиуса (рис. 4.24).

Поскольку при этих выкладках все корни $L(s)$ оставались слева, то формулировка критерия устойчивости остается такой же, как и для случая устойчивой разомкнутой цепи, а именно, не должна охватываться точка (-1) .

В случае $\nu=2$ и $\nu=3$ аналогично получаем ту же формулировку критерия — нехватка точки (-1) , как показано на рис. 4.25, а и б.

Для сложных очертаний амплитудно-фазовых характеристик в число отрицательных переходов надо включать и переход пунктирной окружности бесконечно большого радиуса при $\omega=0$. Это имеет место и на рис. 4.25.

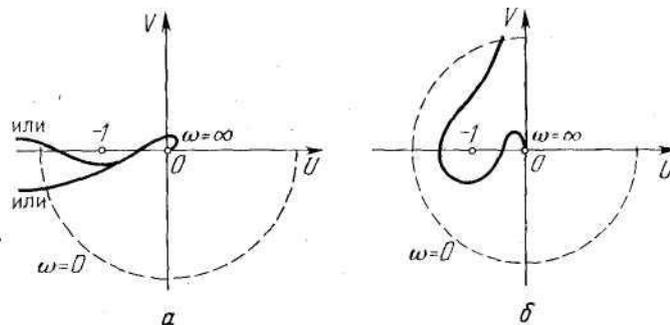


Рис. 4.25

Система с неустойчивой разомкнутой цепью. Пусть характеристический многочлен $L(s)$ разомкнутой цепи имеет l корней с положительной вещественной частью. Тогда, применяя формулу (4.21) к данному случаю, имеем

$$\Delta \arg L(j\omega) = (n - 2l) \frac{\pi}{2}.$$

Введенная выше вспомогательная функция

$$W_1(s) = 1 + W(s) = \frac{D(s)}{L_*(s)}$$

при замене $s=j\omega$, согласно критерию Михайлова для устойчивости замкнутой системы, должна иметь следующее изменение аргумента при $0 \leq \omega \leq \infty$:

$$\begin{aligned} \Delta \arg W_1(j\omega) &= \Delta \arg D(j\omega) - \Delta \arg L(j\omega) = \\ &= n \frac{\pi}{2} - (n - 2l) \frac{\pi}{2} = l\pi. \end{aligned}$$

Это значит, что для устойчивости замкнутой системы требуется, чтобы амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой цепи охватывала точку (-1) против часовой стрелки на угол $l\pi$, где l — число полюсов с положительной вещественной частью в передаточной функции неустойчивой разомкнутой цепи данной системы. Другими словами, левее точки (-1) разность между числом положительных и числом отрицательных переходов амплитудно-фазовой частотной характеристики через ось абсцисс должно равняться $l/2$.

Например, если передаточная функция разомкнутой цепи будет

$$W(s) = \frac{K(b_0 s^m + \dots + 1)}{c_0 s^n + \dots - 1},$$

т. е. имеет $l=1$ (один положительный полюс), то для устойчивости замкнутой системы амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой цепи должна иметь вид, примерно показанный на рис. 4.26, а или б, а в случае $l=3$ — на рис. 4.26, в. При этом начальная точка характеристики на оси абсцисс левее (-1) считается как половина перехода

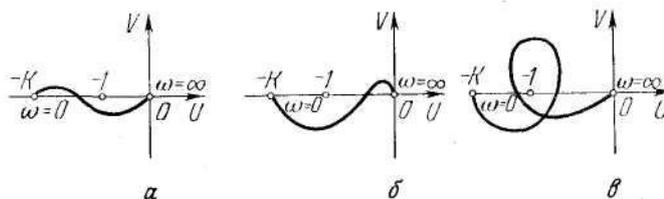


Рис. 4.26

Случай наличия пары чисто мнимых полюсов передаточной функции разомкнутой цепи. Этот случай может сочетаться со случаями расположения всех остальных полюсов слева от мнимой оси или наличия нулевого полюса, или, наконец, наличия полюсов справа. Во всех вариантах формулировки частотного критерия устойчивости замкнутой системы остаются прежними, причем разрыв характеристики в точке мнимого полюса заполняется полуокружностью бесконечного радиуса (рис. 4.27). Это вытекает из замены на плоскости s точки мнимого полюса полуокружностью малого радиуса, и образования соответствующего контура обхода, аналогично тому как на рис. 4.23 обходилась точка нулевого полюса.

Через T на рис. 4.27 обозначена постоянная времени соответствующего сомножителя (T^2s^2+1) , являющегося источником пары чисто мнимых корней в знаменателе передаточной функции $W(s)$ разомкнутой цепи.

Использование логарифмических частотных характеристик. Обратимся

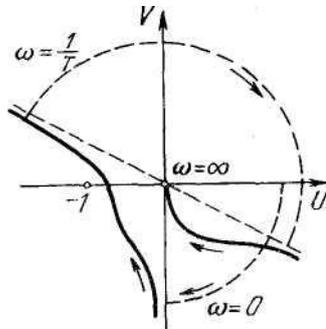


Рис. 4.27

сначала к первым двум случаям: разомкнутая цепь системы устойчива или нейтральна (соответственно, замкнутая система без астатизма и астатическая). Как установлено выше, амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой цепи не должна охватывать точку (-1) . Это значит, что должно быть

$$A < 1 \text{ или } L_m = 20 \lg A < 0$$

при $\varphi = -180^\circ$.

В свою очередь, это означает, что точка пересечения фазовой характеристики с линией -180° должна лежать правее частоты среза, т. е. правее точки пересечения амплитудной характеристики с осью абсцисс. Левее этой последней точки при сложных очертаниях ЛАХ может иметься четное число пересечений фазовой характеристики с линией -180° , как показано пунктиром на рис. 4.28, в соответствии с приведенным выше правилом равенства положительных и отрицательных переходов.

Первый график на рис. 4.28 соответствует системе без астатизма, а второй — системе с астатизмом первого порядка. Легко видеть, что пунктир на рис. 4.28, а соответствует характеристике на рис. 4.20. При подсчете точек пересечения фазовой характеристики с линией -180° надо иметь в виду, что если начало фазовой характеристики будет лежать ниже линии -180° (что соответствует рис. 4.25, б), то в число отрицательных переходов надо включать бесконечно удаленную влево точку $\omega = 0$.

Такова формулировка частотного критерия устойчивости применительно к логарифмическим характеристикам в случаях устойчивой и нейтральной разомкнутой цепи.

Осталось сказать, о случае, когда разомкнутая цепь неустойчива, т. е. $L(s)$ имеет l корней с положительной вещественной частью.

В этом случае разность между числом положительных и числом отрицательных переходов фазовой характеристики через линию -180° левее частоты среза ω_0 (где $L_m=0$) должно равняться $l/2$. Здесь положительным счи-

Управление техническими системами

тается переход снизу вверх. При этом начало характеристики в бесконечно удаленной точке $\omega=0$ на линии -180° считается за половину перехода.

Например, для случаев, изображенных на рис. 4.26 а, б, это выглядит так, как представлено на рис. 4.29 а, б.

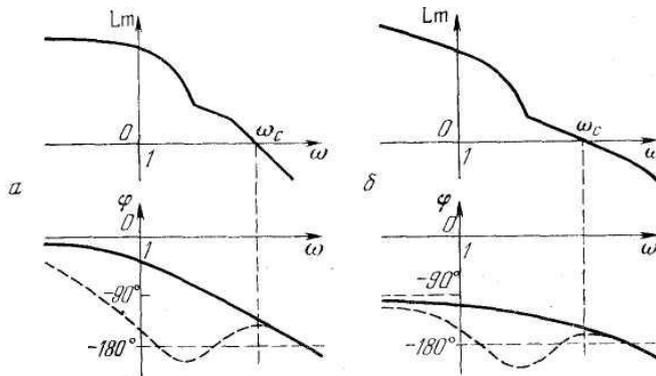


Рис. 4.28

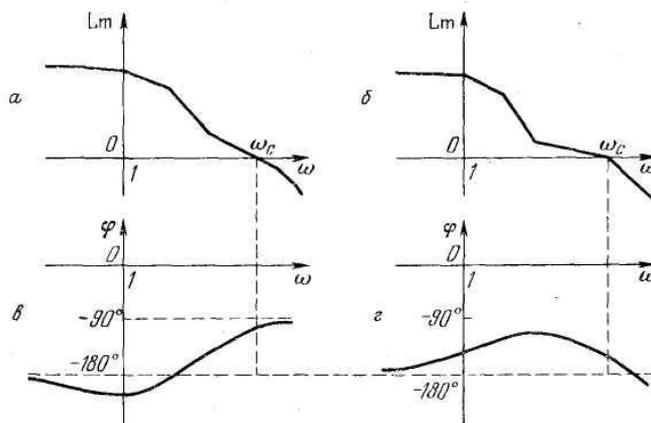


Рис. 4.29

Использование экспериментальных характеристик. Особенностью частотного критерия устойчивости, в отличие от предыдущих, является то, что не обязательно надо знать уравнения всех звеньев системы, а можно использовать экспериментальные данные.

Пусть, например, система должна состоять из трех блоков (рис. 4.30), причем для двух блоков имеются, допустим, уравнения или передаточные функции $W_1(s)$ и $W_3(s)$, а для одного блока (W_2) они неизвестны и очень трудно составить уравнения либо передаточную функцию, но блок уже имеется в природе или же для него легко сделать экспериментальный макет.

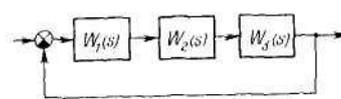


Рис. 4.30

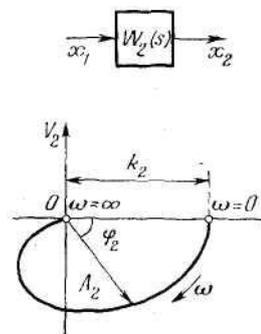


Рис. 4.31

Тогда для этого отдельно взятого блока (W_2) снимается экспериментально амплитудно-фазовая частотная характеристика (рис. 4.31) путем подачи на вход величины

$$x_1 = \sin \omega t$$

при разных со и замера каждый раз амплитуды A_2 и фазы φ_2 на выходе

$$x_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Полученная экспериментально характеристика перемножается с остальными, которые заданы аналитически, т.е. определяется

$$W(j\omega) = W_1(j\omega) W_2(j\omega) W_3(j\omega),$$

причем для каждого определенного значения частоты со модули (амплитуды) перемножаются, а аргументы (фазы) складываются

$$A = A_1 A_2 A_3, \quad \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3.$$

По виду полученной общей характеристики разомкнутой цепи $W(j\omega)$ на основании частотного критерия Найквиста судят о том, будет ли устойчива проектируемая из этих блоков замкнутая система.

ЛЕКЦИЯ №7

По теме: Оценки качества переходного процесса

1. Требования и оценки качества переходного процесса, их связь с частотными характеристиками

Исследованная выше устойчивость системы обеспечивает затухание переходных процессов с течением времени, т. е. обеспечивает принципиальную возможность прихода системы в некоторое установившееся состояние при любом внешнем возмущении.

Однако далее требуется, во-первых, чтобы это установившееся состояние было достаточно близко к заданному и, во-вторых, чтобы затухание переходного процесса было достаточно быстрым, а отклонения (колебания) при этом были бы невелики.

Поэтому после обеспечения устойчивости системы нужно позаботиться о требуемом качестве процесса управления, в понятие которого входят, в частности:

- 1) точность системы в установившемся состоянии,
- 2) качество переходного процесса.

Вообще говоря, в понятие качества системы может входить и ряд других показателей, кроме указанных основных.

Управление техническими системами

Методы определения точности системы были изучены выше в главе 3 (статические и скоростные ошибки, точность при гармоническом воздействии, коэффициенты ошибок при произвольном внешнем воздействии). О методах определения кривой переходного процесса было сказано в § 3.1. Но при проектировании системы вначале не нужно знать деталей очертания всей кривой переходного процесса, а можно исходить из некоторых оценочных характеристик качества, таких как (см. рис. 5.1) длительность переходного процесса t_n (быстродействие системы), величина перерегулирования σ , количество (или частота) колебаний, иногда плавность процесса (ограничение по скорости и ускорению в переходном процессе).

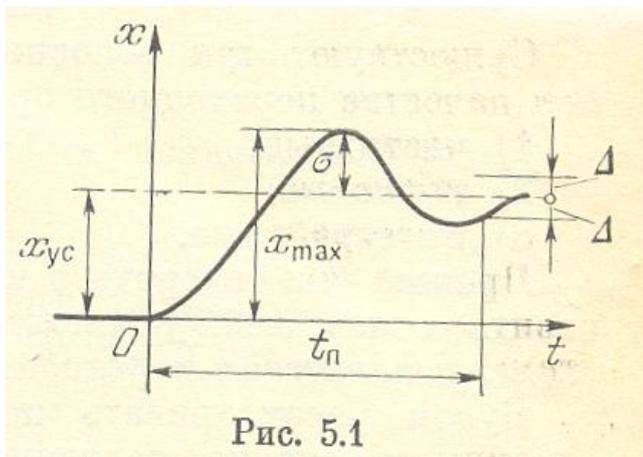


Рис. 5.1

Теоретически переходный процесс в устойчивой линейной системе затухает в бесконечности:

$$x - x_{yc} = \sum_{i=1}^n C_i e^{\lambda_i t} \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty.$$

Практически же длительность переходного процесса ограничивают тем моментом, когда отклонения становятся пренебрежимо малыми, например (рис. 5.1), когда величина

$$\Delta = |x - x_{yc}|$$

составляет 5 % от x_{yc} . Перерегулирование $\sigma = x_{max} - x_{yc}$ определяется также в процентах от величины x_{yc} (скажем, 10—30%). При $\sigma=0$ процесс называется монотонным.

Таким образом, в начале проектирования системы не играют роли детали очертания кривой переходного процесса, а важно, чтобы она не выходила за определенные границы, показанные, например, на рис. 5.2. Существуют три

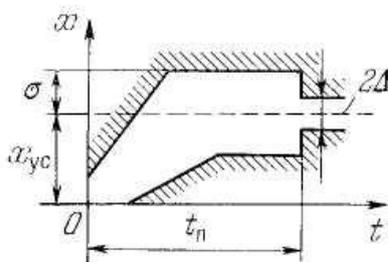


Рис. 5.2

Управление техническими системами

основные вида приближенных оценок качества переходного процесса:

- 1) частотные;
- 2) корневые;
- 3) интегральные.

Прежде чем говорить о частотных оценках, надо установить *связь между частотными характеристиками системы и качеством переходного процесса.*

Будем рассматривать переходный процесс $x(t)$ при единичном скачке задающего воздействия $g(t) \rightarrow 1(t)$. В изображениях по Лапласу

$$X(s) = \Phi(s)G(s), \quad G(s) = \frac{1}{s},$$

где $\Phi(s)$ — главная передаточная функция замкнутой системы.

Подставив сюда $s=j\omega$, запишем выражение интеграла Фурье (обратное преобразование Фурье):

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(j\omega) e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Phi(j\omega)}{j\omega} e^{j\omega t} d\omega. \quad (5.1)$$

Здесь $\Phi(j\omega)$ является амплитудно-фазовой частотной характеристикой замкнутой системы

$$\Phi(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega), \quad (5.2)$$

причем $P(\omega)$ — вещественная, а $Q(\omega)$ — мнимая частотные характеристики замкнутой системы. Вычтем из (5.1) установившееся значение

$$x_{yc} = P(0)$$

(это равенство вытекает из того, что значение $\omega=0$ соответствует постоянному значению x в установившемся состоянии).

В результате получим

$$x(t) - P(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Phi(j\omega) - P(0)}{j\omega} e^{j\omega t} d\omega.$$

Подставим сюда (5.2) и заменим $e^{j\omega t} = \cos\omega t + j \sin\omega t$. Отбросив мнимую часть полученного выражения (так как $x(t)$ — вещественно), будем иметь

$$\begin{aligned} x(t) - P(0) &= \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\omega} [P(\omega) \sin \omega t + Q(\omega) \cos \omega t - P(0) \sin \omega t] d\omega. \end{aligned}$$

Подынтегральное выражение представляет собой четную функцию. Поэтому интегрирование в пределах $(-\infty; \infty)$ можно заменить на $(0, \infty)$ и удвоить результат. Кроме того, заметим, что

$$\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega = \frac{P(0)}{2}.$$

В результате получаем

$$x(t) = \frac{P(0)}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(\omega) \cos \omega t}{\omega} d\omega. \quad (5.3)$$

Поскольку даны нулевые начальные условия, причем нулевые значения функции распространяются на $t < 0$, то можно, подставив в формулу (5.3) вместо t величину t , написать

$$0 = \frac{P(0)}{2} - \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(\omega) \cos \omega t}{\omega} d\omega. \quad (5.4)$$

Складывая и вычитая выражения (5.3) и (5.4), приходим к формулам соответственно

$$x(t) = P(0) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(\omega) \cos \omega t}{\omega} d\omega,$$

$$x(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P(\omega) \sin \omega t}{\omega} d\omega. \quad (5.5)$$

Последняя формула будет использована ниже для частотных оценок качества переходного процесса. Отметим, что существуют приближенные способы построения кривой переходного процесса в замкнутой системе по этой формуле.

Приведем здесь также частотный способ определения *весовой функции замкнутой системы*. Как известно (см. § 1.1), если переходный процесс $x(t)$ определен при задающем воздействии $g(t)=1(t)$, то имеет место соотношение

$$k_x(t) = \frac{dx}{dt}.$$

Поэтому, дифференцируя выражение (5.5), находим

$$k_x(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P(\omega) \cos \omega t d\omega. \quad (5.6)$$

Существует приближенный способ вычислений по этой формуле.

Аналогично можно найти и весовую функцию замкнутой системы $k_f(t)$ для возмущающего воздействия.

Знание весовых функций замкнутой системы $k_x(t)$ и $k_f(t)$ позволяет согласно формуле (3.8) определять вынужденную часть процесса регулирования при любых внешних воздействиях $g(t)$ и $f(t)$.

Ниже рассматриваются различные формы оценок качества переходного процесса в замкнутой системе. Какие из них применять на практике — зависит от того, какой материал уже имеется в распоряжении относительно данной системы, а также от того, какими методами предполагается вести дальнейший процесс проектирования системы.

2. Частотные оценки качества

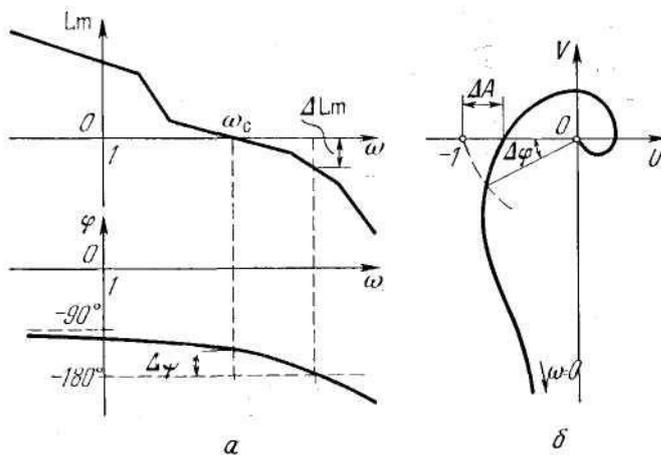


Рис. 5.3

Простейшей из частотных оценок качества переходного процесса является *запас устойчивости*. Он определяет только степень близости замкнутой системы к границе устойчивости по виду частотных характеристик ее разомкнутой цепи.

На рис. 5.3, а показано, как находить запас по амплитуде ΔL_m и запас по фазе $\Delta \varphi$ по логарифмическим частотным характеристикам. Если перенести их на амплитудно-фазовую частотную характеристику, то это будет соответственно ΔA и $\Delta \varphi$ (рис. 5.3, б)

Длительность переходного процесса и перерегулирование можно приблизительно оценить по виду вещественной частотной характеристики замкнутой системы $P(\omega)$.

На основании зависимости (5.5) выведены следующие оценки.

В переходном процессе получится перерегулирование $\sigma > 18\%$, если $P(\omega)$ имеет «горб» (рис. 5.4, а). При отсутствии «горба» (рис. 5.4, б) будет $\sigma < 18\%$. Процесс

окажется наверняка монотонным ($\sigma = 0$), если $\frac{dP}{d\omega} < 0$ и монотонно убывает по абсолютному значению (рис. 5.4, в).

Управление техническими системами

Длительность переходного процесса t_n оценивается приблизительно по величине интервала существенных частот $\omega_{сч}$ (рис. 5.4), причем

$$\frac{\pi}{\omega_{сч}} < t_n < \frac{4\pi}{\omega_{сч}}$$

Важно отметить, что время t_n обратно пропорционально величине $\omega_{сч}$ т. е. чем более *растянута частотная характеристика*, тем *короче переходный процесс*. Физически это связано с тем, что, чем более высокие частоты «пропускает» система, тем она менее инерционна в своих реакциях на внешние воздействия.

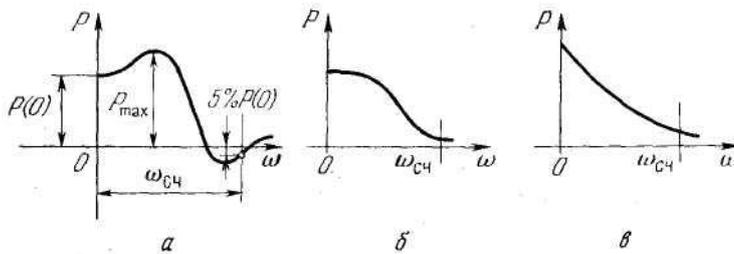


Рис. 5.4

Это же свойство позволяет связать время t_n с частотой среза ω_c (рис. 5.3) характеристики разомкнутой цепи. Длительность переходного процесса t_n тем меньше, чем больше частота среза ω_c . Зависимость между величинами σ , t_n , ω_c и P_{max} представлена графиком на рис. 5.5.

Кроме того, свойство частотных характеристик таково, что начальная их часть влияет в основном на очертание конца переходного процесса $x(t)$, причем $P(0) = x_{yc}$ (рис. 5.4). Основное же влияние на качество переходного процесса

оказывает форма средней части частотной характеристики.

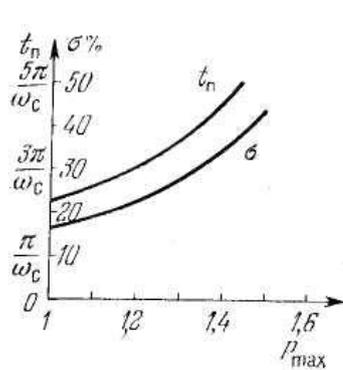


Рис. 5.5

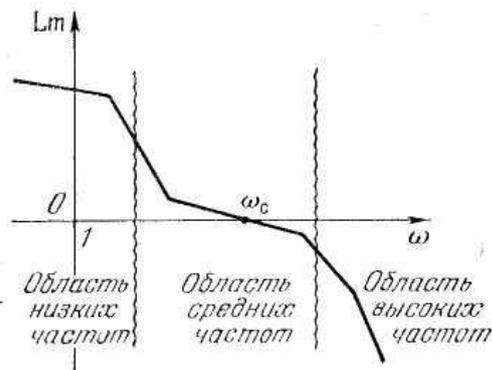


Рис. 5.6

оказывает форма средней части частотной характеристики.

В связи с этим логарифмическую частотную характеристику разомкнутой цепи системы $Lm(\omega)$ делят на три области (рис. 5.6), причем область *низких частот* в основном определяет *точность в установившемся режиме* (в частности, астатизм и установившуюся ошибку на рабочей частоте следящей системы). Область *средних частот* в основном определяет *качество переходного процесса*. В

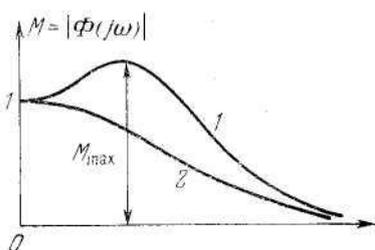


Рис. 5.7

частности, частота среза ω_c , как уже говорилось, определяет полосу пропускания сигналов и длительность переходного процесса. Наклон $L_m(\omega)$ вблизи частоты среза ω_c характеризует колебательность переходного процесса. Так, наклон -20 дБ/дек при $\omega = \omega_c$ (рис. 5.6), соответствующий свойствам апериодического звена, обеспечивает наименьшую колебательность переходного процесса в замкнутой системе.

Следующей частотной оценкой качества является *показатель колебательности* — максимальное значение M_{max} амплитудной частотной характеристики замкнутой системы (рис. 5.7)

$$M = |\Phi(j\omega)|.$$

Эта величина M_{max} может быть определена по виду частотной характеристики разомкнутой цепи данной системы. В самом деле

$$M = \left| \frac{W(j\omega)}{1 + W(j\omega)} \right| = \left| \frac{U + jV}{1 + U + jV} \right| = \sqrt{\frac{U^2 + V^2}{(1 + U)^2 + V^2}}.$$

Отсюда

$$U^2 + V^2 = M^2[(1 + U)^2 + V^2] \quad (5.7)$$

или

$$(U + C)^2 + V^2 = R^2,$$

где

$$C = \frac{M^2}{M^2 - 1}, \quad R = \frac{M}{M^2 - 1}. \quad (5.8)$$

Следовательно, линии равных значений величины M , нанесенные на плоскости $W(j\omega)$, будут окружностями со смещающимся центром C и меняющимся радиусом R , как показано на рис. 5.8

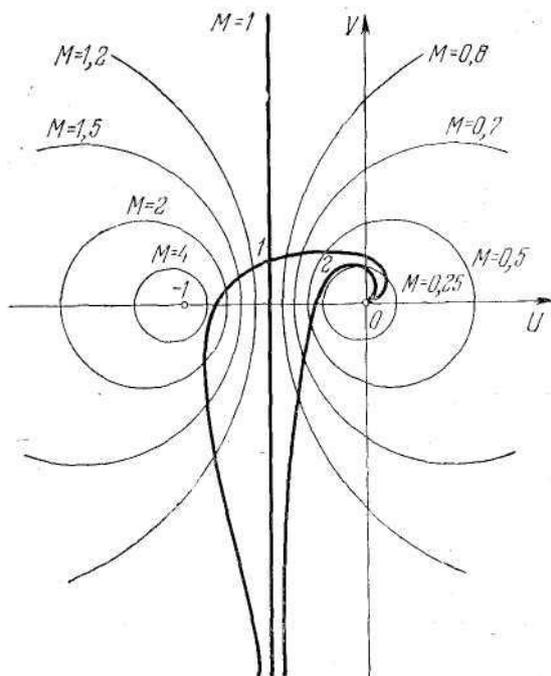


Рис. 5.8

Имея такую диаграмму линий $M = \text{const}$, можно по заданной амплитудно-фазовой характеристике разомкнутой цепи $W(j\omega)$ легко определить показатель колебательности замкнутой системы M_{max} и построить всю амплитудную

частотную характеристику $M=|\Phi(j\omega)|$ замкнутой системы (рис. 5.7).

Изображенные на рис. 5.8 характеристики $W(j\omega)$ (1 и 2) соответствуют характеристикам 1 и 2 замкнутой системы $|\Phi(j\omega)|$ (рис. 5.7).

Если, например, желательно иметь $M_{max} < 1,5$, то характеристику 1 (рис. 5.8) нужно скорректировать так, чтобы она не заходила внутрь круга $M=1,5$ (рис. 5.9).

Такую запретную область можно перенести на плоскость логарифмической частотной характеристики следующим образом. На кривой $M=1,5$ (рис. 5.9) в каждой точке имеем определенное значение амплитуды A и фазы φ .

Следовательно, зная $Lm(\omega)$ (рис. 5.10), можем для каждого значения $Lm = 20 \lg A$ отметить там соответствующую точку φ . Таким образом, образуется кривая $M=1,5$ на поле логарифмических характеристик, очерчивающая запретную зону, в которую не должна заходить фазовая частотная характеристика $\varphi(\omega)$.

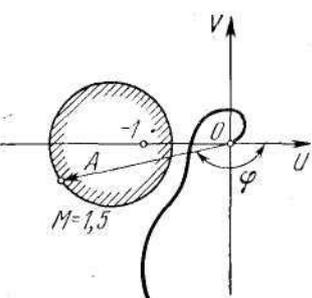


Рис. 5.9

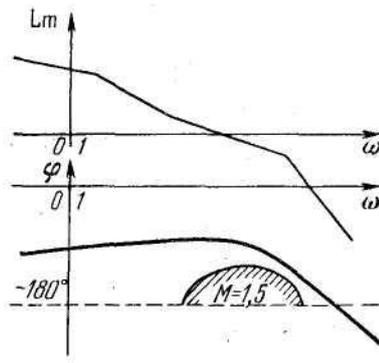


Рис. 5.10

3. Корневые оценки качества

Корневыми оценками называются такие, которые основываются на расположении корней характеристического уравнения замкнутой системы, т. е. полюсов передаточной функции замкнутой системы, а также и нулей этой передаточной функции.

Простейшей корневой оценкой качества является *степень устойчивости* — расстояние η от мнимой оси до ближайшего корня на плоскости корней λ характеристического уравнения замкнутой системы (рис. 5.11). Если ближайшим является вещественный корень (рис. 5.11, а), то ему соответствует аperiodическая составляющая решения для переходного процесса

$$C_1 e^{-\eta t}$$

(аperiodическая степень устойчивости η). Время ее затухания

$$t_{\Pi} = \frac{1}{\eta} \ln \frac{1}{\Delta} \approx \frac{3}{\eta} \quad (\text{при } \Delta = 5\%) \quad (5.9)$$

характеризует общую длительность переходного процесса, так как все члены решения, соответствующие остальным корням, затухают быстрее.

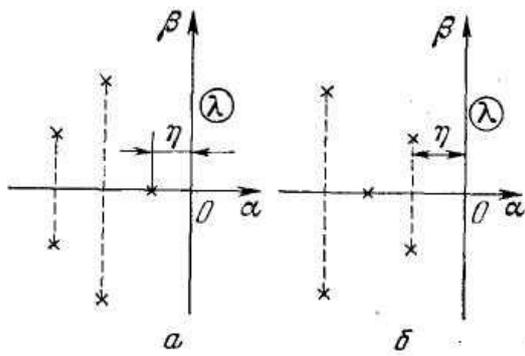


Рис. 5.11

Если же ближайшей к мнимой оси окажется пара комплексных корней (рис. 5.11, б), то доминирующая составляющая решения для переходного процесса $C_1 e^{-\eta t} \sin(\beta_1 t + C_2)$

будет колебательной (колебательная степень устойчивости η), причем оценка длительности переходного процесса t_n остается прежней (5.9).

Определяется величина степени устойчивости следующим образом. Вводится новая комплексная переменная $z = \lambda + \eta$ (рис. 5.12). Тогда на плоскости z мнимая ось β' пройдет через ближайшие корни, т. е. составленное относительно z характеристическое уравнение должно удовлетворять условию нахождения на границе устойчивости.

Таким образом, если задано характеристическое уравнение

$$D(\lambda) = a_0 \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n = 0, \quad (5.10)$$

то подставив $\lambda = z - \eta$, а именно

$$a_0 (z - \eta)^n + a_1 (z - \eta)^{n-1} + \dots + a_{n-1} (z - \eta) + a_n = 0,$$

получим новое уравнение, которое называется *смещенным*, в виде

$$a_0 z^n + A_1 z^{n-1} + \dots + A_{n-1} z + A_n = 0, \quad (5.11)$$

где коэффициенты A_1, A_2, \dots, A_n являются функциями η .

Их можно вычислить следующим образом:

$$A_n = D(-\eta), A_{n-1} = \frac{D'(-\eta)}{1!}, \dots, A_1 = \frac{D^{(n-1)}(-\eta)}{(n-1)!}, \quad (5.12)$$

что вытекает из представления выражения (5.11) как результата разложения функции $D(\lambda)$ (5.10) при $\lambda = z - \eta$ в ряд Тейлора.

Затем к уравнению (5.11) применяется условие границ устойчивости, например, по Гурвицу

$$A_n(\eta) = 0 \text{ и } \Delta_{n-1}(\eta) = 0, \quad (5.13)$$

откуда и определяется величина η . Ниже будет дана диаграмма степени устойчивости для системы третьего порядка.

Колебательность переходного процесса определяется величиной

$$\mu = \left| \frac{\beta}{\alpha} \right|,$$

где α и β — вещественная и мнимая части корней характеристического уравнения. Именно эта величина характеризует быстроту затухания колебаний за каждый период. В самом деле, паре комплексных корней $\lambda_{1,2} = -|\alpha| \pm j\beta$ соответствует составляющая решения переходного процесса

$$C_1 e^{-|\alpha|t} \sin(\beta t + C_2).$$

Период колебаний равен

$$T = \frac{2\pi}{\beta}.$$

Через один период амплитуда $C_1 e^{-|\alpha|t}$ уменьшается до величины

$$C_1 e^{-|\alpha| \left(t + \frac{2\pi}{\beta} \right)} = C_1 e^{-|\alpha|t} e^{-2\pi \left| \frac{\alpha}{\beta} \right|}.$$

Следовательно, чем больше величина $\mu = \left| \frac{\beta}{\alpha} \right|$, названная колебательностью, тем слабее будет затухание колебаний в переходном процессе. Линия $\mu = \text{const}$ образует центральный угол (рис. 5.13, а) на комплексной плоскости.

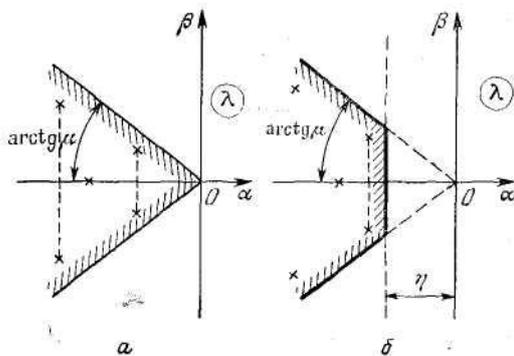


Рис. 5.13

Суммарное требование

определенных значений степени устойчивости η и колебательности μ приводит к области, изображенной на рис. 5.13, б, внутри которой должны лежать все корни характеристического уравнения замкнутой системы.

Далее необходимо иметь в виду, что для определения качества переходного процесса при единичном скачке внешнего воздействия существенны не только корни характеристического уравнения, т. е. полюса, но также и нули передаточной функции замкнутой системы $\Phi(s)$. В самом деле, как мы знаем,

Управление техническими системами

$$\Phi(s) = \frac{W(s)}{1+W(s)} = \frac{KN(s)}{D(s)}, \quad D(s) = L(s) + KN(s).$$

Воспользуемся формулой (3.10), разложив многочлен $N(s_i)$ на множители

$$x(t) = \frac{KN(0)}{D(0)} + \sum_{i=1}^n \frac{Kb_{\theta} (s_i - N_1) (s_i - N_2) \dots (s_i - N_m)}{s_i D'(s_i)} e^{s_i t}, \quad (5.14)$$

где $s_i = \lambda_i$ полюса $\Phi(s)$, т. е. корни характеристического уравнения $D(\lambda) = 0$; через N_1, N_2, \dots, N_m обозначены нули (корни) многочлена $N(s)$.

Отсюда видно, что амплитуды отклонений в переходном процессе, стоящие под знаком суммы, будут тем меньше, чем ближе расположены нули N_j к полюсам s_i , т. е. корни многочлена $N(s)$ к корням характеристического уравнения. Именно в этом случае величины $(s_i - N_j)$ будут малы. Это соответствует, например, схеме рис. 5.14, где нули обозначены кружочками. Заметим, что нули для замкнутой системы совпадают с нулями разомкнутой цепи $W(s)$, так как

$$\Phi(s) = \frac{KN(s)}{D(s)}, \quad W(s) = \frac{KN(s)}{L(s)},$$

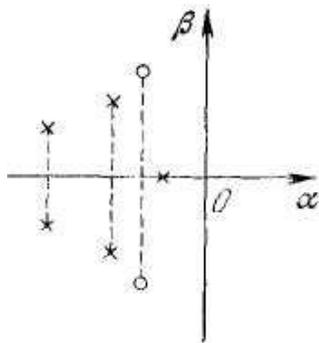


Рис. 5.14

а полюса $\Phi(s)$ и $W(s)$ существенно отличаются друг от друга.

Итак, для уменьшения амплитуд отклонений в переходном процессе желательно, чтобы нули передаточной функции замкнутой системы $\Phi(s)$ располагались вблизи ее полюсов.

Примером корневых оценок качества переходного процесса в системах третьего порядка является диаграмма Вышнеградского (дана в его работе 1876 г., положившей начало развитию теории автоматического регулирования).

Характеристическое уравнение системы третьего порядка

$$a_0 \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 = 0 \quad (5.15)$$

приводится к нормированному виду

$$q^3 + Aq^2 + Bq + 1 = 0, \quad (5.16)$$

где

$$q = \lambda \sqrt[3]{\frac{a_0}{a_3}}, \quad A = \frac{a_1}{\sqrt[3]{a_0^2 a_3}}, \quad B = \frac{a_2}{\sqrt[3]{a_0 a_3^2}}. \quad (5.17)$$

Управление техническими системами

Параметры Вышнеградского A и B представляют, следовательно, определенные комбинации реальных параметров системы, входящих в

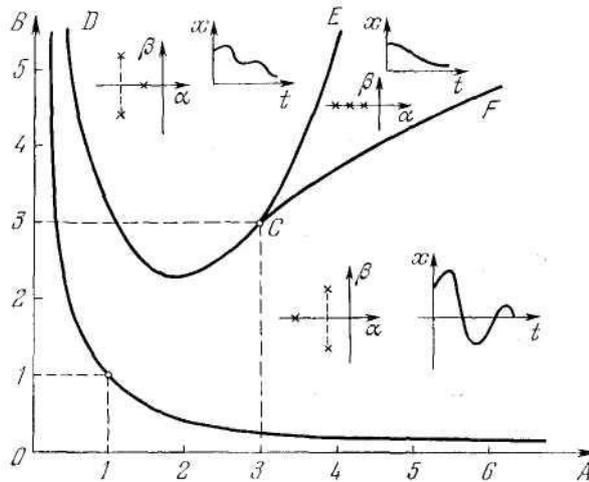


Рис. 5.15

коэффициенты характеристического уравнения.

На плоскости параметров A, B граница устойчивости выразится зависимостью $AB=1$ (гипербола). Область Устойчивости $AB>1$ разбивается на три подобласти (рис. 5.15) с различным расположением корней характеристического уравнения и соответственно — очертаний переходного процесса. При этом граничные линии CE и CF находятся приравниванием нулю дискриминанта формулы Кардана (решения кубического уравнения) в виде

$$A^2B^2 - 4(A^2 + B^2) + 18AB - 27 = 0,$$

а линия CD — из равенства вещественных частей всех корней —

$$2A^3 - 9AB + 27 = 0, \quad A < 3.$$

В точке $C(3; 3)$ все три корня вещественны и равны -1 .

Позднее на диаграмму Вышнеградского были нанесены линии равных значений степени устойчивости η и линии равных значений колебательности μ .

При определении *степени устойчивости* смещенное уравнение для нормированного характеристического уравнения (5.16) будет

$$z^3 + A_1z^2 + A_2z + A_3 = 0,$$

где согласно формулам (5.12)

$$A_3 = -\eta^3 + A\eta^2 - B\eta + 1,$$

$$A_2 = 3\eta^2 - 2A\eta + B, \quad A_1 = -3\eta + A.$$

Два условия (5.13) принимают соответственно вид

Управление техническими системами

$$-\eta^3 + A\eta^2 - B\eta + 1 = 0, \quad (5.18)$$

$$(-3\eta + A)(3\eta^2 - 2A\eta + B) + \eta^3 - A\eta^2 + B\eta - 1 = 0. \quad (5.19)$$

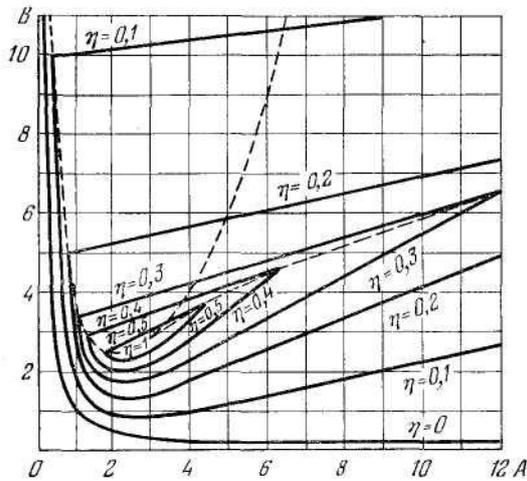


Рис. 5.16

Полагая $\eta = \text{const}$, нанесем линии равных значения η на плоскость параметров Вышнеградского A, B . При этом согласно уравнению (5.18) получим для разных конкретных значений η прямые линии, а согласно уравнениям (5.19) — кривые (рис. 5.16).

Для определения линий равных значений величины колебательности μ , системы третьего порядка (5.16), когда корни его

$$q_{1,2} = -\alpha_1 \pm j\beta_1, \quad q_3 = -\alpha_2 \quad (\alpha_1 > 0, \alpha_2 > 0),$$

имея в виду, что $\mu = \beta_1 / \alpha_1$, по формулам Виета запишем

$$2\alpha_1 + \alpha_2 = A, \quad 2\alpha_1\alpha_2 + \alpha_1^2(1 + \mu^2) = B, \\ \alpha_1^2\alpha_2(1 + \mu^2) = 1.$$

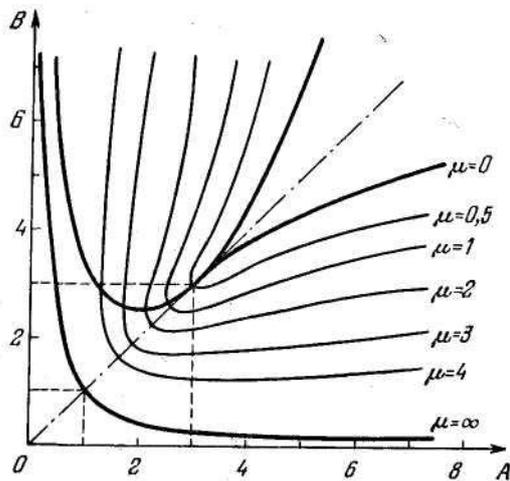


Рис. 5.17

Исключая α_1 и α_2 , обозначив

$\chi = 1 + \mu^2$, получим уравнение

$$4\chi^2(A^3 + B^2) - \chi^3 A^2 B^2 + (2\chi^3 - 4\chi^2 - 16\chi)AB - \chi^3 + 12\chi^2 - 48\chi + 64 = 0, \quad (5.20)$$

которое позволяет построить на поле диаграммы Вышнеградского AB линии равных значений $\mu = \sqrt{\chi - 1}$ (рис. 5.17) в областях, где имеются комплексные корни. Если нам требуется в системе третьего порядка выбрать параметры так, чтобы

получить заданное качество переходного процесса по показателям η и μ , мы выбираем на рис. 5.16 и 5.17 соответствующую точку. Найдя таким образом значения A и B , пользуемся затем формулами (5.17) для подбора параметров системы (5.15).

4. Интегральные оценки качества

Интегральными оценками качества называются такие, которые одним числом оценивают и величины отклонений, и время затухания переходного процесса. Будем отклонение x в переходном процессе отсчитывать от нового установившегося состояния, так что $x \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Для монотонного процесса (рис. 5.18) интегральной оценкой может служить площадь под кривой переходного процесса, т. е.

$$I_1 = \int_0^{\infty} x(t) dt. \quad (5.21)$$

Этот интеграл имеет конечное значение для любого решения $x(t)$ линейного уравнения. Здесь процесс будет считаться тем лучше, чем меньше число I_1 .

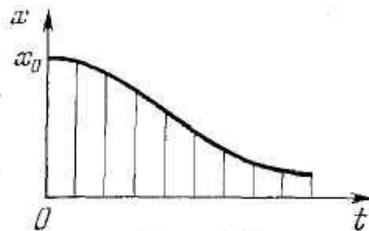


Рис. 5.18

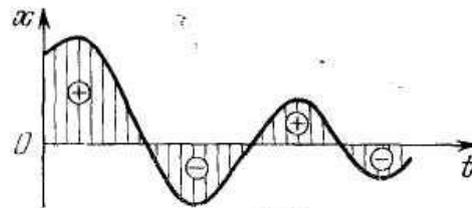


Рис. 5.19

Однако такая оценка не годится для колебательного процесса, так как нижние площади при вычислении интеграла (5.21) будут вычитаться из верхних (рис. 5.19). Поэтому по минимуму величины I_1 наилучшим оказался бы процесс с незатухающими колебаниями, что недопустимо.

В связи с этим в общем случае принимают *квадратичную интегральную оценку* качества в виде

$$I_2 = \int_0^{\infty} x^2(t) dt. \quad (5.22)$$

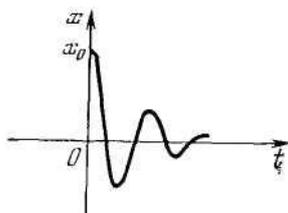


Рис. 5.20

В литературе имеются формулы, выражающие величину I_2 непосредственно через коэффициенты дифференциального уравнения замкнутой системы.

Очевидно, что стремление оценки I_2 к нулю приближает кривую процесса к скачку (рис. 5.20), ибо именно при этом уменьшается квадратичная площадь, ограниченная кривой. Однако это, в свою очередь, вызывает значительное увеличение скорости (рывок скорости) в начальной части процесса. Чтобы получить

Управление техническими системами

быстрозатухающий, но достаточно плавный процесс, вводят *улучшенную квадратичную интегральную оценку* качества

$$I_K = \int_0^{\infty} (x^2 + T^2 \dot{x}^2) dt, \quad (5.23)$$

где T назначается в соответствии с заданием желаемых свойств переходного процесса.

В самом деле, покажем, что при стремлении уменьшить величину этой оценки кривая переходного процесса приближается к экспоненте с желаемой постоянной времени T . Для этого проделаем следующие преобразования:

$$I_K = \int_0^{\infty} (x^2 + T^2 \dot{x}^2) dt = \int_0^{\infty} (x + T\dot{x})^2 dt - \int_0^{\infty} 2Tx\dot{x} dt = \int_0^{\infty} (x + T\dot{x})^2 dt + Tx_0^2.$$

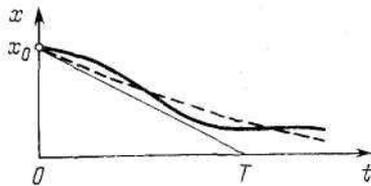


Рис. 5.21

Наименьшее возможное значение I_K будет при

$$x + T\dot{x} = 0.$$

Решение этого дифференциального уравнения

$$x = x_0 e^{-t/T}$$

и будет той экспонентой (пунктирная кривая на рис. 5.21), к которой приближается переходный процесс при стремлении уменьшить значение интегральной оценки I_K .

Применяются и другие виды интегральных оценок качества

$$I = \int_0^{\infty} (x^2 + a^2 \dot{x}^2 + b^2 \ddot{x}^2) dt,$$

$$I = \int_0^{\infty} (a_1^2 x_1^2 + a_2^2 x_2^2 + \dots + a_n^2 x_n^2) dt,$$

где x_1, \dots, x_n — переменные, характеризующие состояние системы. В общем случае

$$I = \int_0^{\infty} \sum_{i,j=1}^n a_{ij} x_i x_j dt.$$

В качестве интегральных критериев используются и функционалы более общего вида. Иногда в выражение интегральной оценки вводится время t в явном

виде. Интегральные критерии применяются в теории оптимальных систем автоматического управления.

ЛЕКЦИЯ №8

по теме: Корректирующие устройства и методы их синтеза.

1. Последовательные корректирующие устройства

Для того, чтобы добиться желаемого качества процесса управления или регулирования, т. е. требуемой точности системы и качества переходного процесса, есть два способа. Первый состоит в том, чтобы достигнуть этого путем изменения параметров данной системы, так как с изменением параметров меняются соответственно коэффициенты уравнения и частотные характеристики, а значит, и качество процесса.

Если же путем изменения параметров не удастся получить желаемый результат, то надо применить второй способ — изменить структуру системы, введя дополнительные звенья — корректирующие устройства.

Основная задача корректирующих устройств состоит в улучшении точности системы и качества переходных процессов. Однако наряду с этим путем введения корректирующих устройств можно решать и более общую задачу — сделать систему устойчивой, если она была без них неустойчивой, а затем добиться и желаемого качества процесса регулирования.

Различают четыре основных вида корректирующих устройств.

1. *Последовательные корректирующие устройства* или, как их еще называют, *корректирующие фильтры*, которые могут описываться различными передаточными функциями $W_k(s)$ (рис. 6.1). Тогда общая передаточная функция разомкнутой цепи системы будет

$$W(s) = W_k(s)W_0(s), \quad (6.1)$$

причем во втором варианте (рис. 6.1, б) имеем

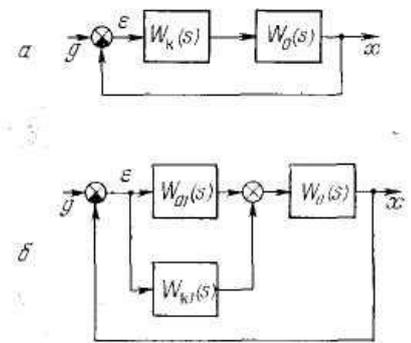


Рис. 6.1

$$W_K(s) = W_{01}(s) + W_{K1}(s),$$

где нуликами отмечены передаточные функции заданных частей системы.

2. Параллельные корректирующие устройства, осуществляемые в виде дополнительных местных обратных связей $W_{oc}(s)$ (рис. 6.2), когда

$$W(s) = \frac{W_{01}(s) W_0(s)}{1 + W_{oc}(s) W_{01}(s)}. \quad (6.2)$$

3. Корректирующие устройства по внешнему воздействию.

4. Неединичная главная обратная связь.

Передаточная функция корректирующего устройства $W_k(s)$ или $W_{oc}(s)$ может иметь, вообще говоря, произвольный вид. Но наиболее часто применяются определенные типы корректирующих устройств, которые мы и рассмотрим.

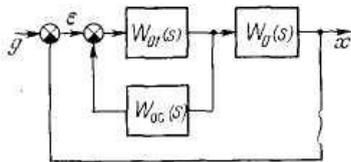


Рис. 6.2

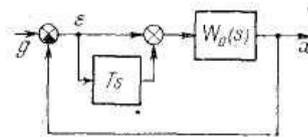


Рис. 6.3

В этом параграфе изучим некоторые типовые последовательные корректирующие устройства (фильтры).

Введение производной от ошибки — простейший метод улучшения качества переходного процесса. Структурно введение производной представлено на рис. 6.3. Технически это может быть осуществлено различными устройствами, причем производная может осуществляться не в чистом виде, а с инерционностью, например, в виде

$$\frac{T_1 s}{T_1 s + 1}.$$

Передаточная функция разомкнутой цепи (рис. 6.3) с идеальной производной будет

$$W(s) = (Ts + 1) W_0(s).$$

Заменяв $s = j\omega$, получим амплитуду и фазу в виде

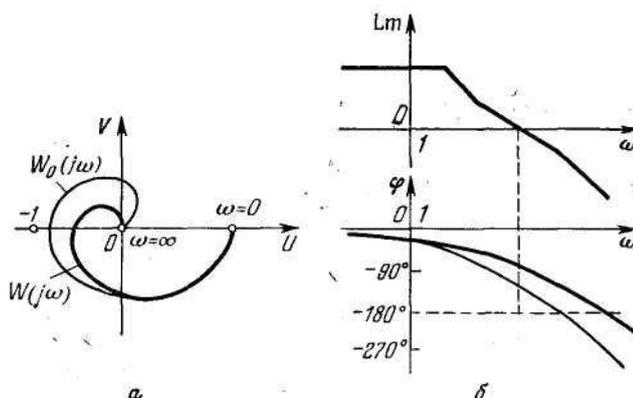


Рис. 6.4

$$A(\omega) = A_0(\omega) \sqrt{T^2 \omega^2 + 1}, \quad \varphi(\omega)$$

Существенным здесь является то, что при введении воздействия по производной

Управление техническими системами

добавляется положительная фаза. Вследствие этого радиус-векторы амплитудно-фазовой характеристики (рис. 6.4, а) поворачиваются против часовой стрелки, увеличивая запас устойчивости и улучшая качество переходного процесса. То же самое легко проследить и на логарифмических характеристиках (рис. 6.4,б).

В случае неидеального дифференцирования (с инерционностью) этот эффект несколько уменьшается количественно, но качественно он сохраняется.

Заметим, что введение производной от ошибки может служить и стабилизирующим средством, т. е. превращать неустойчивую замкнутую систему в устойчивую. Например, если на рис. 6.4,а точка -1 лежала бы внутри характеристики $W_0(j\omega)$, то новая характеристика $W(j\omega)$ уже могла бы не охватывать точку -1.

Увеличение общего коэффициента усиления K разомкнутой цепи является методом повышения точности системы. Как видно из главы 3, при этом уменьшаются все виды установившихся ошибок системы. Увеличение K осуществляется последовательным введением усилительного звена в общую цепь. Но увеличение K ведет, как известно, к ухудшению условия устойчивости, а значит, и качества переходного процесса. Поэтому часто приходится это делать одновременно с введением производной.

Введение интеграла от ошибки является методом создания или повышения порядка астатизма системы, а значит, и увеличения ее точности (рис. 6.5). Передаточная функция будет

$$W(s) = \frac{1}{s} W_0(s).$$

Подставив $s = j\omega$, получим

$$A(\omega) = \frac{A_0(\omega)}{\omega}, \quad \varphi(\omega) = \varphi_0(\omega) - 90^\circ.$$

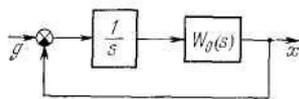


Рис. 6.5

Вследствие поворота фазы на -90° ухудшаются условия устойчивости и качество переходного процесса (см. рис. 6.6, а и б). Иногда это может повести и к неустойчивости замкнутой системы, если на рис. 6.6, а точка -1 окажется внутри характеристики $W(j\omega)$, хотя $W_0(j\omega)$ не охватывает эту точку. В случае введения двойного интеграла (рис. 6.7) в систему с передаточной функцией вида

$$W_0(s) = \frac{K}{L(s)}$$

Управление техническими системами

(без производной в числителе) получаем

$$W(s) = \frac{K}{s^2 L(s)}$$

и характеристическое уравнение замкнутой системы

$$\lambda^2 L(\lambda) + K = 0.$$

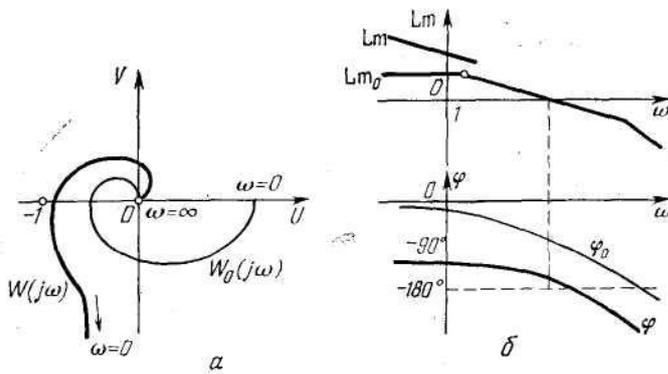


Рис. 6.6

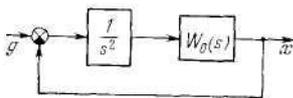


Рис. 6.7

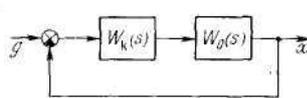


Рис. 6.8

Изодромное корректирующее устройство (рис. 6.8) имеет передаточную функцию вида

$$W_k(s) = \frac{Ts + 1}{Ts}$$

объединяя в себе введение интеграла и производной. Оно позволяет избежать недостатков предыдущего устройства и получать необходимый порядок астатизма системы, сохраняя устойчивость и качество ее.

Частотные логарифмические характеристики изодромного устройства имеют показанный на рис. 6.9 вид.

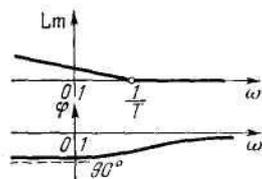


Рис. 6.9

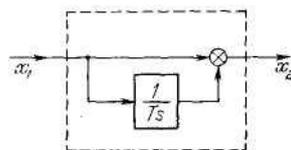


Рис. 6.10

Эта система будет структурно неустойчивой (неустойчивой при любых значениях параметров), так как в характеристическом уравнении (6.3) отсутствует член с первой степенью λ . Поэтому астатизм второго порядка реально возможен только при условии введения производных в закон управления, т. е. при наличии некоторого многочлена $N(s)$ в числителе передаточной функции.

Из них видно, что это устройство изменяет лишь низкочастотную часть амплитудной характеристики, влияющую на точность системы (повышает ее), а отрицательный сдвиг фазы в части, существенной для условий устойчивости, невелик.

Поскольку можно записать

$$W_{\kappa}(s) = \frac{T_s + 1}{T_s} = 1 + \frac{1}{T_s s}$$

то структурно изодромное устройство можно представить, как изображено на рис. 6.10. Следовательно, если в случае простого введения интеграла (рис. 6.5) регулирование в системе производится не по величине ошибки ε , а только по интегралу от нее, то при изодромном устройстве мы получаем регулирование по ошибке и по интегралу (аналогично тому, как на рис. 6.3, было показано регулирование по ошибке и по ее производной).

Техническое осуществление изодромного устройства может быть различным (механическое, электрическое и др. устройства).

Возможны и более сложные передаточные функции последовательных корректирующих устройств — фильтров [45].

2. Параллельные корректирующие устройства

Рассмотрим параллельные корректирующие устройства в виде обратных связей (рис. 6.2).

Основные виды корректирующих обратных связей следующие:

а) жесткая обратная связь

$$W_{oc} = k_{oc},$$

б) инерционная жесткая обратная связь

$$W_{oc}(s) = \frac{k_{oc}}{T_{oc}s + 1},$$

в) гибкая обратная связь

$$W_{oc}(s) = k_{oc}s,$$

г) инерционная гибкая обратная связь

$$W_{oc}(s) = \frac{k_{oc}s}{T_{oc}s + 1}.$$

Возможны и более сложные передаточные функции корректирующих обратных связей.

Проиллюстрируем на примерах основные свойства этих обратных связей при охвате ими различных типов звеньев.

Управление техническими системами

Положительная жесткая обратная связь. Пусть она охватывает апериодическое звено (рис. 6.11), т. е.

$$W_0(s) = \frac{k}{Ts + 1}, \quad W_{oc} = k_{oc}.$$

Тогда общая передаточная функция будет

$$W(s) = \frac{W_0(s)}{1 - W_{oc}(s)W_0(s)} = \frac{k}{Ts + 1 - kk_{oc}}$$

или

$$W(s) = \frac{k_1}{T_1s + 1},$$

где

$$k_1 = \frac{k}{1 - kk_{oc}}, \quad T_1 = \frac{T}{1 - kk_{oc}}. \quad (6.4)$$

Следовательно, положительная обратная связь может служить для увеличения коэффициента усиления. Но надо иметь в виду, что одновременно с этим увеличивается и постоянная времени, т. е. инерционность звена, а при $k_{oc} > \frac{1}{k}$ звено становится неустойчивым.

Отрицательная жесткая обратная связь. При охвате ею апериодического звена получаем

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1 + kk_{oc}} = \frac{k_1}{T_1s + 1}, \quad (6.5)$$

где

$$k_1 = \frac{k}{1 + kk_{oc}}, \quad T_1 = \frac{T}{1 + kk_{oc}}.$$

Следовательно, отрицательная жесткая обратная связь уменьшает инерционность звена. Тем самым она улучшает качество переходного процесса в системе и может оказывать стабилизирующее действие, т. е. превращать неустойчивую замкнутую систему в устойчивую (подобно введению производной). Уменьшение же коэффициента усиления k_1 при этом может быть компенсировано за счет других звеньев системы.

При охвате интегрирующего звена отрицательной жесткой обратной связью, т. е. при

$$W_0(s) = \frac{k}{s}, \quad W_{oc} = k_{oc}$$

получаем

$$W(s) = \frac{W_0(s)}{1 + W_{oc}(s)W_0(s)} = \frac{k}{s + kk_{oc}} = \frac{k_1}{T_1s + 1}, \quad (6.6)$$

где

$$k_1 = \frac{1}{k_{oc}}, \quad T_1 = \frac{1}{kk_{oc}}.$$

Видно, что под действием жесткой обратной связи теряется интегрирующее свойство звена, и оно превращается в апериодическое с коэффициентом усиления, который целиком определяется только обратной связью. Постоянная времени T_1 будет мала при большом коэффициенте усиления звена k .

Указанный способ введения обратной связи применяется на практике, например, в приводных устройствах, чтобы сделать угол поворота выходного вала пропорциональным управляющему сигналу (напряжению).

Далее без специальных оговорок будем рассматривать только отрицательные обратные связи.

Инерционная жесткая обратная связь. При охвате ею интегрирующего звена

$$W_0(s) = \frac{k}{s}, \quad W_{oc}(s) = \frac{k_{oc}}{T_{oc}s + 1},$$

приходим к следующему выражению:

$$W(s) = \frac{k(T_{oc}s + 1)}{T_{oc}s^2 + s + kk_{oc}} = \frac{k_1(T_{oc}s + 1)}{T_1^2s^2 + T_2s + 1}, \quad (6.7)$$

где

$$k_1 = \frac{1}{k_{oc}}, \quad T_1^2 = \frac{T_{oc}}{kk_{oc}}, \quad T_2 = \frac{1}{kk_{oc}}.$$

Следовательно, в данном случае интегрирующее звено превращается в звено второго порядка с введением производной. При этом коэффициент усиления k_1 и интенсивность введения производной T_{oc} целиком определяются обратной связью, а первичный коэффициент усиления звена k влияет на новые постоянные времени T_{oc} и T_2 , которые будут тем меньше, чем больше k . Поэтому

Управление техническими системами

при большом k охват интегрирующего звена инерционной жесткой обратной связью эквивалентен усилительному звену с введением производной. При этом

$$W(s) \approx \frac{T_{oc} + 1}{k_{oc}}.$$

Отсюда вытекает и хорошее влияние инерционной обратной связи на качество переходного процесса в системе в целом.

Гибкая обратная связь. При охвате ею колебательного звена, т. е.

$$W_0(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\zeta Ts + 1}, \quad W_{oc}(s) = k_{oc} s,$$

имеем

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\zeta_1 Ts + 1}, \quad (6.8)$$

где

$$2\zeta_1 Ts = 2\zeta Ts + k k_{oc} s, \quad \zeta_1 = \zeta + \frac{k k_{oc}}{2T}.$$

Как видно, в этом случае увеличивается демпфирование колебательного звена (ибо $\zeta_1 > \zeta$), причем не меняется коэффициент усиления. Процесс становится менее колебательным и может превратиться в апериодический (если $\zeta \geq 1$).

Заметим, что если имеется *апериодическое звено*, то охватывать его отдельно гибкой обратной связью нет смысла, так как это только увеличит его инерционность (постоянную времени).

При охвате *инерционного интегрирующего звена* гибкой обратной связью, т. е.

$$W_0(s) = \frac{k}{s(Ts + 1)}, \quad W_{oc}(s) = k_{oc} s,$$

имеем

$$W(s) = \frac{k}{s(Ts + 1) + k k_{oc} s} = \frac{k_1}{s(T_1 s + 1)} \quad (6.9)$$

где

$$T_1 = \frac{T}{1 + k k_{oc}}, \quad k_1 = \frac{k}{1 + k k_{oc}}$$

т.е. сохраняется тот же тип интегрирующего звена, но с уменьшенной инерционностью.

Инерционная гибкая обратная связь. При охвате ею инерционного интегрирующего звена, т. е.

$$W_0(s) = \frac{k}{s(Ts + 1)}, \quad W_{oc}(s) = \frac{k_{oc}}{T_{oc}s + 1},$$

имеем

$$W(s) = \frac{k(T_{oc}s + 1)}{s[TT_{oc}s^2 + (T_1 + T_{oc})s + 1 + kk_{oc}]} = \frac{k_1(T_{oc}s + 1)}{s(T_2^2s^2 + T_1s + 1)}, \quad (6.10)$$

где

$$k_1 = \frac{k}{1 + kk_{oc}}, \quad T_2^2 = \frac{TT_{oc}}{1 + kk_{oc}}, \quad T_1 = \frac{T + T_{oc}}{1 + kk_{oc}}.$$

Здесь при сохранении интегрирующего свойства звена получается эффект введения производной, т. е. интегрирующее звено *становится изодромным*, а новые постоянные времени T_2 и T_1 , характеризующие инерционность звена, могут быть сделаны малыми за счет большого первичного коэффициента усиления k . В последнем случае имеем

$$k_1 \approx \frac{1}{k_{oc}}, \quad W(s) \approx \frac{T_{oc}s + 1}{k_{oc}s}.$$

Можно заметить, вообще, что инерционное запаздывание в обратной связи (в отличие от такового в прямой цепи) целесообразно использовать для улучшения качества переходных процессов, получая эффект, аналогичный введению производной в прямой цепи.

Общим свойством является также и то, что жесткие обратные связи аннулируют интегрирующее свойство звена (т. е. аннулируют астатизм системы, если в ней нет интегрирования в другом месте цепи звеньев), а гибкие обратные связи сохраняют астатизм.

Могут применяться и другие типы корректирующих обратных связей с более сложными передаточными функциями. Рассмотрим, как можно обеспечить условие сохранения более высокого порядка астатизма при охвате звена обратной связью. Пусть звено

$$W_0(s) = \frac{k}{s^v} W'_0(s)$$

охватывается гибкой обратной связью

$$W_{oc}(s) = k_{oc} s^{\mu} W'_{oc}(s).$$

Тогда

$$W(s) = \frac{kW'_0(s)}{s^{\nu} + s^{\mu} k k_{oc} W'_{oc}(s)}. \quad (6.11)$$

Очевидно, что для сохранения ν -го порядка астатизма необходимо иметь в обратной связи $\mu \geq \nu$. Если же это невозможно технически и получается $\mu < \nu$, то потерянную часть порядка астатизма можно компенсировать добавлением последовательных корректирующих устройств, например, изодромного типа.

3. Корректирующие устройства по внешнему воздействию. Инвариантность

Основной принцип автоматического управления и регулирования состоит в формировании управляющего сигнала по величине ошибки ε (с использованием интегралов и производных от ε). Если же вводится корректирующее устройство по внешнему воздействию, то получается *комбинированное регулирование* — по ошибке и по внешнему воздействию (тоже с использованием соответствующих интегралов и производных).

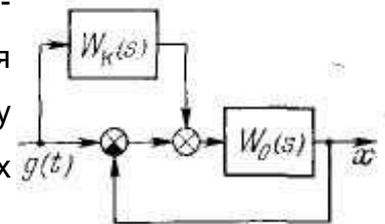


Рис. 6.12

Путем введения коррекций по внешнему воздействию удастся теоретически при определенных условиях сводить величину установившейся ошибки к нулю при любой форме внешнего воздействия. Это свойство называется *инвариантностью системы* по отношению к внешнему воздействию.

Внешние воздействия, как уже отмечалось, делятся на задающие, сигнал которых система должна воспроизводить, и возмущающие, действие которых нужно нейтрализовать.

Корректирующие устройства по задающему воздействию. Здесь наряду с сигналом ошибки вводится во внутреннюю цепь системы еще сигнал задающего воздействия $g(t)$ через некоторую передаточную функцию $W_k(s)$ (рис. 6.12). Тогда выходная величина (в изображении по Лапласу) выразится в виде

$$X(s) = \frac{W_0(s)}{1 + W_0(s)} [1 + W_K(s)] G(s),$$

т.е. эквивалентная передаточная функция замкнутой системы для регулируемой величины будет равна

$$\Phi_\partial(s) = \frac{W_0(s)}{1 + W_0(s)} [1 + W_K(s)],$$

а для ошибки —

$$\Phi_{\text{ед}}(s) = 1 - \Phi_\partial(s) = \frac{1 - W_K(s) W_0(s)}{1 + W_0(s)}. \quad (6.12)$$

Установившаяся ошибка будет равна нулю при любой форме задающего воздействия в том случае, если

$$W_K(s) = \frac{1}{W_0(s)}.$$

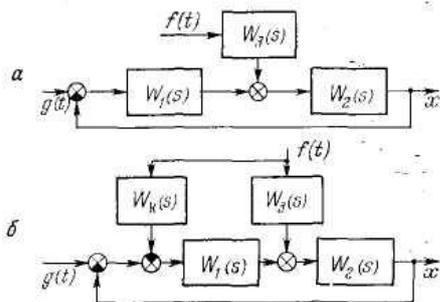


Рис. 6.13

Обычно этому условию инвариантности удовлетворить полностью нельзя, но можно подобрать приближенное равенство для определенной области частот (практически пропускаемых системой). Такая неполная инвариантность системы весьма существенно уменьшает ошибку ε системы регулирования.

Возможны и другие варианты коррекции по задающему воздействию.

Корректирующее устройство по возмущению. Пусть задана схема системы (рис. 6.13,а). Введем корректирующее устройство $W_K(s)$, входом которого является возмущающее воздействие $f(t)$ (рис. 6.13,б). Тогда передаточная функция замкнутой системы для регулируемой величины x по возмущающему воздействию равна

$$\Phi_f(s) = \frac{X}{F} = \frac{W_2(s) [W_3(s) - W_K(s) W_1(s)]}{1 + W_1(s) W_2(s)}. \quad (6.13)$$

Поскольку влияние $f(t)$ надо уничтожить, то условие полной инвариантности принимает вид

$$W_K(s) = \frac{W_3(s)}{W_1(s)}.$$

Управление техническими системами

Здесь также можно ограничиваться неполной инвариантностью, если точное удовлетворение условию вызывает технические трудности.

Особая трудность заключается в том, что возмущающие воздействия $f(t)$, в отличие от задающих $g(t)$, далеко не всегда можно подать на вход $W_K(s)$. Действительно, для этого нужно уметь измерять $f(t)$, что не всегда возможно (как например, порывы ветра, действующие на самолет при автоматическом регулировании курса). Существуют косвенные методы измерения $f(t)$, которые широко используются на практике.

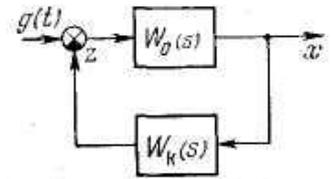


Рис. 6.14

Введение корректирующих устройств по внешним воздействиям является важным методом повышения точности систем автоматического регулирования и управления. Этот метод обладает следующей положительной особенностью. Как видно из написанных выше передаточных функций, знаменатель их не изменяется при введении коррекции. Поэтому, учитывая малость числителя, можно сказать, что характеристическое уравнение замкнутой системы при введении такой коррекции практически остается неизменным. Следовательно, этот способ коррекции, существенно повышая точность системы, почти не влияет на качество переходного процесса, в то время как все предыдущие методы повышения точности всегда были связаны с ухудшением качества переходного процесса, если не принимались дополнительные меры.

В заключение остановимся еще на использовании *неединичной главной обратной связи*, которую также можно применять в качестве корректирующего средства. Введем в главную обратную связь, которая обычно равна единице, устройство с передаточной функцией $W_K(s)$ (рис. 6.14). В этом случае на входе системы задающее воздействие $g(t)$ сравнивается не непосредственно с выходной величиной x , как обычно, а с некоторой величиной z , причем

$$Z(s) = W_K(s) X(s).$$

Тогда получаем

$$X(s) = \frac{W_0(s)}{1 + W_K(s) W_0(s)} G(s). \quad (6.14)$$

Для полной инвариантности системы требуется $X=G$, т. е.

$$W_K(s) = 1 - \frac{1}{W_0(s)}. \quad (6.15)$$

Управление техническими системами

Из этого выражения видно, насколько передаточная функция главной обратной связи должна отличаться от «обычной» единицы, чтобы система стала инвариантной, т. е. воспроизводила без установившейся ошибки любое задающее воздействие. Это условие можно выполнять приближенно. Однако при таком способе, как видно из передаточной функции замкнутой системы, существенно меняется ее характеристическое уравнение. Поэтому одновременно нужно следить, чтобы получалось желаемое качество переходного процесса.

Заметим, что в равновесном состоянии ($s = 0$) из (6.15) в системе без астатизма имеем

$$k_k = 1 - \frac{1}{k_0}. \quad (6.16)$$

Следовательно, если ввести в главную обратную связь системы коэффициент усиления k_k согласно формуле (6.16), то система превратится в астатическую ($X = G$) без введения интегрирующего звена.

4. Частотный метод синтеза корректирующих устройств

Наиболее распространен частотный метод синтеза корректирующих устройств с помощью логарифмических частотных характеристик. Он проводится следующим образом. Строится желаемая логарифмическая амплитудная частотная характеристика, исходя из требуемой точности системы и требуемого качества переходного процесса. Эта желаемая характеристика сравнивается с той, которую данная система имеет без коррекции. Определяется передаточная функция корректирующего устройства так, чтобы при его включении в систему, в последней получилась бы желаемая форма логарифмической амплитудной характеристики. Затем строится фазовая частотная характеристика и оценивается получающаяся при этом величина запаса устойчивости системы и другие качественные показатели.

Рассмотрим *формирование желаемой логарифмической амплитудной частотной характеристики*, исходя из заданных требований к системе по точности и качеству переходного процесса.

Требования точности системы. Они формулируются по-разному.

1. Пусть даны «рабочие» частота ω_p и амплитуда a_p , т. е. основные значения частоты и амплитуды задающего воздействия $g(t)$, которые будут иметь место при

Управление техническими системами

работе данной системы; задана также допустимая ошибка $A_\varepsilon = \varepsilon_{\text{доп}}$ (амплитуда ошибки).

Для области низких частот, где $|W(j\omega_p)| \gg 1$ можно записать

$$|\Phi_\varepsilon(j\omega_p)| = \frac{1}{|1 + W(j\omega_p)|} \approx \frac{1}{|W(j\omega_p)|}.$$

Следовательно, аналогично формуле (3.24) здесь можно записать

$$A_\varepsilon \approx \frac{a_p}{|W(j\omega_p)|}.$$

Отсюда желаемое значение

$$|W(j\omega_p)| \geq \frac{a_p}{\varepsilon_{\text{доп}}}. \quad (6.17)$$

2. Пусть даны требуемые характеристики задающего воздействия: \dot{g}_{max} и \ddot{g}_{max} , а также $\varepsilon_{\text{доп}}$.

Для использования частотных характеристик полагаем

$$g(t) = a_p \sin \omega_p t,$$

где индексом p обозначены «рабочие» амплитуды и частота, при которых будут иметь место заданные скорость \dot{g}_{max} и ускорение \ddot{g}_{max} .

Тогда, пользуясь формулами (3.23), вычисляем

$$\omega_p = \frac{\dot{g}_{\text{max}}}{g_{\text{max}}}, \quad a_p = \frac{\ddot{g}_{\text{max}}}{g_{\text{max}}}. \quad (6.18)$$

Заметим, что если $g(t)$ является угловой величиной, то обычно пользуются следующими обозначениями:

$$\dot{g} = \omega, \quad \ddot{g} = \dot{\omega}.$$

Тогда вычисляются

$$\omega_p = \frac{\dot{\omega}_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}}}, \quad a_p = \frac{\dot{\omega}_{\text{max}}^2}{\omega_{\text{max}}}. \quad (6.19)$$

и желаемое значение $|W(j\omega_p)|$ —по формуле (6.17).

3. Пусть в астатической системе требуется обеспечить слежение за сигналом

$$g = \dot{g}_{\text{max}} t.$$

Имеем выражения

$$W(s) = \frac{KN(s)}{sL(s)}, \quad \Phi_e(s) = \frac{1}{1+W(s)} = \frac{sL(s)}{sL(s) + KN(s)}$$

Коэффициенты ошибок

$$c_0 = \Phi_e(0) = 0, \quad c_1 = \left. \frac{d\Phi_e}{ds} \right|_{s=0} = \frac{1}{K}$$

Установившаяся ошибка представляется в виде

$$\varepsilon_{yc}(t) = c_0 g(t) + c_1 \dot{g}(t) = \frac{\dot{g}_{max}}{K}$$

или в других обозначениях

$$\varepsilon_{yc} = \frac{\omega_{max}}{K}$$

Отсюда находим желаемое значение

$$K \geq \frac{\omega_{max}}{\varepsilon_{доп}} = \frac{\dot{g}_{max}}{\varepsilon_{доп}} \quad (6.20)$$

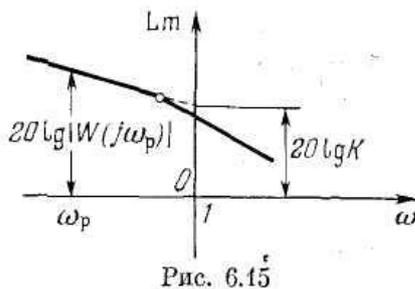


Рис. 6.15

По этим данным, отражающим требования точности системы, строим низкочастотную часть желаемой логарифмической амплитудной частотной характеристики, как показано на рис. 6.15. Начальный наклон характеристики —20дБ/дек (астатизм 1-го порядка). Точка излома и дальнейший наклон пока еще не определены.

Требования качества переходного процесса. Пусть заданы допустимое перерегулирование σ и время затухания переходного процесса t_n .

Воспользуемся графиком рис. 6.16. По этому графику, отложив заданную величину σ (на пример, 20 %), определяем величину t_n (как показано стрелками на рис. 6.16), например

$$t_n = \frac{2,8\pi}{\omega_c}$$

Но поскольку желаемое значение t_n нам задано, то можно вычислить необходимую частоту среза

$$\omega_c = \frac{2,8\pi}{t_n}$$

Наносим найденное значение ω_c на график искомой желаемой ЛАХ (рис. 6.17) и проводим через точку ω_c

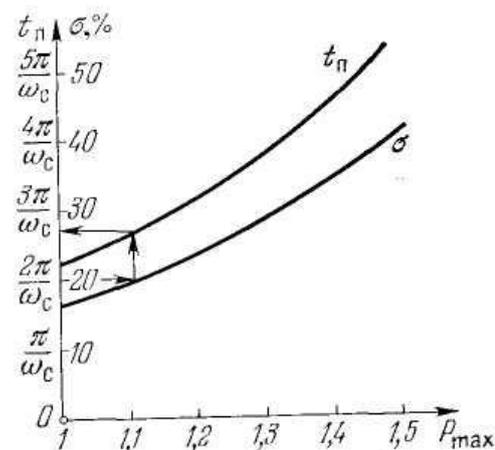


Рис. 6.16

Управление техническими системами

прямою с наклоном -20 дБ/дек. Это рекомендуется для обеспечения хорошего качества переходного процесса.

Затем из предыдущего расчета берем низкочастотную часть характеристики и указанные части характеристики сопрягаем наклонной прямой с наклоном -40 или -60 дБ/дек (рис. 6.17), как удобнее. Высокочастотная часть заметной роли не играет. Поэтому ее берем такой, какая в данной системе имеется. Проверяем наличие необходимого запаса устойчивости по амплитуде ΔL_m и по фазе $\Delta\varphi$ (рис. 6.17).

Рассмотрим сначала синтез последовательного корректирующего устройства, а затем параллельного.

Задана передаточная функция разомкнутой цепи системы без коррекции $W_0(s)$ (рис. 6.18). Соответствующая ей частотная характеристика отличается от желаемой. Введем последовательное корректирующее устройство с искомой передаточной функцией $k_n\Pi(s)$ (рис. 6.18).

Согласно описанной выше методике, строим желаемую логарифмическую амплитудную частотную характеристику (рис. 6.17). Пусть коэффициент усиления желаемой системы $K_{ж}$ отличается от имеющегося K_0 . Тогда нужно поднять характеристику $W_0(j\omega)$ (рис. 6.19) так, чтобы на ней получился желаемый коэффициент усиления. Получаем новую характеристику

$$W'_0(j\omega) = \frac{K_{ж}}{K_0} W_0(j\omega).$$

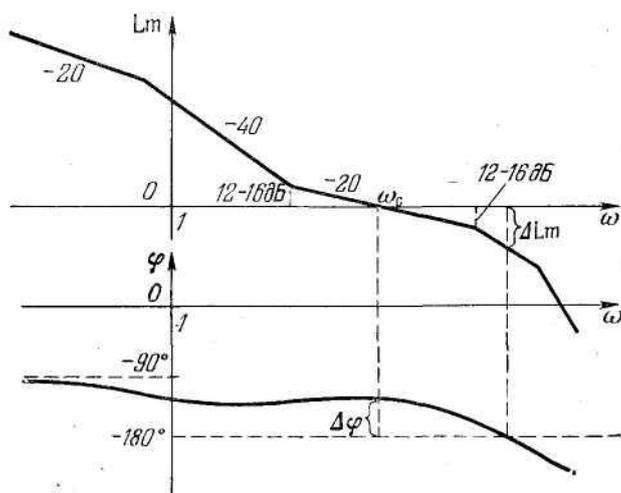


Рис. 6.17

Расстояние между W'_0 и W_0 по вертикали в логарифмическом масштабе и дает нам искомую величину $20\lg k_n$, т.е. искомый коэффициент усиления корректирующего устройства

$$k_n = \frac{k_{жс}}{k_0}.$$

Теперь надо найти передаточную функцию корректирующего устройства $\Pi(s)$.

Для этого совмещаем на один график логарифмические амплитудные частотные характеристики для $W_{ж}$ и W'_0 . Они отличаются на участке

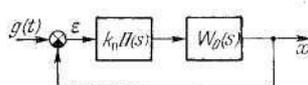


Рис. 6.18

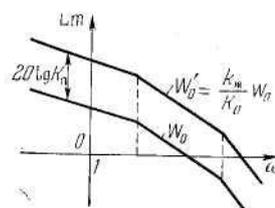


Рис. 6.19

от точки $1/T_1$ до точки $1/T_4$ (рис. 6.20).

Поскольку требуется

$$W(s) = k_{\Pi} \Pi(s) W_0(s) = W_{\text{ж}}(s),$$

то можно записать (после подстановки $s = j\omega$) следующее:

$$\Pi(j\omega) = \frac{W_{\text{ж}}(j\omega)}{k_{\Pi} W_0(j\omega)}$$

или

$$\Pi(j\omega) = \frac{W_{\text{ж}}(j\omega)}{W'_0(j\omega)} \quad (6.21)$$

откуда

$$20 \lg |\Pi(j\omega)| = 20 \lg |W_{\text{ж}}(j\omega)| - 20 \lg |W'_0(j\omega)|.$$

Следовательно, чтобы найти характеристику $Lm(\omega)$ для $\Pi(s)$, нужно вычесть характеристику $Lm(\omega)$ для W'_0 из $W_{\text{ж}}$. Результат вычитания показан штрихпунктирной линией на рис. 6.20. Отсюда очевидна искомая передаточная функция последовательного корректирующего устройства

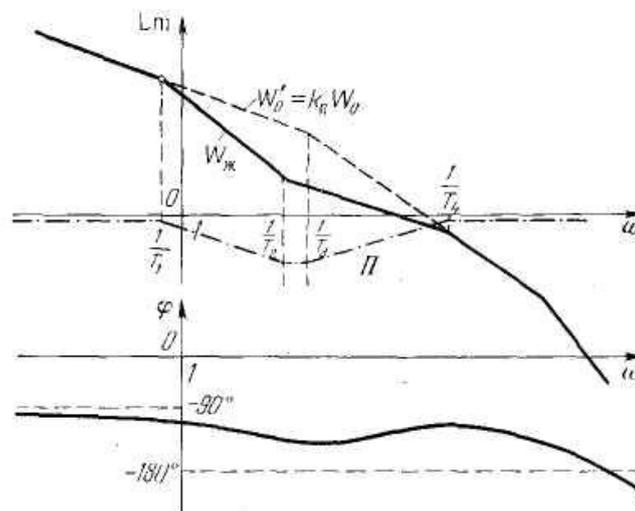


Рис. 6.20

$$\Pi(s) = \frac{(T_2 s + 1)(T_3 s + 1)}{(T_1 s + 1)(T_4 s + 1)}.$$

В заключение нужно построить фазовую характеристику $\varphi(\omega)$ для $W_{\text{ж}}$ и оценить запасы устойчивости (рис. 6.20).

Управление техническими системами

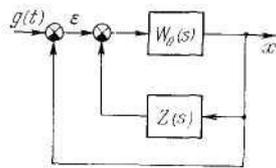


Рис. 6.21

По найденной передаточной функции можно составить электрическую схему корректирующего устройства (см., например, [45]).

Перейдем к синтезу параллельного корректирующего устройства в виде дополнительной обратной связи.

Задана передаточная функция разомкнутой цепи $W_0(s)$. Требуется ввести корректирующую обратную связь $Z(s)$ так, чтобы система в целом (рис. 6.21) обладала желаемой частотной характеристикой. Передаточная функция разомкнутой цепи с коррекцией равна

$$W_{\text{ж}}(s) = \frac{W_0(s)}{1 + Z(s)W_0(s)}. \quad (6.22)$$

Следовательно,

$$20 \lg |W_{\text{ж}}(j\omega)| = 20 \lg |W_0(j\omega)| - 20 \lg |1 + Z(j\omega)W_0(j\omega)|.$$

Чтобы избавиться от суммы под знаком логарифма, запишем приближенно

$$20 \lg |W_{\text{ж}}(j\omega)| \approx \begin{cases} 20 \lg |W_0(j\omega)| & \text{при } |Z(j\omega)W_0(j\omega)| \ll 1, \\ 20 \lg \left| \frac{1}{Z(j\omega)} \right| & \text{при } |Z(j\omega)W_0(j\omega)| \gg 1. \end{cases} \quad (6.23)$$

Построим заданную логарифмическую характеристику W_0 с желаемым коэффициентом усиления и желаемую характеристику $W_{\text{ж}}$ (рис. 6.22).

В качестве искомой характеристики $1/Z$ примем характеристику, обозначенную на рис. 6.22 точечным пунктиром и совпадающую в средней части с $W_{\text{ж}}$. Вычтем $1/Z$ из характеристики W_0 . Получим

$$20 \lg |W_0(j\omega)| - 20 \lg \left| \frac{1}{Z(j\omega)} \right| = 20 \lg |Z(j\omega)W_0(j\omega)|.$$

Этот результат показан на рис. 6.22 штрихпунктирной линией. Из графика видно, что на участке CD характеристика $|ZW_0| > 1$, а до точки C и после точки D характеристика $|ZW_0| < 1$, так как ось абсцисс соответствует значению амплитуды, равному 1 ($20 \lg A = 0$).

Следовательно, при принятом очертании искомой характеристики $1/Z$ удовлетворяются написанные выше приближенные равенства (6.23).

Управление техническими системами

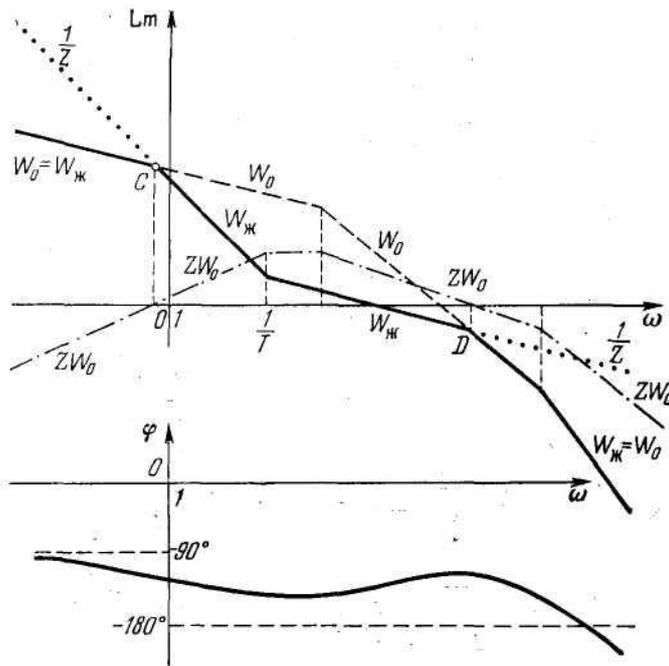


Рис. 6.22

$$Z(s) = \frac{ks^2}{Ts + 1}$$

Это есть инерционная гибкая обратная связь с двойным дифференцированием (т. е. обратная связь по угловому ускорению исполнительного привода следящей системы).

В заключение, ввиду использования здесь приближенных равенств, необходимо уточнить получившуюся фактически характеристику

$$W(j\omega) = \frac{W_0(j\omega)}{1 + Z(j\omega)W_0(j\omega)}$$

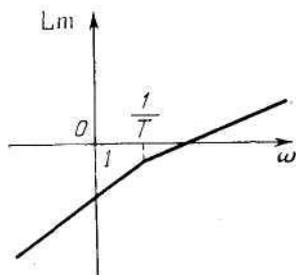


Рис. 6.23

оценить ее близость к желаемой, а затем изобразить фазовую характеристику $\varphi(\omega)$ (рис. 6.22) и оценить запасы устойчивости и качество процессов, которые будут иметь место фактически.

Поскольку данное построение требует соблюдения «минимально-фазовости» системы, то надо проверить также устойчивость внутреннего контура системы (рис. 6.21) с передаточной функцией

$$W_{вн}(s) = Z(s)W_0(s)$$

Амплитудная частотная характеристика для него имеется на рис. 6.22. Нужно только построить фазовую частотную характеристику $\varphi_{вн}(j\omega)$ и убедиться в

Таким образом, найдено параллельное корректирующее устройство в виде обратной связи, которое создает для системы в целом близкую к желаемой частотную характеристику. Согласно рис. 6.22 логарифмическая характеристика Z получит вид, представленный на рис. 6.23, что соответствует следующей передаточной функции искомой корректирующей обратной связи:

Управление техническими системами

соблюдении частотного критерия устойчивости. Существует развитие этого метода применительно к синтезу *совместно вводимых корректирующих устройств* (последовательного и параллельного). Разработаны также и иные варианты частотных методов синтеза.

5. Метод корневого годографа

О качестве процесса регулирования можно судить по расположению корней характеристического уравнения (т.е. полюсов передаточной функции замкнутой системы), учитывая также еще и операторный многочлен в правой части дифференциального уравнения (т.е. нули передаточной функции замкнутой системы). Вкратце об этом шла речь выше (§ 5.3).

Корневым годографом называется совокупность траекторий перемещения всех корней характеристического уравнения замкнутой системы при изменении какого-либо параметра этой системы (например, общего коэффициента усиления K разомкнутой цепи данной системы).

Пусть задана передаточная функция разомкнутой цепи системы автоматического регулирования. Запишем ее в виде

$$KW(s) = \frac{KN(s)}{L(s)}, \quad (6.24)$$

где K — общий коэффициент усиления разомкнутой цепи, а многочлены $N(s)$ и $L(s)$ имеют единичные коэффициенты при младших членах.

Главная передаточная функция замкнутой системы для регулируемой величины по задающему воздействию $g(s)$, как известно, имеет вид

$$\Phi(s) = \frac{KW(s)}{1 + KW(s)} = \frac{KN(s)}{L(s) + KN(s)}. \quad (6.25)$$

Характеристическое уравнение замкнутой системы запишется соответственно в форме

$$D(s) = L(s) + KN(s) = 0.$$

Его можно записать и иначе:

$$1 + KW(s) = 0,$$

или же

$$KW(s) = -1. \quad (6.26)$$

Управление техническими системами

Эта форма записи характеристического уравнения замкнутой системы и используется в дальнейшем. Выражение (6.26) является *основным уравнением* метода корневого годографа.

Обозначим корни характеристического уравнения замкнутой системы:

$$s_1, s_2, \dots, s_n,$$

полюса передаточной функции разомкнутой цепи [корни $L(s)$]:

$$P_1, P_2, \dots, P_n,$$

нули передаточной функции разомкнутой цепи [корни $N(s)$]:

$$N_1, N_2, \dots, N_m \quad (m < n).$$

Очевидно, величины P_i и N_q не зависят от K .

Задача состоит в том, чтобы, зная расположение нулей N_1, \dots, N_m и полюсов P_1, \dots, P_n передаточной функции разомкнутой цепи $KW(s)$, найти корни характеристического уравнения s_1, \dots, s_n как функции параметра K . Графически это и будет *корневой годограф* данной системы.

Корни характеристического уравнения являются полюсами передаточной функции замкнутой системы. Что же касается нулей этой функции, то согласно (6.25) нули замкнутой системы совпадают с заданными нулями разомкнутой цепи этой системы (6.24).

Преобразуем основное уравнение метода корневого годографа. Уравнение (6.26) распадается на два: уравнение модулей

$$K|W(s)| = 1 \tag{6.27}$$

и уравнение фаз

$$\arg KW(s) = \pm (2v - 1)\pi \quad (v = 1, 2, \dots). \tag{6.28}$$

Можно написать

$$KW(s) = KC \frac{(s - N_1)(s - N_2) \dots (s - N_m)}{(s - P_1)(s - P_2) \dots (s - P_n)} \tag{6.29}$$

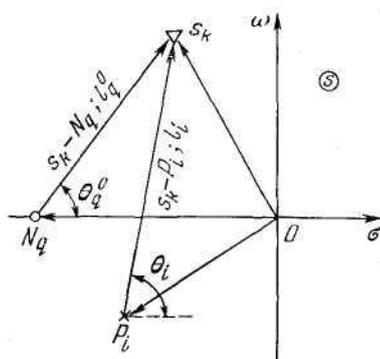


Рис. 6.24

где C — отношение коэффициентов при старших членах многочленов $N(s)$ и $L(s)$.

Подставим вместо s один из искомых корней характеристического уравнения s_k . На плоскости $s = \sigma + j\omega$ (рис. 6.24) этот корень изобразится вектором s_k . Построим также

Управление техническими системами

векторы P_i ($i = 1, 2, \dots, n$) и N_q ($q = 1, 2, \dots, m$) полюсов и нулей функции $KW(s)$. Полюса P_i будем обозначать крестиками, нули N_q — кружочками, а корни s_k — треугольниками. На рис. 6.24 показаны также векторы величин $s_k - N_q$ и $s_k - P_i$. Обозначим их аргументы соответственно через ϑ_q^0 и ϑ_i , а модули: l_q^0 и l_i .

Тогда уравнение фаз (6.28) с учетом выражения (6.29) можно переписать в виде

$$\sum_{q=1}^m \vartheta_q^0 - \sum_{i=1}^n \vartheta_i = \pm (2\nu - 1) \pi, \quad (6.30)$$

а уравнение модулей (6.27) с учетом (6.29) — в виде

$$K = \frac{1}{C} \frac{l_1 l_2 \dots l_n}{l_1^0 l_2^0 \dots l_m^0}. \quad (6.31)$$

Уравнение фаз (6.30) не зависит от K . Поэтому путь решения задачи может быть такой. Сначала следует подобрать на плоскости s такое положение S_k , которое бы удовлетворяло уравнению фаз (6.30) при всех заданных P_i и N_q . Потом по уравнению модулей (6.31) нужно подсчитать, какой величине параметра K это соответствует. Таким путем постепенно можно построить весь корневой годограф.

ЛЕКЦИЯ №9

по теме: Развитие систем управления летательных аппаратов.

1. Основные понятия и определения

Список сокращений

АД - автомат демпфирования (демпфер)

АПС - автомат перекрестной связи

АРЗ - автомат регулирования загрузки ручки управления АРП - автомат регулирования передаточного числа проводки управления

АРУ - автомат регулирования управления

АТ - автомат тяги

АУ - автомат устойчивости

АЧХ - амплитудно-частотная характеристика

БПРС - ближнеприводная радиосистема

БРУ - боковая ручка управления

БЦВМ - бортовая цифровая вычислительная машина

Управление техническими системами

- ВПП — взлетно-посадочная полоса
- ВТУ - вычислитель траекторного управления
- ВУ - вычислительное устройство
- ГВ - гировертикаль
- ГРМ - глиссальный радиомаяк
- ГРП - глиссальный радиоприемник
- ДИСС - доплеровский измеритель скорости и угла сноса
- ДПРС - дальнеприводная радиосистема
- ДУС - датчик угловой скорости
- ЖОС - жёсткая обратная связь
- ЗМ - загрузочный механизм
- ИНС - инерциальная навигационная система
- ИОС - изодромная обратная связь
- ИУ - исполнительное устройство
- КАП — креновый автопилот
- КПП - командно-пилотажный прибор
- КРМ - курсовой радиомаяк
- КРП - курсовой радиоприемник
- КРУ - командный рычаг управления
- КУР — курсовой угол радиостанции
- КЭНС - корреляционно-экстремальная навигационная система
- КНС - комплексная навигационная система
- ЛА - летательный аппарат
- ЛЗП - линия заданного пути
- ЛТХ - летно-технические характеристики
- МС - механизм согласования
- МСУ - механическая система управления
- МТЭ - электромеханизм триммерного эффекта
- НБУ - необратимое бустерное управление
- НК - навигационный комплекс
- НМ - нелинейный механизм
- НПП - навигационно-пилотажный прибор
- ОЗУ - оперативное запоминающее устройство ОС- устройство обратной связи
- ОТТ - общие технические требования
- ОУ - орган управления

Управление техническими системами

- ПЗУ - программируемое запоминающее устройство
ПНК - пилотажно-навигационный комплекс
ПРНК - прицельно-навигационный комплекс
ПО — программное обеспечение
ПВД - приемник воздушного давления
ППМ - поворотный пункт маршрута
ПУП - пульт управления и индикации
РА - рулевой агрегат
РАУ - рулевой агрегат управления
РЛС - радиолокационная станция
РП - рулевой привод
РСБН - радиосистема ближней навигации
РСДН - радиосистема дальней навигации
РУ - распределительное устройство
РУД - рычаг управления двигателем
САУ — система автоматического управления
САХ - средняя аэродинамическая хорда
СВ С - система воздушных сигналов
СКВ - система курса и вертикали
СНУ — система неавтоматического (ручного) управления
СОБП- система обеспечения безопасности полета
СОС - скоростная обратная связь
СП - сервопривод
СРНС - спутниковая радиотехническая навигационная система
ССУП- система стабилизации углового положения
СТУ — система траекторного управления
СУ - суммирующее устройство
СУДА - система управления летательного аппарата
СУУ - система обеспечения устойчивости и управляемости
ФЧХ — фазо-частотная характеристика
ЦМ - центр масс
ЭГРП - электрогидравлический рулевой привод
ЭДСУ - электродистанционная система управления
ЭМП - электромеханический преобразователь
ЭОВ - электронно-оптический визир

Управление техническими системами

Система управления летательного аппарата (СУЛА) - комплекс технических устройств, обеспечивающих управление ЛА.

Под **управлением** будем понимать процесс изменения параметров движения ЛА в желаемом направлении и целенаправленное воздействие на работу отдельных систем, на характеристики ЛА для достижения заданной цели. В основе процесса управления лежит информация о задачах управления (заданной цели) и текущем состоянии системы (рис.0.1).

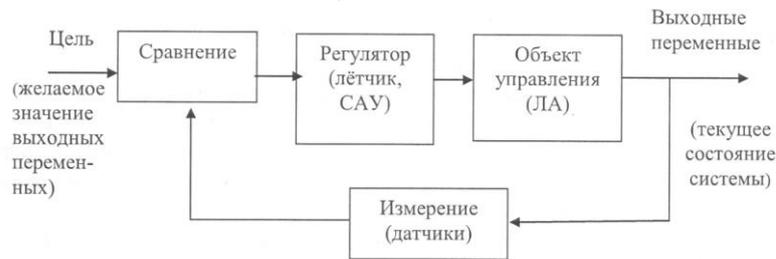


Рис.0.1

В соответствии с этим процесс управления включает следующие основные элементы или этапы:

- получение необходимой информации о задачах управления;
- получение информации о текущем состоянии объекта управления (ЛА);
- анализ полученной информации и выработку решения на управление (на управляющее воздействие);
- исполнение принятого решения.

Летчик, визуально и пользуясь показаниями приборов, наблюдает за параметрами движения ЛА в пространстве (направлением, скоростью и другими). Он сравнивает фактические значения параметров движения с заданными, проводит анализ, вырабатывает решение и, исполняя его, воздействует на командные рычаги управления (КРУ). В результате этого воздействия отклоняются органы управления (ОУ), которые изменяют силы и моменты, действующие на ЛА, а соответственно и параметры его движения в желаемом направлении.

Командные рычаги управления - технические устройства, обеспечивающие восприятие и передачу управляющих воздействий летчика.

Органы управления ЛА - технические устройства, с помощью которых регулируются величина и направление сил и моментов, действующих на ЛА.

На современных самолетах применяются ОУ двух видов: аэродинамические и струйные (газодинамические). В зависимости от их предназначения различают (рис. 0.2):

Управление техническими системами

- ❖ **органы продольного управления:** управляемый стабилизатор (дифференциальный стабилизатор), переднее горизонтальное оперение, элевоны (на самолетах схемы «бесхвостка»), поворотные сопла двигателей, струйные рули;
- ❖ **органы поперечного управления:** элероны; элевоны, выполняющие функции элеронов; флапероны, выполняющие функции элеронов; интерцепторы; дифференциальный стабилизатор; поворотные сопла двигателей; струйные рули;
- ❖ **органы путевого управления:** руль направления, цельноповоротный киль, дополнительные управляемые поверхности в нижней части фюзеляжа, поворотные сопла двигателей, струйные рули;
- ❖ **органы управления, используемые для повышения летно-технических характеристик (ЛТХ):** управляемые носки крыла и предкрылки; управляемые закрылки и флапероны; изменяемая стреловидность крыла; интерцепторы; тормозные щитки; реверс тяги;

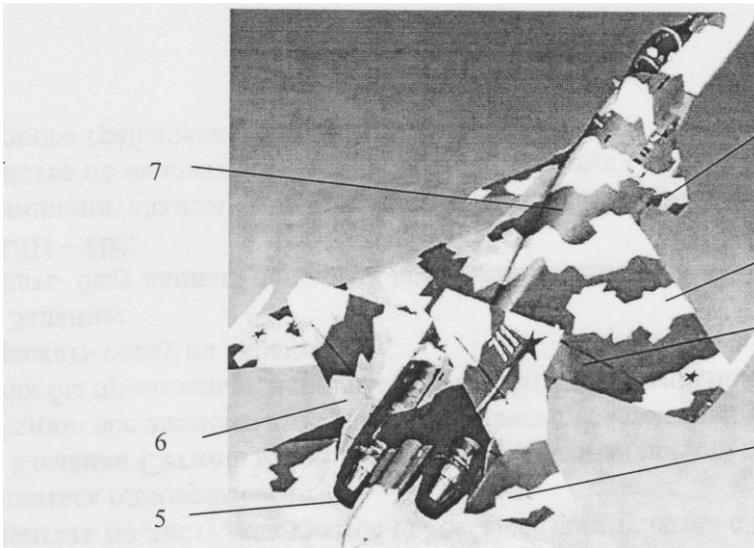


Рис. 0.2. Органы управления современного маневренного самолета:

- 1 — переднее горизонтальное оперение; 2 — отклоняемые носки крыла;
3 - флапероны; 4 - дифференциальный стабилизатор; 5 - управляемый вектор тяги; 6 - руль направления; 7 - тормозной щиток.

- ❖ **органы управления скоростью:** двигатель; тормозные щитки; тормозной парашют; реверс тяги и др.

В зависимости от степени участия лётчика и автоматических устройств в процессе управления различают три вида управления:

Управление техническими системами

- 1) неавтоматическое;
- 2) полуавтоматическое или директорное;
- 3) автоматическое.

При **неавтоматическом управлении** все функции по управлению ЛА (прием и анализ информации, выработка и исполнение решения) выполняет летчик, который, воздействуя на **КРУ**, отклоняет непосредственно или с помощью рулевого привода **ОУ**. Систему управления будем называть «**ручной**», если она не содержит элементов, улучшающих характеристики устойчивости и управляемости ЛА, и «**ручной автоматизированной**» при включении в нее элементов системы устойчивости и управляемости.

При **автоматическом управлении** все функции по управлению **ЛА** выполняет система автоматического управления (**САУ**).

При **полуавтоматическом управлении** часть функций выполняет летчик, часть - автоматические устройства. Характерный пример - директорное управление. При таком управлении прием, анализ информации, выработку управляющего сигнала, так же как и при автоматическом управлении, осуществляет вычислитель САУ, который подает сигнал не на исполнительное устройство САУ (рулевой агрегат), а на директорный командно-пилотажный прибор (КПП). В задачу летчика входит соответствующим отклонением КРУ исполнение команд, выдаваемых директорным прибором в виде отклонения командных стрелок.

Закон управления - математическая или логическая зависимость отклонения ОУ от управляющего воздействия летчика и (или) рассогласования между текущими и заданными параметрами движения ЛА.

2. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ

БОЕВЫХ ЛА

Системы управления боевых ЛА должны удовлетворять следующим основным требованиям.

1. Обеспечивать управление ЛА на всех режимах, определяемых его назначением, с необходимой точностью, при допустимой психофизиологической нагрузке экипажа. Для удовлетворения данного требования необходимо:

- осуществлять управление с допустимым искажением входного сигнала и без заметного запаздывания выходного на всех эксплуатационных режимах;

Управление техническими системами

- обеспечивать переход с одного режима работы на другой без резкого изменения параметров движения ЛА;
 - обеспечивать эргономическое соответствие свойств ЛА возможностям летчика.
2. Обеспечивать высокий уровень безопасности полетов, для чего необходимо:
- ❖ обладать практической безотказностью, что достигается высокой надежностью элементов СУЛА и их резервированием;
 - ❖ обеспечивать возможность парирования отказов системы и аварийного перехода с одного режима работы системы на другой.
3. Обладать высокой боевой живучестью, обеспечивающей при боевом повреждении продолжение полета или безопасное возвращение на свою базу.
4. Удовлетворять таким общим требованиям, предъявляемым ко всем агрегатам и системам ЛА, как высокие эксплуатационная технологичность и ремонтпригодность, минимальные масса, габариты, стоимость и др.

3. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

С 1909 г. (моноплан Блерио) на самолётах в качестве КРУ используются ручка управления и педали. Традиционной является и реакция самолёта на их отклонение, а именно: при отклонении ручки на себя самолёт увеличивает угол атаки; самолёт кренится в сторону отклонённой ручки и поворачивается в сторону вытянутой ноги. Правила знаков для усилий и отклонений КРУ, органов управления, управляющих моментов, угловых скоростей и ряда параметров представлены на рис. 0.3.

Практически до конца 30-х годов XX столетия управление самолетом на всех этапах полета выполнялось летчиком вручную, в основном по визуальным ориентирам и с использованием информации небольшого числа приборов, устанавливаемых на борту. Система управления таких самолетов представляла собой механическую проводку, связывающую КРУ с ОУ. Летчик приложением усилий к КРУ непосредственно преодолевал шарнирные моменты, т.е. осуществлялось «прямое управление». Круг задач пилотирования был весьма ограниченным, а точность выполнения низкой.

Управление техническими системами

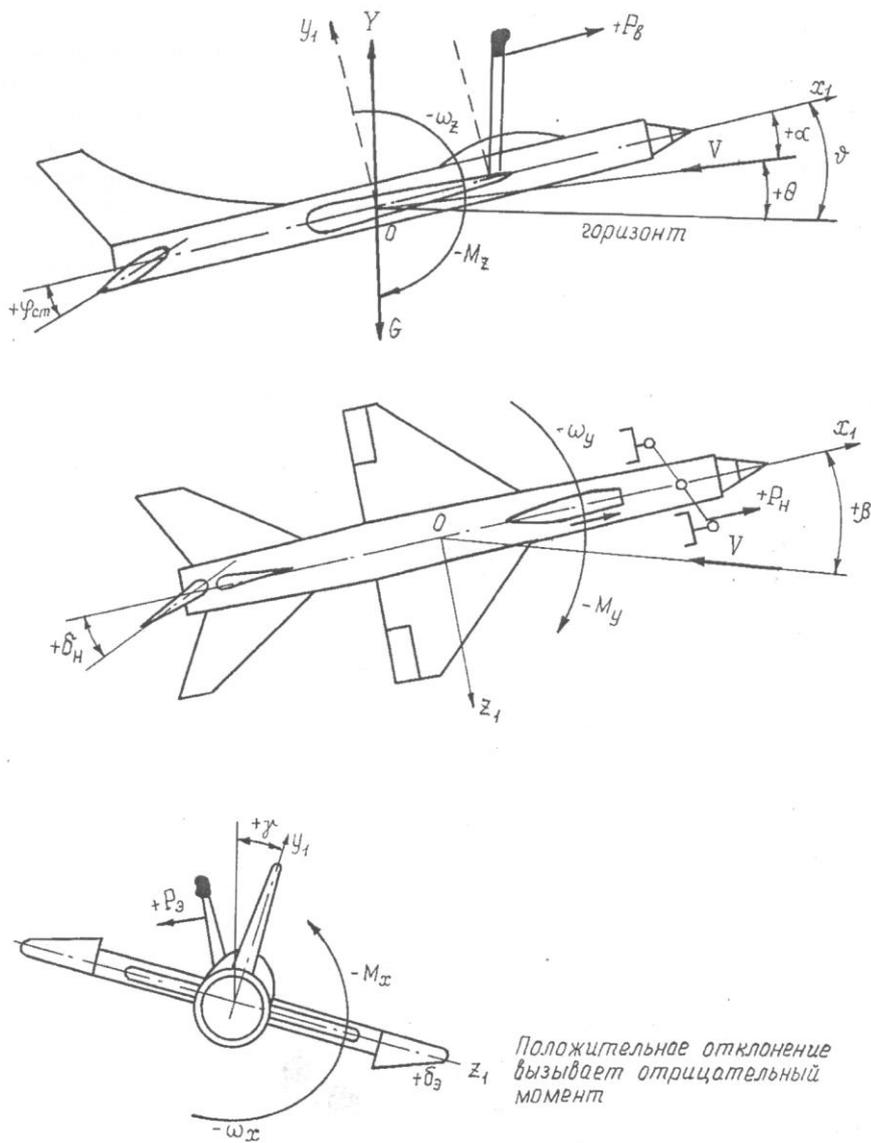


Рис. 0.3. Правила знаков

Толчком к развитию систем управления послужило совершенствование самолетов, улучшение их летно-технических характеристик (прежде всего длительности и протяженности полетов).

Первой была автоматизирована задача **угловой стабилизации** самолета с помощью автопилота. Для самолетов с большой продолжительностью крейсерского полета длительная стабилизация установившихся параметров траектории полета для летчика утомительна, хотя и проста, в особенности для винтовых самолетов тех лет. **Автоматическая стабилизация тангажа** обеспечивала при движении с постоянной скоростью выдерживание прямолинейности полёта, а стабилизация крена и рысканья - движение в заданном направлении (при малых внешних возмущениях). Первый российский автопилот АВП-1 появился в 1932 году. Уже во время Великой Отечественной

Управление техническими системами

войны автопилот АП-42 устанавливался практически на всех самолетах военно-транспортной авиации и на части бомбардировочной.

В 50-х годах появились автопилоты и на самолётах фронтовой авиации, обеспечивая автоматическую стабилизацию заданного углового положения самолёта и автоматическое приведение его в прямолинейный горизонтальный полёт в случае потери лётчиком пространственной ориентировки (КАП- 2, АП-5, АП-28 и др.). На данном этапе развития средств автоматизации полета автопилот облегчал самолетовождение на маршруте, т.е. на наиболее продолжительном участке полета. Вопрос о необходимости включения автопилота решался летчиком, который мог управлять самолетом и вручную, ориентируясь визуально или по приборам. Автопилот не являлся единственным возможным средством управления, поэтому требования к надежности первых автопилотов были не очень высокими.

Дальнейшей ступенью развития автопилотов, а следовательно, и систем управления, являются системы автоматического управления (САУ), так как они помимо выполнения чисто автопилотных функций, обеспечивают автоматическое управление траекторией на важнейших этапах полёта.

Появление на борту навигационных систем или комплексов (НК) для определения текущего местоположения самолёта и формирования заданной траектории полёта, а также САУ, обеспечивающей автоматическую стабилизацию самолёта на этой траектории, означает новый качественный скачок в развитии систем управления - появление комплексных систем управления или автоматизированных бортовых комплексов управления (пилотажно-навигационных комплексов - ПНК, прицельно-навигационных комплексов -ПРНК).

Их появление позволило возложить на бортовую автоматику функции управления, трудновыполнимые для летчика. К ним относится посадка самолета при ограниченной видимости или при отсутствии прямой видимости аэродрома. Посадка самолета является одним из наиболее сложных этапов полета. Близость земли требует особо четкого и строгого управления снижением. Поэтому, если посадка происходит при отсутствии визуального контакта с землей, единственным средством управления самолетом является автоматическая система посадки. В отличие от маршрутного полета в облаках, в данном случае управление по обычным пилотажным приборам не обеспечивает требуемой точности управления.

Управление техническими системами

В развитии **систем ручного управления** особое значение имеют следующие два этапа, которые существенно повлияли на ее структуру.

Первый этап связан с созданием необратимого бустерного управления (НБУ). В конце 40-х годов прогресс в области аэродинамики и двигателе-строения обеспечил преодоление звукового барьера. Однако при создании первых сверхзвуковых самолетов специалисты столкнулись с рядом новых явлений в области динамики:

- значительным увеличением продольной устойчивости вследствие сдвига назад аэродинамического фокуса;
- уменьшением эффективности органов управления по всем каналам в области сверхзвуковых скоростей;
- исключительно большим ростом аэродинамических шарнирных моментов рулей на сверхзвуке;
- значительным ухудшением демпфирующих свойств самолета на больших высотах и сверхзвуковых скоростях и ухудшением реакции самолета на управляющие команды летчика.

Таким образом, для осуществления сверхзвукового полета потребовалось создание особой системы управления (рис.0.4).

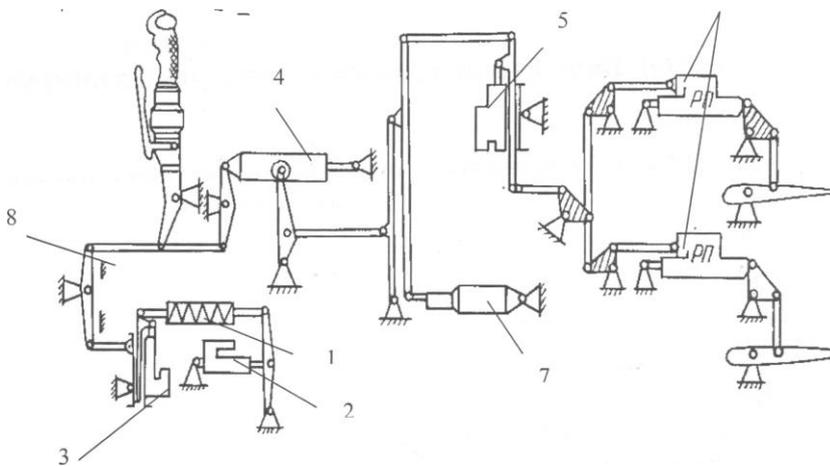


Рис.0.4. Система неавтоматического управления сверхзвукового самолёта:

- 1 - механизм загрузки; 2 - механизм триммерного эффекта; 3 - исполнительное устройство автомата регулирования загрузки; 4 - нелинейный механизм; 5 - исполнительное устройство автомата регулирования передаточного числа проводки управления; 6 - рулевой привод; 7 - исполнительное устройство автомата демпфирования; 8 - ограничительные упоры

Управление техническими системами

Для продольной балансировки пришлось применить полностью управляемый стабилизатор, что, в свою очередь, потребовало применения НБУ. Первыми самолетами, на которых было установлено бустерное управление (без перехода на ручное), были самолеты МиГ-19 и Су-7Б.

Однако на больших дозвуковых скоростях эффективность такого стабилизатора стала избыточной. Поэтому в СУЛА появились автоматы регулирования передаточного числа (отношение угла отклонения руля к отклонению КРУ) проводки управления. Кроме того, для обеспечения лётчику «чувства полета» стали использоваться механизмы загрузки, а также системы регулирования усилий на КРУ.

Расширение диапазонов высот и скоростей полёта самолётов привело к изменению в широких пределах их характеристик демпфирования, устойчивости и управляемости, так что на некоторых режимах полёта эти характеристики стали неудовлетворительными. Это потребовало установки в систему управления автоматов демпфирования, устойчивости и управляемости, составляющих систему обеспечения устойчивости и управляемости (СУУ). Таким образом, ручное управление стало автоматизированным.

На первом этапе внедрения средств автоматизации в качестве комплексирующей системы использовалась механическая система управления (МСУ). Именно она связывала компоненты отдельных систем в единую систему управления. Основное достоинство механической системы заключалось в высокой её надёжности, стабильности характеристик, в малой чувствительности к параметрам внешней среды. Однако использование для передачи управляющих сигналов МСУ не позволяет обеспечить необходимое качество управления неустойчивым самолётом.

Второй этап в развитии СУЛА связан с заменой механической системы передачи управляющих сигналов к приводам поверхностей управления на электродистанционную (ЭДСУ). Схема ЭДСУ приведена на рис.0.5.

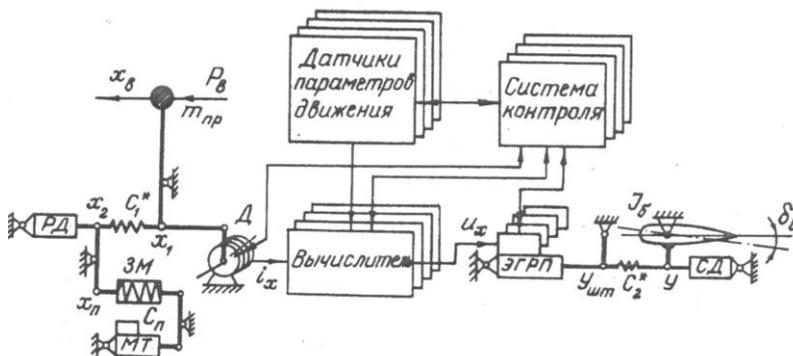


Рис.0.5. Принципиальная схема ЭДСУ:

Д - датчик положения ручки; ЗМ - загрузочный механизм; МТ - механизм триммерного эффекта; ЭГРП — электрогидравлический рулевой привод.

Оказалось возможным обеспечить на базе ЭДСУ искусственную устойчивость самолета. Самолёт Су-27 - первый статически неустойчивый самолёт, на котором устойчивость обеспечивается при помощи ЭДСУ, что позволило реализовать все преимущества неустойчивого самолёта.

Несмотря на большое разнообразие созданных за последнее время ЛА, их системы ручного управления можно свести к некоторым основным типам:

- ✚ система управления с механической связью и минимальным уровнем автоматизации (Ан-12, Су-25);
- ✚ система управления с механической связью и автоматизацией, обеспечивающей приемлемый уровень характеристик устойчивости и управляемости (Ан-22, Ил-76, МиГ-21, МиГ-25, МиГ-29, МиГ-31, Су-24, Ми-24);
- ✚ ЭДСУ с резервной механической связью (Ту-160, Ан-124);
- ✚ ЭДСУ без механической связи, использующая аналоговую или цифровую технику (МиГ-29К, Су-27, Су-30, Су-35).

4. СТРУКТУРА И СОСТАВ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БОЕВОГО ЛА

Задачи, которые решает СУЛА, условно можно разделить на три основных уровня:

- 1) обеспечение требуемой устойчивости и управляемости ЛА при управлении лётчиком или автоматом;
- 2) стабилизация тех или иных параметров движения;
- 3) целенаправленное управление траекторией, т.е. осуществление сложных пространственных маневров.

Задачи трёх уровней связаны между собой иерархически. При этом самым высоким является уровень целенаправленного управления траекторией.

Показатели собственной устойчивости и управляемости ЛА регламентируются рядом требований, выработанных практикой эксплуатации. Реализация этих требований аэродинамическими и конструктивными средствами во всем эксплуатационном диапазоне высот и скоростей, как правило, не представляется возможным. Поэтому в состав СУЛА, помимо системы ручного неавтоматического управления (СНУ), связывающей КРУ с ОУ, входит **система устойчивости и**

Управление техническими системами

управляемости (СУУ), которая функционирует совместно с летчиком при ручном пилотировании. Улучшение характеристик устойчивости и управляемости с помощью СУУ позволяет наиболее полно использовать маневренные возможности ЛА, упростить пилотирование, пилотировать ЛА без выхода на критические режимы полета.

Основной особенностью СУУ является то, что ее структура и параметры определяются прежде всего аэродинамической компоновкой конкретного ЛА.

Полёт ЛА может быть разложен на ряд типовых этапов. Для большинства из них характерным является поддержание постоянного значения (стабилизация) того или иного параметра полёта. Процесс длительной стабилизации утомителен для лётчика, поэтому на борту устанавливают **САУ**, выполняющую функции стабилизации углового положения ЛА и траекторных параметров - высоты, скорости, курса, линии заданного пути и др. Структура САУ определяется перечнем параметров, которые необходимо стабилизировать. В связи с эти законы управления САУ ЛА различного назначения могут совпадать. Аэродинамика ЛА оказывает влияние в основном лишь на параметры САУ, ее передаточные числа.

Решение задачи целенаправленного управления траекторией осуществляется с помощью специальных навигационных измерителей: инерциальных и курсовых систем, ДИСС, РСБН, РСДН, радиовысотомеров и др. Все эти измерители входят в состав **навигационного комплекса** ЛА. Информация о навигационных параметрах передается летчику через навигационные приборы системы индикации. Управление траекторией возможно как в ручном режиме, так и с использованием САУ (директорный и автоматический режимы). При этом навигационный вычислитель формирует управляющие сигналы, которые обрабатываются летчиком или САУ.

Контур траекторного управления СУЛА определяется, прежде всего , задачами, решаемыми ЛА. Аэродинамика Л А косвенно сказывается на параметрах этой системы через те динамические характеристики, которые реализуются внутренними контурами САУ, а также через его лётно-технические характеристики. В задачах навигации и управления траекторией на больших участках полёта ЛА вообще может рассматриваться как материальная точка.

Таким образом, для решения сформулированных выше задач в состав СУЛА входят СУУ и САУ, которая обычно включает систему стабилизации

Управление техническими системами

углового положения ЛА (ССУП) и систему траекторного управления (СТУ).

Функциональная схема комплексной системы управления представлена на рис.0.6.

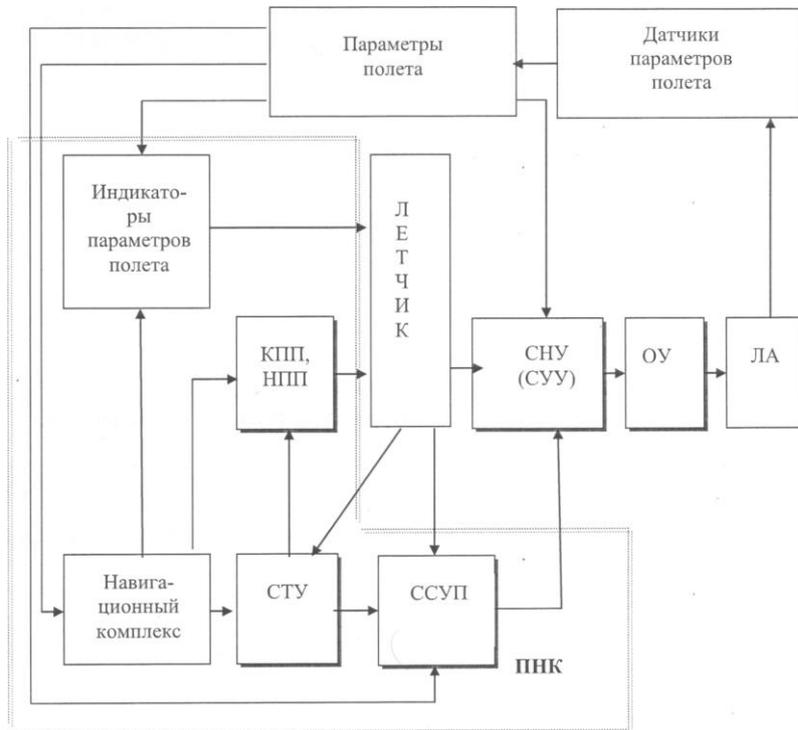


Рис. 0.6. Функциональная схема комплексной системы управления

Наряду с разделением систем по иерархическим уровням (по вертикали), СУЛА можно разделить на ряд каналов управления (по горизонтали): канал руля высоты, канал элеронов, канал руля направления и др. Каждый из каналов также является функциональным образованием (объединением систем) и содержит три основные части: информационную; управляющую; исполнительную.

Информационная часть состоит из датчиков угловых скоростей, перегрузки, углов атаки и скольжения, положения КРУ и других параметров, используемых в СУЛА.

Управляющая часть объединяет в себе несколько функциональных подсистем:

- КРУ и систему создания усилий на них;
- механическую или электродистанционную системы (ЭДСУ), связывающие КРУ с приводами ОУ;
- вычислители.

Управляющая часть обеспечивает:

Управление техническими системами

- 1) создание на рычагах управления требуемых характеристик управляемости по усилиям и перемещениям;
- 2) осуществление связи между КРУ в кабине ДА и рулевыми приводами;
- 3) формирование заданного закона управления ДА на основе сигналов информационной части СУЛА;
- 4) формирование ограничительных сигналов, предотвращающих (затрудняющих) произвольный вывод ЛА за границы предельных режимов полета.

Исполнительная часть включает исполнительные органы САУ (рулевые агрегаты), рулевые приводы, их блоки управления и контроля, а также ОУ. Данные элементы обеспечивают отработку сигналов, формируемых управляющей частью системы.

ЛЕКЦИЯ №10

по теме: САУ угловым положением ЛА. Автоматическое управление креном.

1. САУ угловым положением ЛА

Требования, предъявляемые к САУ

САУ предназначена для автоматического и директорного управления траекторией на важнейших этапах полёта и обеспечения заданных характеристик демпфирования, устойчивости и управляемости при ручном управлении.

В общем случае к САУ предъявляются требования по выполнению следующих функций:

- демпфирование короткопериодических колебаний самолёта и обеспечение заданных характеристик продольной и путевой устойчивости при всех видах управления (ручном, автоматическом и директорном);
- стабилизация углов крена, курса и тангажа;
- стабилизация барометрической и геометрической высоты полёта;
- приведение самолёта к горизонтальному полёту в случае потери лётчиком пространственной ориентировки;
- автоматический увод самолёта с опасно малой высоты;
- автоматическое и директорное управление траекторией в маршрутном полёте, при дальнем и ближнем наведении на воздушную или наземную цель,

Управление техническими системами

включая атаку цели и безопасный выход из атаки, при возврате на аэродром и заходе на посадку;

- автоматическое и директорное управление самолётом на этапах взлёта и посадки;
- контроль работоспособности с выдачей информации об отказах.

САУ должна обеспечивать выполнение всех заданных функций при всех вариантах подвесок, во всём диапазоне высот и скоростей, взлётных масс и центровок.

Перечень задаваемых функций САУ определяется типом летательного аппарата и его целевым назначением.

Переход с автоматического управления на директорное и ручное должен быть простым и не сопровождаться резким изменением параметров движения.

По характеру протекания процесса управления требования к САУ формируются по следующим трём основным направлениям:

- 1) точности выдерживания заданного параметра стабилизации δ %;
- 2) устойчивости контура управления (задаётся временем срабатывания $t_{ср}$ или временем регулирования $t_{рег}$);
- 3) качеству переходного процесса (задаётся относительным забросом $\Delta\bar{x}$ %).

В табл. 4.1 приведены ориентировочные значения указанных показателей.

Таблица 4.1

Стабилизируемый параметр	$t_{рег}, с$	$\Delta\bar{x}$ %	δ %
крен	1...2	менее 5	не более 5
курс	20...30	0	не более 5
тангаж	3...5	менее 5	не более 5

Переходные процессы при автоматическом управлении должны быть апериодическими с малым временем регулирования или колебательны с малым забросом регулируемой величины и малой степенью колебательности.

4.2. СЕРВОПРИВОДЫ И ВИДЫ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В НИХ

Отклонение органов управления автоматами демпфирования, устойчивости, автопилотами, САУ осуществляется с помощью своих исполнительных устройств - сервоприводов, представляющих собой рулевой агрегат с датчиком обратной связи и усилитель (рис. 4.1, а).

В качестве рулевого агрегата чаще всего используется электродвигатель с редуктором или гидроусилитель с электрическим приводом распределительного устройства. При отсутствии обратной связи рулевой агрегат описывается

Управление техническими системами

интегрирующим звеном. Вид обратной связи влияет на передаточную функцию сервопривода. В автопилотах и САУ находят применение сервоприводы с жёсткой (рис. 4.1, б), скоростной (рис. 4.1, в) и изодромной (рис. 4.1, г) обратной связью.

При жёсткой обратной связи (ЖОС) линейное или угловое перемещение штока δ рулевого агрегата измеряется потенциометрическим или индукционным датчиком обратной связи перемещения штока. Полученный сигнал $u_{oc} = k_{oc}\delta$, пропорциональный перемещению штока, вычитается из суммарного входного сигнала u_{Σ} .

Передаточная функция сервопривода

$$W_{СП}(p) = \frac{W_{\delta}(p)}{u_{\Sigma}} = \frac{k_{РА} / p}{1 + p k_{ОС} k_{РА} / p} = \frac{k_{РА}}{p + k_{ОС} k_{РА}} = \frac{k_{СП}}{T_{РА} p + 1}, \quad (4.1)$$

где $k_{СП} = 1/k_{ОС}$ – коэффициент усиления;

$T_{РА} = \frac{1}{k_{ОС} k_{РА}}$ – постоянная времени сервопривода (инерционного звена);

$k_{РА} = \delta / u_{\Sigma}$ – добротность сервопривода (коэффициент усиления по скорости).

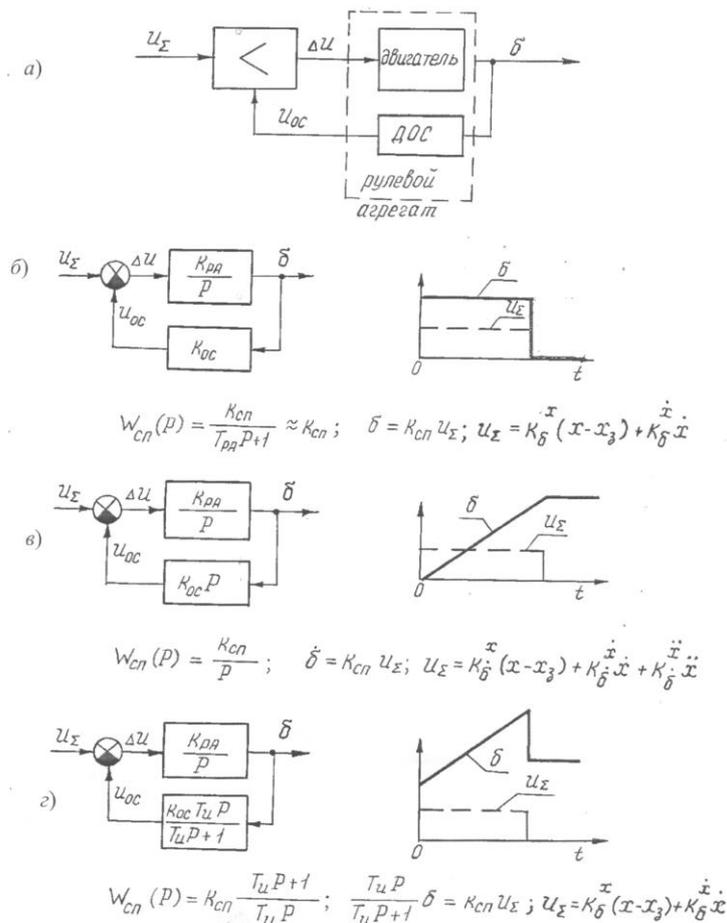


Рис. 4.1

Так как инерционность сервопривода мала по сравнению с инерционностью объекта управления, то, положив $T_{РА} = 0$, получим

$$W_{СП}(p) = W_{\frac{\delta}{u_{\Sigma}}}(p) = k_{СП} \text{ и } \delta = k_{СП} u_{\Sigma}, \quad (4.2)$$

т.е. сервопривод перемещает шток РА, а следовательно и отклоняет руль, на величину, пропорциональную входному сигналу.

При скоростной обратной связи (СОС) датчик обратной связи измеряет скорость δ движения штока РА. В качестве датчика обратной связи обычно используют тахогенератор или применяют непосредственное дифференцирование сигнала, снимаемого с потенциометра обратной связи. В этом случае сервопривод, как и РА, представляет собой интегрирующее звено, но имеет гораздо меньший коэффициент усиления по скорости ($k_{СП} = k_{РА}$):

$$W_{СП}(p) = \frac{\frac{k_{РА}}{p}}{1 + k_{ОС} p \frac{k_{РА}}{p}} = \frac{k_{РА}}{p(1 + k_{ОС} k_{РА})} = \frac{k_{СП}}{p}. \quad (4.3)$$

Отсюда следует, что при СОС скорость перемещения штока пропорциональна входному сигналу:

$$\dot{\delta} = k_{СП} u_{\Sigma} \text{ или } \delta = \frac{k_{РА}}{p(1 + k_{ОС} k_{РА})} u_{\Sigma} = \frac{k_{СП}}{p} u_{\Sigma}. \quad (4.4)$$

С таким сервоприводом отклонение руля в установившемся режиме пропорционально не отклонению регулируемого параметра (входному сигналу), а интегралу от этого отклонения. На основе сервопривода с СОС реализуются астатические САУ.

Сервоприводы с СОС приводят к снижению быстродействия, но при этом отсутствует перерегулирование («заброс») управляемого параметра. Поэтому сервоприводы с СОС находят применение больше в САУ неманевренных самолётов, для которых главным является исключение «забросов» параметров полёта.

При изодромной обратной связи (ИОС), как видно из рис. 4.1, г, в цепи обратной связи присутствует реальное дифференцирующее звено, и сервопривод представляется передаточной функцией:

$$W_{СП}(p) \approx \frac{T_u p + 1}{T_u p} k_{СП}. \quad (4.5)$$

Отсюда перемещение штока РА происходит по закону:

$$\delta = \frac{T_u p + 1}{T_u p} k_{СП} u_{\Sigma} = k_{СП} u_{\Sigma} + \frac{1}{T_u p} k_{СП} u_{\Sigma} \text{ или } \frac{T_u p}{T_u p + 1} \delta = k_{СП} u_{\Sigma}. \quad (4.6)$$

Из выражения (4.6) следует, что сервопривод с ИОС можно рассматривать как два сервопривода, соединенных последовательно: один СП с ЖОС, другой - с СОС.

ИОС сервопривода обеспечивает большое быстродействие САУ, но при этом возрастает «заброс» параметра, который тем больше, чем меньше постоянная времени T_u . Поэтому сервоприводы с ИОС используются больше для маневренных самолётов, для которых главным является высокое быстродействие.

СПОСОБЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РУЛЕВЫХ АГРЕГАТОВ В ПРОВОДКУ УПРАВЛЕНИЯ

В каждом канале САУ имеется один или несколько рулевых агрегатов (РА). При наличии одного рулевого агрегата он может быть включен в проводку управления последовательно или параллельно. При последовательном включении происходит суммирование отклонений органа управления от лётчика и автомата. Поэтому для системы обеспечения устойчивости и управляемости рулевые агрегаты должны иметь последовательную схему включения. При параллельном включении происходит суммирование усилий от лётчика и автомата. При наличии двух и более агрегатов может быть применена смешанная схема включения.

На рис. 4.2 представлены кинематические схемы **последовательного включения** рулевых агрегатов в проводку управления.

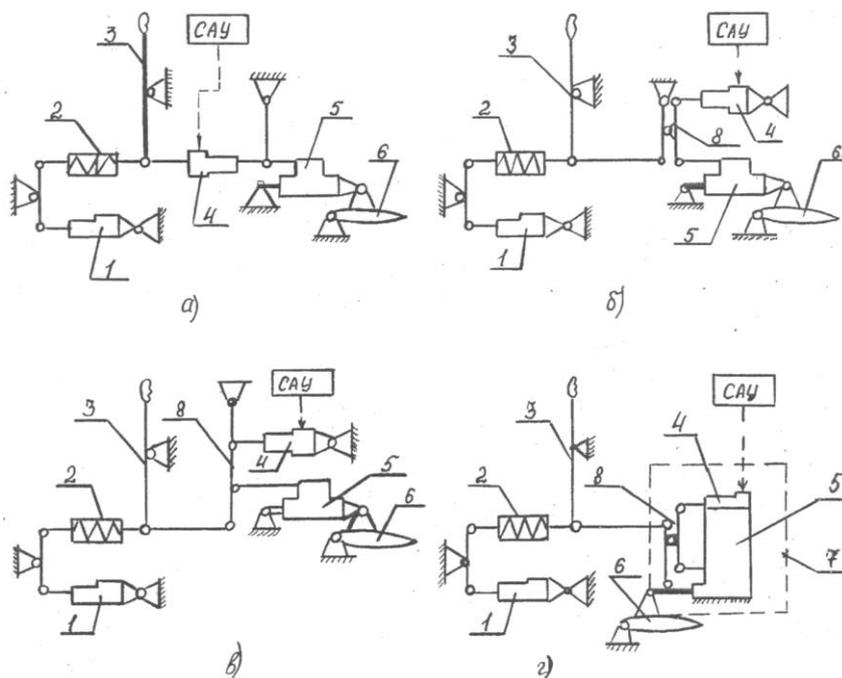


Рис. 4.2

На рис. 4.2, а рулевой агрегат 4 установлен в разрыв проводки управления перед рулевым приводом 5. Достоинство схемы - простота и компактность.

Управление техническими системами

Недостаток - необходимость перемещения рулевого агрегата вместе с проводкой управления при отклонении ручки 3 лётчиком.

На рис.4.2, б, в, и г рулевой агрегат 4 подключён к проводке управления с помощью дифференциальных качалок-смесителей 8. Эти схемы включения предпочтительнее схемы рис. 4.2, а, так как не имеют недостатка, присущего рис. 4.2, а, не требуют расстыковки проводки управления при снятии рулевого агрегата, а при постоянном ходе его штока позволяют изменением соотношения плеч с и d качалки 8 легко менять передаточное число проводки от рулевого агрегата к рулевому приводу.

На рис. 4.2, г рулевой агрегат 4 и рулевой агрегат 5 выполнены в виде единого агрегата - комбинированного рулевого привода 7.

Последовательная схема позволяет лётчику и САУ отклонять рули как отдельно, так и одновременно. В такой схеме при работе САУ рули 6 отклоняются, а ручка управления 3 при этом не перемещается, так она удерживается лётчиком или пружинным загрузочным механизмом 2, имеющим предварительное сжатие пружины, большее, чем потребное усилие для страгивания золотника рулевого привода. Поэтому последовательное включение исполнительных устройств используют для тех систем, которые должны работать совместно с лётчиком: для автоматов демпфирования, устойчивости, при стабилизации угловых положений маневренных самолётов и т.д.

При последовательном включении рулевой агрегат может быть малой мощности, габаритов и массы, так как от него требуются небольшие величины усилий, необходимые только для преодоления трения в проводке и золотнике рулевого привода.

На рис. 4.3 представлены кинематические схемы параллельного включения рулевых агрегатов в проводку управления.

Все схемы параллельного включения обеспечивают возможность только отдельного отклонения рулей или от лётчика, или от САУ и не допускают одновременного отклонения их лётчиком и САУ. Если лётчик отклоняет ручку управления 3, то датчик усилий 7 отключает САУ, а следовательно и рулевой агрегат 4.

При работающем рулевом агрегате перемещается вся проводка управления, и одновременно с рулем отклоняется освобождённая от усилий ручка управления, этим сигнализируя лётчику о включённом автоматическом

Управление техническими системами

управлении. Поэтому при параллельном включении рулевой агрегат должен обеспечивать отклонение руля на полный диапазон. Последнее же требует принятия специальных мер для обеспечения безопасности полёта на случай возможных отказов САУ.

На рис.4.3, а шток РА жёстко подсоединен к проводке управления с помощью качалки 8 и должен развивать усилие, необходимое для сжатия пружины загрузочного механизма, преодоления сил трения в проводке управления и золотнике рулевого привода.

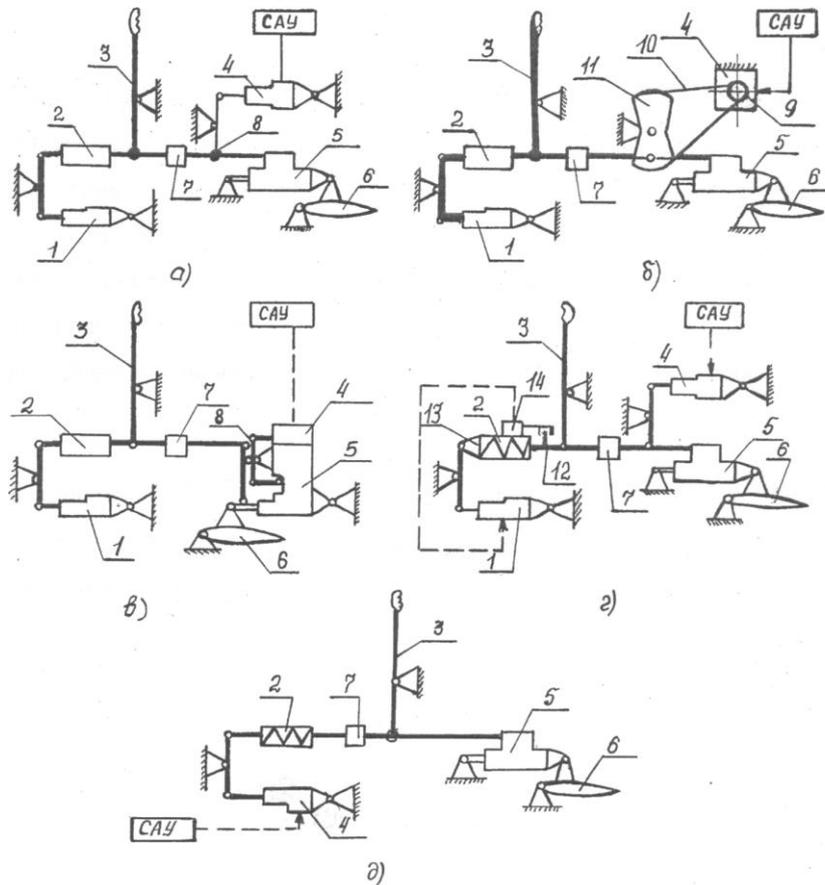


Рис. 4.3.

При ручном управлении отклонение рулевой поверхности 6 осуществляется также через рулевой привод 5 от ручки 3. При этом шток РА качалкой 8 перемещается свободно, так как полости его цилиндра закольцованы.

В схеме, изображенной на рис. 4.3, б, рулевой агрегат (обычно электро-механический) имеет выходной каскад 4 вращательного действия и соединён с проводкой управления при помощи барабана 9, тросовой проводки 10 и сектора 11. При ручном управлении специальная муфта отключения разъединяет барабан 9 с рулевым агрегатом 4 и обеспечивает свободное перемещение проводки управления.

Управление техническими системами

В схеме рис. 4.3, в рулевой агрегат 4 смонтирован на самом рулевом приводе 5. В этом случае при автоматическом управлении он используется как первый каскад усиления электрогидравлического рулевого привода. Такая схема по сравнению с другими схемами параллельного включения обладает большей компактностью, и боевой живучестью (как и схема последовательного включения, рис.4.2, а) и поэтому также широко применяется на самолётах и особенно вертолётах.

Для предотвращения рывков ручки управления (и рулей) при отказе и выключении САУ применяют автоматическое триммирование усилий на ручке подачей на механизм триммерного эффекта 1 специального управляющего сигнала от САУ или применением схем рис. 4.3, в и д.

В схеме рис. 4.3, г при перемещении проводки управления от рулевого агрегата в автоматическом режиме работы САУ происходит отклонение ручки управления 3 и смещение штока 12 пружинного загрузочного механизма 2 относительно его неподвижного корпуса 13. Последнее вызывает замыкание концевого выключателя 14 и включение электромеханизма триммерного эффекта 1 на снятие усилий с ручки управления.

В схеме, изображенной на рис. 4.3, д, рулевой агрегат 4 подключен к проводке управления через пружину с предварительным сжатием, большим, чем трение в системе управления. При ручном управлении рулевой агрегат используется в качестве механизма триммирования усилий на ручке управления. Перед включением автоматического управления лётчик должен стриммировать ручку по усилиям и освободить её. Это обеспечивает при включении автоматического режима работы САУ отсутствие рывков ручки управления и рулей. Недостатком такой схемы перед ранее рассмотренными является меньшая жёсткость проводки от рулевого агрегата до рулевого привода, приводящая к ухудшению характеристик автоматического управления.

Примером смешанного включения исполнительных устройств САУ в проводку управления могут служить схемы, приведенные на рис.4.2, если к САУ подключить одновременно агрегаты 4 и 1.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ САУ

Законы управления САУ определяют динамику движения ЛА при автоматическом управлении, а с другой стороны, характеризуют структуру построения САУ.

Управление техническими системами

Системы автоматического управления (САУ) современных самолётов достаточно сложны, поэтому исследование динамических свойств самолётов, оборудованных САУ, в общем случае связано с серьезными трудностями.

Задача исследования динамических свойств существенно упрощается, если удастся многоконтурную систему управления расчленить на несколько более простых. Обоснованием такого разделения являются собственные динамические свойства самолёта.

Во-первых, в ряде случаев общее движение можно разделить на продольное и боковое и рассматривать управление ими независимо друг от друга.

Во-вторых, поскольку малые (короткопериодические) движения, определяющие движение самолёта вокруг центра масс, протекают значительно быстрее больших (длиннопериодических) движений, характеризующих движение центра масс, то системы управления, в свою очередь, можно разделить на системы управления движением вокруг центра масс и движением центра масс.

Автоматическое управление САУ осуществляют путем воздействия на органы управления и создания ими необходимых управляющих сил и моментов.

На самолёте необходимые управляющие силы и моменты создаются, в основном, за счёт изменения углового положения самолета относительно центра масс. Однако в последние годы появилась тенденция использования управляющих органов, которые позволяют получать эти силы и без изменения его угловых положений.

В любом из этих случаев всегда имеется параметр x , характеризующий величину управляющей силы. Такими параметрами могут быть $n_y, n_z, \alpha, \beta, \vartheta, \gamma$ и др. Им свойственно быстрое протекание процессов изменения, в отличие от параметров u , характеризующих изменение траектории полёта H, Z, ψ и др.

Поэтому современные САУ строятся по иерархическому принципу. САУ включает внутренний (пилотажный или автопилотный) контур, управляющий движением ЛА вокруг его центра масс, и внешний (траекторный) контур, управляющий движением центра масс. Пилотажный контур управляет такими параметрами движения как перегрузки, углы атаки, крен, тангаж, а траекторный - курсом, высотой полета, отклонением от линии заданного пути и др.

Автопилоты могут быть выполнены в виде самостоятельных систем или входить в состав САУ как ее «внутренний» контур управления. Автопилот автоматически отклоняет рулевые поверхности для управления угловым положением самолёта. В зависимости от числа каналов управления различают

Управление техническими системами

двухканальные (крена и тангажа) и трёхканальные (крена, тангажа, рыскания) автопилоты.

Если через x обозначить один из параметров движения пилотажного контура САУ, то закон управления отклонением руля δ будет иметь вид:

$$\delta = k_{\delta}^x(x - x_3) + k_{\delta}^{\dot{x}} \dot{x}, \quad (4.7)$$

где x, x_3 – соответственно текущее и заданное значение управляемого параметра; \dot{x} – скорость изменения этого параметра по времени; $k_{\delta}^x = \frac{\partial \delta}{\partial x}$; $k_{\delta}^{\dot{x}} = \frac{\partial \delta}{\partial \dot{x}}$ – передаточные числа (коэффициенты усиления). Первое

слагаемое в этом выражении – основной управляющий сигнал внутреннего контура управления. Второе слагаемое предназначено для уменьшения колебательности переходного процесса. Если вместе с САУ работает СУУ, то этот сигнал в законе может отсутствовать, так как его функцию выполняют автоматы демпфирования.

Функционирование пилотажного и траекторного контуров взаимосвязано. Например, для изменения высоты полёта необходимо изменить тангаж, а для изменения курса – крен и т.д. Поэтому поступают следующим образом. В пилотажном контуре оставляют закон управления вида (4.7), а заданное значение управляемого параметра x_3 формируется в траекторном контуре в зависимости от режима работы САУ по закону

$$x_3 = k_x^y(y - y_3) + k_x^{\dot{y}} \dot{y} + k_x^v v, \quad (4.8)$$

где: y – текущее, а y_3 – заданное значение параметра траектории; v – сигнал перекрёстной связи; $k_x^y = \frac{\partial x}{\partial y}$, $k_x^{\dot{y}} = \frac{\partial x}{\partial \dot{y}}$, $k_x^v = \frac{\partial x}{\partial v}$ – передаточные числа по соответствующему сигналу.

Первая составляющая в законе (4.8) – основной управляющий сигнал во внешнем контуре управления. Второе слагаемое – по скорости изменения параметра – обеспечивает демпфирование траекторного движения самолёта. Сигнал \dot{y} может быть заменен другими эквивалентными сигналами или даже отсутствовать в законе (4.8), если управляемый параметр внутреннего контура x в законе (4.7) эквивалентен \dot{y} .

Третья составляющая в законе (4.8) $k_x^v v$ вводится в тех случаях, когда необходимо учесть взаимное влияние различных каналов управления. Так, например, для предотвращения потери высоты при выполнении маневра в горизонтальной плоскости необходимо в закон управления рулем высоты вводить сигнал, зависящий от крена, который необходим для дополнительного увеличения перегрузки на величину

$$\Delta n_y = \frac{\Delta Y}{G} = \frac{Y - Y \cos \gamma}{Y \cos \gamma} = \frac{1 - \cos \gamma}{\cos \gamma}.$$

Существенным недостатком закона управления (4.7) с жёсткой обратной связью для внутреннего контура САУ является появление статических ошибок выдерживания заданного значения управляемого параметра от постоянных или медленно меняющихся внешних возмущающих воздействий (сброс груза или

уменьшение массы самолёта вследствие выгорания топлива, несимметричный пуск ракет, разгон и торможение самолёта и т.д.).

Обеспечение астатизма к внешним возмущениям можно осуществить следующими способами:

1. Введением в закон управления (4.7) интегрального члена от сиг-

нала рассогласования $\int_0^t (x - x_3) dt$, т.е. применением закона управления вида:

$$\delta = k_{\delta}^x(x - x_3) + k_{\delta}^{\dot{x}}\dot{x} + k_{\delta} \int (x - x_3) dt. \quad (4.9)$$

Дополнительный интегральный сигнал формирует отклонение руля следующим образом: в начальный момент времени влияние интегрального сигнала мало, и руль отклоняется также как и при законе (4.7). Но с течением времени этот сигнал увеличивается, что сопровождается увеличением отклонения руля до возвращения регулируемого параметра к заданному значению.

2. Введением скоростной обратной связи:

$$\dot{\delta} = k_{\delta}^x(x - x_3) + k_{\delta}^{\dot{x}}\dot{x} + k_{\delta}^{\ddot{x}}\ddot{x} \quad \text{или} \quad \delta = \frac{k_{\delta}^x}{p}(x - x_3) + k_{\delta}^{\dot{x}}x + k_{\delta}^{\ddot{x}}px. \quad (4.10)$$

JL

Из сравнения последнего выражения (4.10) с (4.9) видно, что применение СОС эквивалентно применению ЖОС с дополнительным интегральным членом от сигнала рассогласования.

3. Введением изодромной обратной связи:

$$\frac{T_u p}{T_u p + 1} \delta = k_{\delta}^x(x - x_3) + k_{\delta}^{\dot{x}}px \quad \text{или} \quad (4.11)$$

$$\delta = \frac{T_u p + 1}{T_u p} [k_{\delta}^x(x - x_3) + k_{\delta}^{\dot{x}}px].$$

При изодромной обратной связи сервопривод обладает способностью дифференцировать суммарный управляющий сигнал. Поэтому, по сравнению с САУ со скоростной обратной связью, информационная и вычислительная части системы с изодромной обратной связью могут быть реализованы проще.

Недостатком астатических САУ является более сложная аппаратная реализация, а также склонность к автоколебаниям при наличии нелинейностей в характеристиках реальных элементов.

4. Применением закона (4.7), но наличием в САУ двух исполнительных устройств, включенных по схеме на рис. 4.2, б или в (малого быстродействия с большим порогом срабатывания МТЭ 1 и большого быстродействия ограниченного хода РА 4). Структурная схема контура управления «САУ -

Управление техническими системами

самолёт», соответствующая такому включению исполнительных устройств, приведена на рис. 4.4. Заметим, что астатизм обеспечивается при сигналах, превышающих порог срабатывания механизма МТЭ.

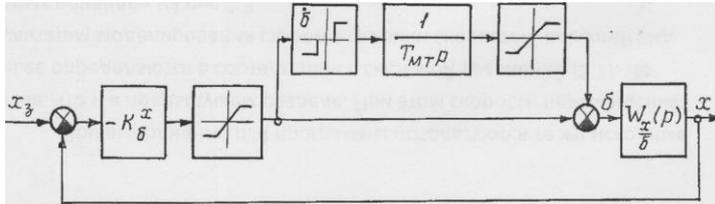


Рис. 4.4

Необходимо заметить, что в реальных САУ при формировании заданного значения управляемого параметра отдельные сигналы могут пропускаться через формирующие фильтры и ограничители различного назначения. Так, одни фильтры служат для подавления вредных помех с датчиков параметров движения, другие - для получения лучшего качества переходных процессов в замкнутом контуре, третьи — для устранения высокочастотных составляющих в формировании управляющих сигналов, которые могут вызвать резкие эволюции самолёта.

2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ КРЕНОМ

Функциональная схема, состав и законы управления автопилота (САУ)

Одним из наиболее простых случаев автоматического управления движением ЛА вокруг центра масс является управление движением крена. При таком движении величина сил и моментов, действующих на аппарат, не зависит от значения крена. В этом случае автопилот должен обеспечить управление вращением самолёта вокруг продольной оси. В качестве органа управления могут использоваться элероны, интерцепторы, дифференциальный стабилизатор и другие органы управления креном.

В зависимости от структуры автопилота законы управления, например, элеронами, могут иметь вид:

Управление техническими системами

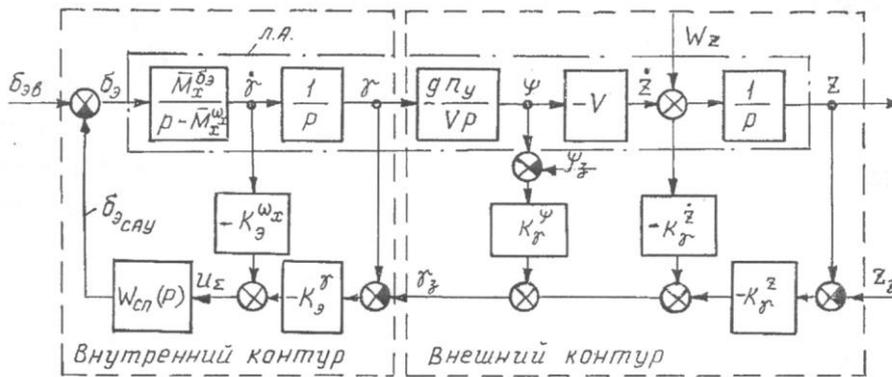


Рис. 4.6

В зависимости от типа самолёта рабочий диапазон регулирования крена может изменяться в широких пределах. Так, если у неманевренных самолётов он составляет 20...30°, то у маневренных достигает 360°, что требует достаточно высокого быстродействия этого контура управления.

Динамические свойства системы «САУ - летательный аппарат» при управлении креном

Сначала рассмотрим автоматическое управление изолированным движением крена, что допустимо при сравнительно небольших углах атаки α и при $\beta = 0$. Для исследования динамических свойств системы «АП - самолёт» получим и проанализируем передаточную функцию замкнутого контура управления. Будем предполагать, что автопилот с жёсткой обратной связью имеет закон управления (4.12)

$$\delta_{\text{э}} = k_{\text{э}}^{\gamma}(\gamma - \gamma_{\text{з}}) + k_{\text{э}}^{\omega_x} \omega_x.$$

Структурную схему для этого закона управления получим из структурной схемы (рис. 4.6), отключив внешний контур САУ (см. рис.4.7, а).

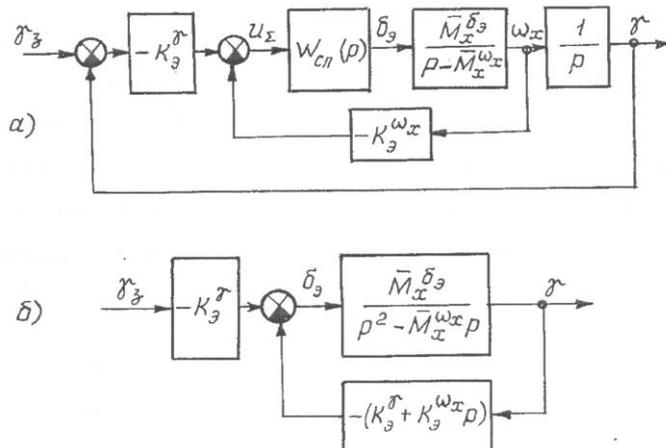


Рис. 4.7

Управление техническими системами

На рис. 4.7, а и в о внутреннем контуре (рис. 4.6) имеются две передаточные функции, отражающие динамические свойства самолёта в изолированном движении крена.

Первая –
$$W_{\frac{\omega_x}{\delta_3}}(p) = \frac{\overline{M}_x^{\delta_3}}{p - \overline{M}_x^{\omega_x}} \quad (4.15)$$

характеризует изменение скорости крена ω_x на отклонение элеронов δ_3 , а вторая – $W_{\frac{\gamma}{\omega_x}}(p) = \frac{1}{p}$ – изменение крена при появлении ω_x . Они получены из собственных свойств ЛА, описываемых уравнениями изолированного движения крена

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_x &= \overline{M}_x^{\omega_x} \omega_x + \overline{M}_x^{\delta_3} \delta_3 + \overline{M}_{x\delta}; \\ \dot{\gamma} &= \omega_x, \end{aligned}$$

записанных в операторной форме

$$\begin{cases} p\omega_x = \overline{M}_x^{\omega_x} \omega_x + \overline{M}_x^{\delta_3} \delta_3 + \overline{M}_{x\delta}; \\ p\gamma = \omega_x, \end{cases} \quad (4.16)$$

или

$$\begin{cases} p^2\gamma = \overline{M}_x^{\omega_x} p\gamma + \overline{M}_x^{\delta_3} \delta_3 + \overline{M}_{x\delta}; \\ p\gamma = \omega_x \end{cases}$$

Нетрудно видеть, что выражение (4.15) получается из первого уравнения (4.16) при отсутствии возмущающего момента крена с помощью простых алгебраических операций.

Из выражений (4.16) получаем передаточную функцию изолированного движения крена при отклонении элеронов при выключенном автопилоте

$$W_{\frac{\gamma}{\delta_3}}(p) = \frac{\overline{M}_x^{\delta_3}}{p^2 - \overline{M}_x^{\omega_x} p} = \frac{\overline{M}_x^{\delta_3}}{p(p - \overline{M}_x^{\omega_x})},$$

откуда значение крена при ступенчатом отклонении элеронов будет:

$$\gamma = W_{\frac{\gamma}{\delta_3}}(p=0)\delta_3 \Rightarrow \infty.$$

Следовательно, без автопилота самолёт неустойчив в отношении крена: при отклонении элеронов крен будет возрастать неограниченно.

Рассмотрим теперь поведение самолёта с включённым автопилотом. Так как быстродействие сервопривода намного больше быстродействия самолёта, то примем сервопривод в первом приближении усилительным звеном с коэффициентом усиления, равным единице $W_{сп}(p) = 1$. Представим закон

управления (4.12) в следующем виде:
$$\delta_3 = -k_3^\gamma \gamma_3 + (k_3^\gamma + k_3^{\omega_x} p)\gamma.$$

Тогда при сделанных выше допущениях структурную схему контура «АП - самолёт» можно изобразить в виде, показанном на рис. 4.7, б. Входом здесь является заданный, а выходом - текущий крен. Из этой схемы получаем следующую передаточную функцию замкнутого контура управления креном:

Управление техническими системами

$$\Phi_{\gamma}^{\gamma}(p) = -\frac{k_{\delta}^{\gamma} W_{\gamma}(p)}{1 - (k_{\delta}^{\gamma} + k_{\delta}^{\omega_x}) W_{\gamma}(p)} = \frac{-\overline{M}_x^{\delta\delta} k_{\delta}^{\gamma}}{p^2 + 2n_{\gamma} p + \Omega_{\gamma}^2}, \quad (4.17)$$

где характеристика затухания n_{γ} и частота собственных колебаний Ω_{γ} самолёта с креновым автопилотом соответственно определяются выражениями:

$$2n_{\gamma} = -\overline{M}_x^{\omega_x} - k_{\delta}^{\omega_x} \overline{M}_x^{\delta\delta}; \quad \Omega_{\gamma}^2 = -\overline{M}_x^{\delta\delta} k_{\delta}^{\gamma} \quad (4.18)$$

Передаточную функцию (4.17) можно получить и другим способом. Для этого запишем уравнения изолированного движения крена в операторной форме (4.16) совместно с законом управления автопилота (4.12):

$$\begin{cases} p^2 \gamma = \overline{M}_x^{\omega_x} p \gamma + \overline{M}_x^{\delta\delta} \delta_{\delta} + \overline{M}_{x\delta}; \\ p \gamma = \omega_x; \\ \delta_{\delta} = k_{\delta}^{\gamma} (\gamma - \gamma_3) + k_{\delta}^{\omega_x} p \gamma. \end{cases}$$

Подставив третье уравнение в первое и перенеся все члены (кроме $-k_{\delta}^{\gamma} \gamma_3$) в левую часть, получим:

$(p^2 + (-\overline{M}_x^{\omega_x} - k_{\delta}^{\omega_x} \overline{M}_x^{\delta\delta}) p - \overline{M}_x^{\delta\delta} k_{\delta}^{\gamma}) \gamma = -k_{\delta}^{\gamma} \gamma_3$, а из него соответственно передаточную функцию (4.17) и характеристики (4.18).

В выражениях (4.15)...(4.18) обозначено:

$$\overline{M}_x^{\omega_x} = \frac{M_x^{\omega_x}}{I_x} = \frac{m_x^{\omega_x} q S l}{I_x}; \quad \overline{M}_x^{\delta\delta} = \frac{M_x^{\delta\delta}}{I_x} = \frac{m_x^{\delta\delta} q S l}{I_x}; \quad \overline{M}_{x\delta} = \frac{M_{x\delta}}{I_x}.$$

Если в изолированном движении крена самолёт неустойчив в отношении крена, то автопилот, имеющий коррекцию по углу крена, обеспечивает устойчивость контура $\Omega_{\gamma} > 0$ и тем большую, чем больше передаточное число k_{δ}^{γ} .

С увеличением передаточного числа $k_{\delta}^{\omega_x}$ растёт демпфирование движения. Таким образом, изменением передаточных чисел k_{δ}^{γ} и $k_{\delta}^{\omega_x}$ можно регулировать в широких пределах значения характеристик Ω_{γ} и n_{γ} и, тем самым, обеспечивать заданное качество переходного процесса, определяемого

$$\text{величиной } \xi_{\gamma} = \frac{n_{\gamma}}{\Omega_{\gamma}}.$$

Расчёт требуемых значений передаточных чисел автопилота проведём с использованием метода стандартных коэффициентов.

Метод стандартных коэффициентов основан на том, что между характером переходной и передаточной функций системы существует определённая связь. Вид переходной функции определяется значением нулей (корней числителя) и полюсов (корней знаменателя) передаточной функции. Набор значений коэффициентов, соответствующих заданному распределению нулей и полюсов, называется стандартным.

Для передаточной функции (4.17) - без нулей в числителе - вид переходной функции системы полностью определяется коэффициентами полинома знаменателя. Следовательно, задача заключается в определении таких

значений коэффициентов k_3^y и $k_3^{\omega_x}$, которые бы обеспечили совпадение коэффициентов полинома знаменателя с некоторым стандартным (оптимальным) полиномом.

Исходными данными для расчёта коэффициентов системы второго порядка при отсутствии нулей в передаточной функции являются:

$\Delta\bar{\gamma} = 0...0,05$; $\xi_\gamma = 1...0,707$, которым соответствует значение времени регулирования $t_{РЕГ} = (4,8...3,5)\Omega_{\gamma\bar{\gamma}}$.

В соответствии с требованиями к качеству переходного процесса необходимо задаться видом переходного процесса (величиной $\Delta\bar{\gamma}$ и временем регулирования). По $t_{РЕГ}$ определяется значение $\Omega_{\gamma\bar{\gamma}}$. По $\Omega_{\gamma\bar{\gamma}}$ и ξ_γ определяется стандартный (эталонный) полином. Завершается процедура расчёта определением искомых значений передаточных чисел, путём решения системы уравнений, полученных из условий равенства соответствующих коэффициентов стандартного и характеристического полиномов.

К управляемому движению крена предъявляют, как правило, следующие требования: $\Delta\bar{\gamma} < 0,05$; $t_{РЕГ} = 1...2c$.

В качестве примера проведём расчёт передаточных чисел автопилота из условий обеспечения апериодического переходного процесса ($\xi_\gamma=1$) и

$t_{РЕГ} = 1,2c$. В этом случае $\Omega_{\gamma\bar{\gamma}} = \frac{4,8}{t_{РЕГ}}$, и из равенства коэффициентов эталонного полинома с коэффициентами полинома знаменателя передаточной функции

$$\Delta_\gamma(p) = p^2 + 2\frac{4,8}{t_{РЕГ}}p + \left(\frac{4,8}{t_{РЕГ}}\right)^2 = p^2 + 2n_\gamma p + \Omega_\gamma^2$$

получаем уравнения, связывающие динамические свойства контура управления с коэффициентами эталонного полинома

$$2n_\gamma = -\bar{M}_x^{\omega_x} - \bar{M}_x^{\delta\omega} k_3^{\omega_x} = \frac{9,6}{t_{РЕГ}}; \quad \Omega_\gamma^2 = -\bar{M}_x^{\delta\omega} k_3^y = \frac{23,04}{t_{РЕГ}^2}.$$

Из решения этих уравнений получаем выражения для расчётных значений передаточных чисел автопилота

$$k_3^y = -\frac{23,04}{\bar{M}_x^{\delta\omega} t_{РЕГ}^2}; \quad k_3^{\omega_x} = \frac{-\bar{M}_x^{\omega_x} t_{РЕГ} - 9,6}{\bar{M}_x^{\delta\omega} t_{РЕГ}}. \quad (4.19)$$

Анализ выражений (4.19) позволяет сделать следующие выводы:

- для обеспечения заданного качества переходных процессов передаточные числа необходимо регулировать при изменении режимов полёта, что связано с изменением аэродинамических производных $M_x^{\omega_x}$ и $M_x^{\delta\omega}$;

- -чем выше эффективность элеронов, тем меньшая величина передаточных чисел соответствует одному и тому же выбранному эталонному переходному процессу.

Работа автопилота (САУ) в режиме управления креном

Из функциональной схемы (рис. 4.5) и закона управления следует, что для управления креном САУ использует сигналы двух измерителей: датчик угловой скорости (ДУС) и гировертикаль (ГВ).

Гировертикаль измеряет текущий крен γ и выдаёт в суммирующее устройство пропорциональный ему электрический сигнал. В сумматоре механизм согласования непрерывно отслеживает текущее значение крена и формирует заданное значение крена γ_z в зависимости от режима работы САУ: согласования, стабилизации и управления. Простейшая структурная схема механизма согласования имеет вид (рис. 4.8).

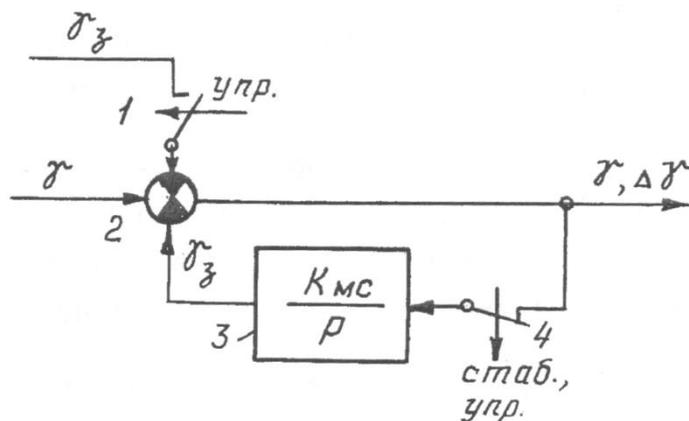


Рис. 4.8

В режиме согласования ключом 4 обратная связь замкнута и на выходе интегратора 3 формируется γ_z . При достаточно большом коэффициенте усиления k_{MC} можно полагать, что осуществляется слежение u_z за γ в темпе изменения крена. Разностный сигнал на выходе $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_z$ практически равен нулю.

В режим согласования САУ переходит непосредственно после включения и выключения других режимов красной кнопкой ОТКЛ АП на ручке управления самолётом (РУС). Так как при этом происходит обнуление сигнала $\Delta\gamma$, вследствие равенства текущего и заданного крена, то это исключает нежелательные эволюции самолёта при включении любого другого режима работы САУ.

В режиме стабилизации ключ 4 размыкается и разрывает обратную связь. Сигнал γ_3 на выходе интегратора перестаёт изменяться и соответствует углу крена к моменту включения режима стабилизации, т. е. $\gamma_3 = \gamma_{\text{вкл}}$. Механизм согласования в этом случае будет выдавать сигнал отклонения от угла крена, который имел самолёт в момент включения режима стабилизации $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_{\text{вкл}}$.

Режим управления. Управление креном осуществляется с включённым режимом «Стабилизация» поворотом рукоятки автопилота (для неманевренных самолётов) или отклонением РУС (для маневренных самолётов).

1. Пусть неманевренный самолёт с автопилотом ЖОС, в соответствии с законом управления 4.12, включённым в режим стабилизации крена, совершает горизонтальный полёт с нулевым креном. Лётчик, желая совершить разворот вправо с заданным креном $\gamma_3 > 0$, поворотом рукоятки КРЕН или РАЗВОРОТ замкнул ключ 1 (ключ 4 остаётся разомкнутым). Сигнал заданного крена γ_3 , снимаемый с датчика, связанного с рукояткой, подаётся на сумматор 2 блока согласования через ключ 1 или непосредственно на вход суммирующего устройства СУ (рис. 4.5).

Далее этот сигнал поступает через усилитель сервопривода на рулевой агрегат, вызывая перемещение его штока и отклонение элеронов до тех пор, пока сигнал обратной связи x_{oc} в сервоприводе не скомпенсирует на входе в усилитель сигнал заданного крена γ_3 , т. е. элероны отклонятся на угол

$\delta_{\text{Э}0} = -k_{\text{Э}}^{\gamma} \gamma_3 < 0$ (рис. 4.9,а). Так как рулевой агрегат обладает большим быстрым действием, то можно считать, что элероны на этот угол $\delta_{\text{Э}0}$ отклоняются мгновенно.

Отклонённые элероны вызовут увеличение скорости крена $\omega_x > 0$ и крена $\gamma > 0$. Сигналы $k_{\text{Э}}^{\gamma} \gamma > 0$ с гировертикали и $k_{\text{Э}}^{\omega_x} \omega_x > 0$ с датчика угловой скорости направлены против сигнала заданного крена, а поэтому через рулевой агрегат уменьшают угол отклонения элеронов, т.е. возвращают их к нейтральному положению. Поэтому управляющий момент $M_x^{\delta_{\text{Э}}} \delta_{\text{Э}} > 0$ будет уменьшаться, и когда он станет равным демпфирующему $M_x^{\omega_x} \omega_x$, угловая скорость крена будет максимальной ($\omega_x = \omega_{x \text{max}}$). В дальнейшем она уменьшается, так как уменьшается управляющий момент.

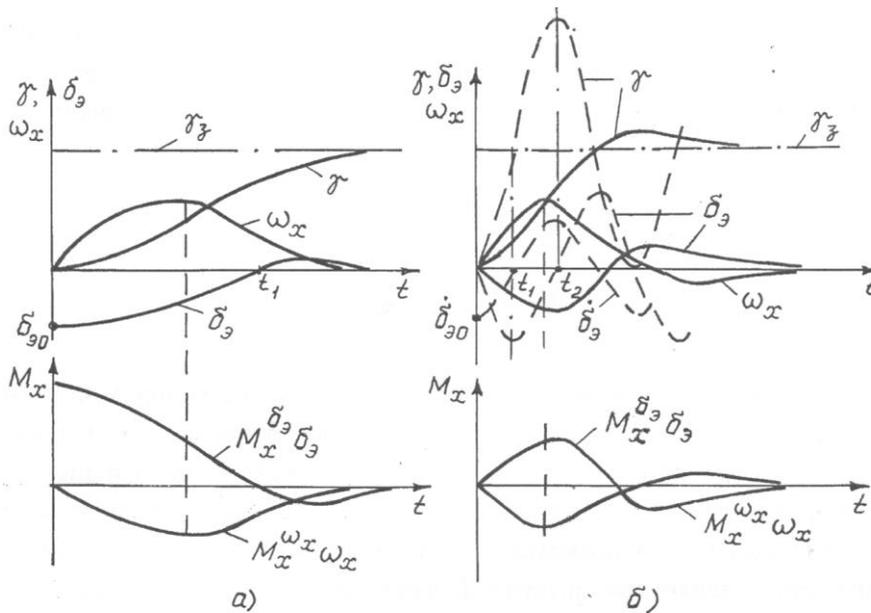


Рис. 4.9

С момента времени t_1 , когда $k_3^{\omega_x} \omega_x > |k_3^\gamma (\gamma - \gamma_3)|$, элероны отклонятся в одну сторону, создавая дополнительный демпфирующий момент и обеспечивая гашение угловой скорости при выходе самолёта на заданный крен. Установившееся значение крена

$$\gamma_{уст} = \Phi_{\frac{\gamma}{\gamma_3}} (p=0) \gamma_3 = -\frac{k_3^\gamma \bar{M}_x^{\delta_3}}{\Omega_\gamma^2} \gamma_3 = \gamma_3.$$

Таким образом, при задании лётчиком или траекторным контуром САУ сигнала заданного крена САУ с ЖОС, в соответствии с законом управления (4.12), при отсутствии внешних возмущений вводит самолёт в крен, равный заданному, и в дальнейшем стабилизирует его.

Рассмотрим процесс автоматического управления креном самолёта с САУ со скоростной обратной связью, работающей по закону управления (4.13). При скоростной обратной связи в качестве датчика обратной связи обычно используют тахогенератор, который выдает электрический сигнал обратной связи, пропорциональный не углу (как при жёсткой обратной связи), а скорости отклонения элеронов $\dot{\delta}_3$.

В этом случае таким же электрическим сигналом от датчика рукоятки «Разворот» элероны начнут отклоняться от нейтрального положения со скоростью $\dot{\delta}_3 = -k_3^\gamma \gamma_3$ и самолёт начнет увеличивать правый крен $\gamma > 0$ (рис. 4.9, б). При наличии только одного первого сигнала в законе (4.13) по мере приближения к заданному крену рассогласование $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_3 > 0$ уменьшается, поэтому САУ, работающая по закону (4.13), уменьшает скорость отклонения элеронов и при

Управление техническими системами

$\gamma = \gamma_3$ (момент времени t_1) $\delta_3^{\&} = 0$, но элероны останутся отклонёнными $\delta_3 < 0$. Поэтому крен продолжает расти ($\gamma > \gamma_3$), знак сигнала $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_3$ изменяется ($\Delta\gamma > 0$), и САУ, работающая по закону

(4.13) со скоростью $\delta_3^{\&} = k_3^{\gamma} \Delta\gamma > 0$, уменьшает отклонение элеронов, т.е. возвращает их к нейтральному положению с возрастающей скоростью по мере увеличения крена. В момент времени t_2 , когда элероны пройдут нейтральное положение, правый крен $\gamma > 0$ будет максимальным, будет максимальной и скорость отклонения элеронов $\delta_{3\max}^{\&} > 0$. В дальнейшем отклонение элеронов в другом направлении ($\delta_3 > 0$) вызывает уменьшение крена, т.е. возвращение самолёта к заданному крену, вследствие чего САУ по закону (4.13) уменьшает скорость отклонения элеронов $\delta_3^{\&} > 0$.

При возвращении на заданный крен $\gamma = \gamma_3$, $\delta_3^{\&} = 0$. Но так как элероны отклонились за это время на угол $\delta_3 > 0$, то крен самолёта продолжает уменьшаться. В результате процесс выхода самолёта на заданный крен был бы колебательным незатухающим, как показано штриховыми линиями на рис.4.9,б.

При наличии сигнала $k_3^{\omega_x} \omega_x$ в законе (4.13) процесс выхода самолёта на заданный крен будет колебательным, но затухающим, так как за счёт сигнала $k_3^{\omega_x} \omega_x > 0$, направленного против сигнала $k_3^{\gamma} \Delta\gamma < 0$, остановка элеронов ($\delta_3^{\&} = 0$) и возвращение их к нейтральному положению ($\delta_3^{\&} > 0$) начнутся еще до подхода самолёта к заданному крену (когда $|k_3^{\omega_x} \omega_x| > |k_3^{\gamma} (\gamma - \gamma_3)|$). Затуханию колебаний способствует и собственный демпфирующий момент крена $M_x^{\omega_x} \omega_x$.

Присутствие в законе (4.13) третьего сигнала $k_x^{\&} \&$, пропорционального угловому ускорению $\& = p\omega_x$ позволяет увеличить затухание переходного процесса (контурные линии на графиках рис. 4.9,б). Если при автоматическом управлении креном включен и демпфер крена, отклоняющий элероны по закону $\delta_{3Д} = k_3^{\omega_x} \omega_x$, то сигнал $k_3^{\&} \&$ в законе (4.13) САУ может отсутствовать, так как его функции по демпфированию колебаний выполняет демпфер крена.

Таким образом, и при скоростной (и изодромной) обратной связи САУ выводит самолёт на заданный крен и стабилизирует его.

2. Для маневренных самолётов. Вывод самолёта на заданный крен осуществляет лётчик отклонением ручки управления. При приложении усилия к ручке или обжатию на ней специальной гашетки САУ, по сигналам встроенных микровыключателей замыкается ключ 4 (ключ 1 разомкнут), и механизм согласования переходит в режим согласования ($\Delta\gamma = 0$), т.е. в отслеживание текущего крена. Самолёт изменяет крен по команде лётчика. После выхода самолёта на новое заданное значение крена лётчик возвращает ручку и элероны в исходное балансировочное положение. Освобождённые от усилий ручка управления или гашетка (и микровыключатели) размыканием ключа 4 вновь включают режим стабилизации, но уже этого нового, заданного лётчиком крена.

3. Управление креном по положению ручки. Оно впервые было применено на самолёте МиГ-21 в режиме АП ПРИВЕДЕНИЕ К ГОРИЗОНТУ.

В этом режиме даже при отклонении ручки управления не замыкается ключ 4. Поэтому происходит суммарное отклонение элеронов, исходящее от лётчика и автопилота по закону:

$$\delta_{\text{Э}} = k_{\text{Э}} x_{\text{Э}} + \left(k_{\text{Э}}^{\gamma} + k_{\text{Э}}^{\omega_x} p \right) \gamma. \quad (4.20)$$

Лётчик отклоняет ручку управления и удерживает её отклонённой, чем вызывает отклонение элеронов на угол $\delta_{\text{Э,л}} = k_{\text{Э}} x_{\text{Э}}$. Автопилот при разомкнутом ключе 4 сигналами с гировертикали $k_{\text{Э}}^{\gamma} \gamma$ и датчика угловой скорости

$k_{\text{Э}}^{\omega_x} \omega_x$ возвращает элероны в нейтральное положение при отклонённой ручке по достижении заданного крена γ_3 . Из (4.20), при $\delta_{\text{Э,уст}} = 0$ получим

$$\gamma_{\text{уст}} = \gamma_3 = -\frac{k_{\text{Э}}}{k_{\text{Э}}^{\gamma}} x_{\text{Э}}.$$

Режим управления креном (тангажом) по положению ручки включается при дозаправке топливом в полёте.

Аналогичным образом работает механизм согласования и в канале тангажа САУ.

Особенности управления креном на больших углах атаки

Выше при рассмотрении автоматического управления креном мы предполагали, что самолёт совершает изолированное движение крена. Однако при полёте на больших углах атаки, когда продольная ось самолёта образует значительный угол с вектором скорости, вращение самолёта, вызванное откло-

Управление техническими системами

нением элеронов, сопровождается возникновением скольжения. При положительных углах атаки скольжение вызывает появление момента крена, препятствующего кренению. У самолётов со стреловидными и треугольными крыльями, обладающих излишне большой поперечной устойчивостью на больших углах атаки, появляющиеся при скольжении моменты крена существенно изменяют динамику бокового движения самолёта. Поэтому для более точного решения задачи необходимо учесть влияние кинематической связи углов атаки и скольжения на движение крена.

Для большей наглядности влияния скольжения, появляющегося при вращении, на изменение крена в первом приближении будем предполагать, что при энергичном кренении самолёт не успевает устранять возникшее скольжение $\beta \neq 0$.

Можно показать, что в рассматриваемом случае передаточная функция замкнутого контура управления с автопилотом, работающим по закону управления (4.12), принимает вид:

$$\Phi_{\frac{\gamma}{\gamma_3}}(p) = -\frac{k_{\delta}^{\gamma} \bar{M}_x^{\delta \delta} (p - \bar{z}^{\beta})}{p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + A_0}, \quad (4.21)$$

где коэффициенты A_1, A_2, A_0 определяются выражениями:

$$\begin{aligned} A_2 &= -\bar{z}^{\beta} - \bar{M}_x^{\delta \delta} k_{\delta}^{\omega_x} - \bar{M}_x^{\omega_x}; \\ A_1 &= \bar{z}^{\beta} \bar{M}_x^{\omega_x} - \bar{M}_x^{\beta} \alpha - \bar{M}_x^{\delta \delta} (k_{\delta}^{\gamma} - \bar{z}^{\beta} k_{\delta}^{\omega_x}); \\ A_0 &= -\frac{g n_y}{V} \bar{M}_x^{\beta} \cos \vartheta + \bar{M}_x^{\delta \delta} \bar{z}^{\beta} k_{\delta}^{\omega_x}. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Если при рассмотрении автоматического управления изолированным движением крена мы установили, что автопилот с жёсткой обратной связью отслеживает управляющий сигнал без статической ошибки, то из анализа передаточной функции (4.21) следует, что при автоматическом управлении с автопилотом, воздействующим только на элероны, всегда появляется статическая ошибка. В самом деле, подставляя в (4.21) $p = 0$, получим:

$$\gamma_{уст} = \frac{k_{\delta}^{\gamma} \bar{M}_x^{\delta \delta} \bar{z}^{\beta}}{-\frac{g n_y}{V} \bar{M}_x^{\beta} \cos \vartheta + k_{\delta}^{\gamma} \bar{M}_x^{\delta \delta} \bar{z}^{\beta}} \gamma_3 < \gamma_3.$$

Управление техническими системами

Поэтому в серийных САУ на больших углах атаки для управления креном одновременно отклоняются не только элероны, но и рули направления, например, по закону:

$$\delta_H = k_H^{\omega_y} \frac{T p}{T p + 1} \omega_y + k_H^\beta \beta + k_H^\gamma \gamma.$$

Здесь первый сигнал обеспечивает демпфирование колебаний рыскания, а второй и третий сигналы - устранение скольжения или создание благоприятного скольжения. Так, при кренении на правое крыло ($\gamma > 0$) и появлении на нём скольжения ($\beta > 0$), в соответствии с данным законом, руль направления также отклонится вправо ($\delta_H > 0$) и создаст момент рыскания на устранение этого скольжения.

Реакция самолёта с креновым автопилотом на возмущающий момент крена

Пусть самолёт летел с заданным нулевым креном $\gamma = \gamma_3 = 0$ и, вследствие какого-либо возмущения (например, несимметричного сброса груза), появился возмущающий момент крена M_{XB} . Выразим M_{XB} через эквивалентное отклонение элеронов $\delta_{ЭВ}$ из условия: $M_{XB} = M_x^{\delta_3} \delta_{ЭВ}$. Примем

$M_{XB} = const > 0$. Под действием этого момента самолёт начнет увеличивать правый крен ($\gamma > 0$) и скорость крена $\omega_x > 0$.

САУ с жёсткой обратной связью, реагируя на увеличение крена от заданного, по закону (4.12) будет увеличивать угол отклонения элеронов $\delta_3 > 0$, создавая этим возрастающий противодействующий момент $M_x^{\delta_3} \delta_3 < 0$ (рис. 4.10 а).

Управление техническими системами

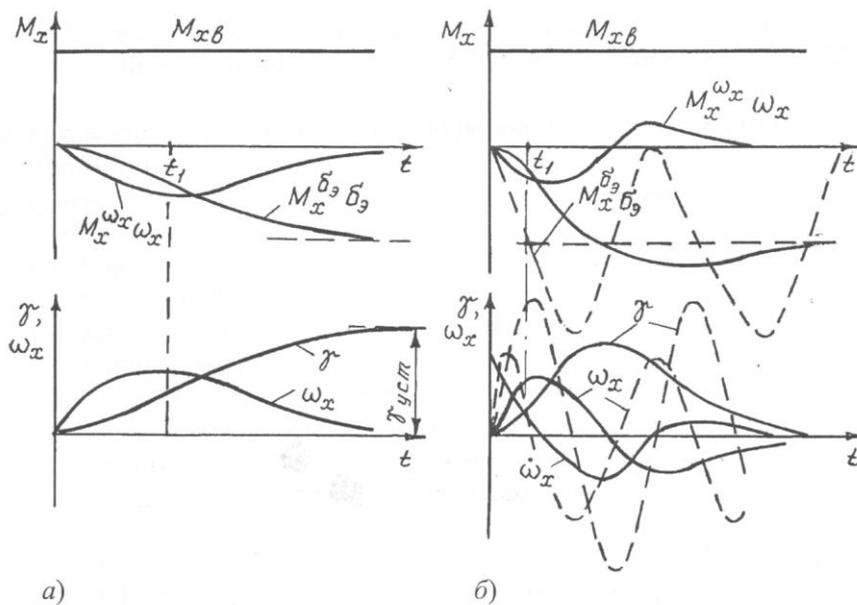


Рис. 4.10

Его росту способствуют также демпфирующий момент $M_x^{\omega_x} \omega_x$ и момент крена от возникшего скольжения на опущенное крыло. В момент времени t_1 сумма аэродинамических моментов становится равной возмущающему, поэтому скорость крена будет максимальной. В дальнейшем вращение самолета будет происходить с торможением, так как суммарный противодействующий момент становится больше возмущающего, и в установившемся процессе, когда $\omega_x = 0$, а $M_{XB} + M_x^{\delta_3} \delta_{3уст} = M_{XB} + M_x^{\delta_3} k_{\delta_3}^{\gamma} \gamma_{уст} = 0$, дальнейшее изменение крена прекратится.

Установившееся значение крена получим из передаточной функции изменения крена при воздействии возмущающего момента, вызванного эквивалентным отклонением элеронов на величину δ_{δ_3} . Для этого воспользуемся структурной схемой, представленной на рис. 4.11, для САУ с ЖОС, работающей по закону управления (4.12) и при $\gamma_3 = 0$.

Тогда передаточная функция замкнутого контура управления будет иметь выражение:

$$\Phi_{\frac{\gamma}{\delta_{\delta_3}}}(p) = \frac{W_{\frac{\gamma}{\delta_3}}(p)}{1 - (k_{\delta_3}^{\gamma} + k_{\delta_3}^{\omega_x} p) W_{\frac{\gamma}{\delta_3}}(p)} = \frac{\bar{M}_x^{\delta_3}}{p^2 + 2n_{\gamma} p + \Omega_{\gamma}^2}$$

где характеристики n_γ и Ω_γ определяются выражениями (4.18).
 Установившееся значение крена в рассмотренном случае будет:

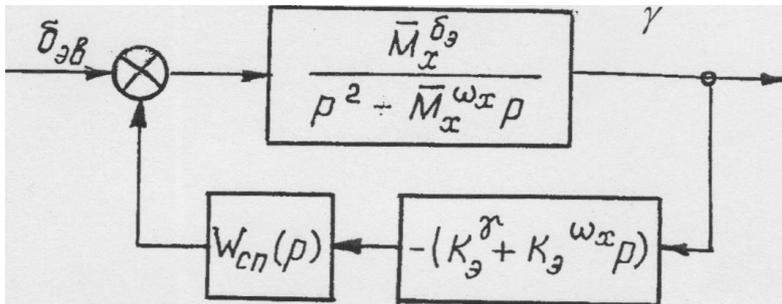
$$\gamma_{уст} = \Phi \frac{\gamma}{\delta_{ЭВ}} (p=0) \delta_{ЭВ} = \frac{\bar{M}_x^{\delta_\Delta}}{\Omega_\gamma^2} \delta_{ЭВ} = -\frac{\delta_{ЭВ}}{k_\Delta^\gamma} = -\frac{M_{XB}}{k_\Delta^\gamma m_x^{\delta_\Delta} qSl}$$


Рис. 4.11

Таким образом, при появлении возмущающего момента крена самолёт, имеющий автопилот с жёсткой обратной связью и действующий по закону (4.12), будет совершать полёт с отклонёнными элеронами на угол $\delta_\Delta = \delta_{ЭВ}$ и отклонением от заданного крена на величину $\gamma_{уст}$. При невмешательстве лётчика в управление самолёт из горизонтального полёта переходит в нисходящую спираль с креном $\gamma_{уст}$. Величина статической ошибки $\gamma_{уст}$ будет тем больше, чем больше возмущающий момент, меньше скоростной напор (приборная скорость) и передаточное число k_Δ^γ .

Для устранения статической ошибки по крену можно применить автопилот со скоростной или изодромной обратной связью в соответствии с законами управления (4.13) или (4.14).

При скоростной обратной связи и наличии только первого сигнала в законе (4.13) САУ также при увеличении крена возмущающим моментом M_{XB} будет увеличивать отклонение элеронов $\delta_\Delta > 0$ с возрастающей скоростью $\dot{\delta}_\Delta = k_\Delta^\gamma \gamma > 0$ до момента времени $t = t_1$, пока противодействующий момент от элеронов не уравнивает возмущающий момент (изменение параметров движения для этого случая представлено на рис. 4.10, б штриховыми линиями). Когда вращение прекратится ($\omega_x = 0$) правый крен станет максимальным, а элероны будут продолжать отклоняться в том же направлении с максимальной скоростью, еще более увеличивая восстанавливающий управляющий момент $M_x^{\delta_\Delta} \delta_\Delta < 0$. Правый крен станет уменьшаться, и САУ по

Управление техническими системами

закону (4.13) начнет уменьшать скорость отклонения элеронов. При возвращении самолёта на заданный крен $\gamma = \gamma_3 = 0$ дальнейшее отклонение элеронов прекращается ($\delta_{\dot{\gamma}} = 0$, а $\delta_{\gamma} = \delta_{\text{эмакс}} > 0$). Так как момент от элеронов

$M_x^{\delta_{\gamma}} \delta_{\text{эмакс}}$ значительно больше возмущающего, то самолёт вводится в левый крен ($\gamma < 0$). При левом крене САУ обеспечивает $\delta_{\dot{\gamma}} = k_{\dot{\gamma}}^{\gamma} \gamma < 0$, то есть уменьшает угол отклонения элеронов $\delta_{\gamma} > 0$, а следовательно, и момент $M_x^{\delta_{\gamma}} \delta_{\gamma} < 0$. Когда $M_{XB} + M_x^{\delta_{\gamma}} \delta_{\gamma} = 0$, левый крен будет максимальный, и САУ обеспечивает $\delta_{\dot{\gamma}} = \delta_{\text{эмакс}} < 0$. В дальнейшем момент от элеронов становится меньше возмущающего, что вызывает уменьшение левого крена, т.е. возвращение самолёта к заданному нулевому крену. В момент пересечения нулевого крена $\gamma = \gamma_3 = 0$, $\delta_{\dot{\gamma}} = 0$, элероны вернуться в нейтральное положение ($\delta_{\gamma} = 0$), а возмущающим моментом M_{XB} самолёт вновь будет вводиться в правый крен - происходит повторение процесса. При этом, как видно на рис.4.10,б, колебание элеронов относительно среднего значения $\delta_{\gamma} = \delta_{\text{эВ}} = M_{XB} / M_x^{\delta_{\gamma}}$ вызывает появление незатухающих колебаний самолёта относительно заданного крена $\gamma_3 = 0$.

Наличие второго и третьего сигналов в законе (4.13) позволяет САУ вернуть самолёт на заданный крен с небольшими колебаниями или без них (контурные линии на рис.4.10,б), так как: во-первых, при наличии этих сигналов максимальный правый крен будет меньше вследствие того, что элероны будут отклоняться САУ с большей скоростью, и равновесие моментов наступит раньше; во-вторых, при уменьшении правого крена ($\gamma > 0$, $\omega_x < 0$),

начиная с некоторого его значения, положительный сигнал $k_{\dot{\gamma}}^{\gamma} \gamma$ становится меньше отрицательного сигнала $k_{\dot{\gamma}}^{\omega_x} \omega_x$, и САУ по закону (4.13) со скоростью $\delta_{\dot{\gamma}} < 0$ уменьшает отклонение элеронов, обеспечивая при $\gamma = \gamma_3 = 0$, $\delta_{\gamma} = \delta_{\text{эВ}} > 0$ и $\delta_{\dot{\gamma}} = 0$.

Таким образом, САУ со скоростной обратной связью и работающая по закону управления (4.13) при действии постоянного возмущающего момента крена

M_{XB} обеспечивает полёт самолёта с заданным креном без статической ошибки и элеронами, отклонёнными на угол $\delta_\gamma = \delta_{\gamma B}$ для парирования этого момента. Однако самолёт отклонится от прежнего курса вследствие того, что некоторое время до возвращения на заданный крен (например, $\gamma_3 = 0$) находился в одностороннем крене от действия возмущающего момента.

При действии возмущающего момента и невмешательстве лётчика в управление характер изменения траектории движения ЛА относительно некоторой линии заданного пути (ЛЗП) с автопилотами с ЖОС, СОС (и ИОС) показаны соответственно на рис. 4.12,а и рис 4.12,б. До действия возмущающего момента M_{XB} ЛА выполнял прямолинейный горизонтальный полёт с нулевым креном.

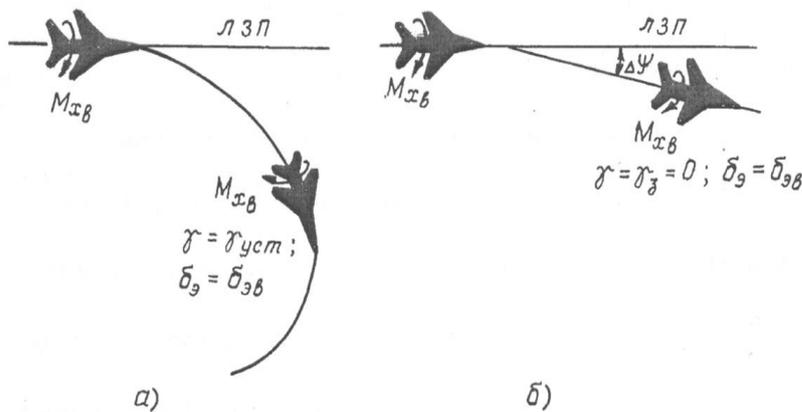


Рис. 4.12

Для САУ с изодромной обратной связью и работающей в соответствии с законом (4.14) передаточная функция сервопривода может быть записана в виде:

$$W_{СП}(p) = \frac{T_u p + 1}{T_u p}$$

Подстановка данной передаточной функции сервопривода в структурную схему, представленную на рис. 4.7,а, позволяет получить следующую передаточную функцию изменения крена при воздействии возмущающего момента:

$$\Phi_{\frac{\gamma}{\delta_{\gamma B}}}(p) = \frac{\overline{M_x}^{\delta_{\gamma}} p}{p^3 + \left(-\overline{M_x}^{\omega_x} - k_{\gamma}^{\omega_x} \overline{M_x}^{\delta_{\gamma}} \right) p^2 - \overline{M_x}^{\delta_{\gamma}} \left(k_{\gamma}^{\gamma} + \frac{k_{\gamma}^{\omega_x}}{T_u} \right) p - \overline{M_x}^{\delta_{\gamma}} \frac{k_{\gamma}^{\omega_x}}{T_u}}$$

из которой видно, что при $p = 0$ $\gamma_{уст} = 0$.

Таким образом, автопилот с изодромной (и скоростной) обратной связью вводит астатизм в выдерживании угла крена на постоянные внешние возмущения.

Из сравнения законов (4.13) и (4.14) с (4.12) можно прийти к выводу, что автопилоты со скоростной или изодромной обратной связью отличаются от

Управление техническими системами

автопилота с жёсткой обратной связью, работающего по закону управления (4.12), наличием дополнительного слагаемого, пропорционального интегралу от сигнала рассогласования ($\gamma - \gamma_3$). Отсюда можно прийти к выводу,

что тот же эффект, который даёт автопилот с изодромной обратной связью можно получить и с автопилотом с жёсткой обратной связью, при наличии в

законе управления интегральной составляющей $\frac{k_{\mathcal{E}}^I}{p}(\gamma - \gamma_3)$ или $k_{\mathcal{E}}^I \int (\gamma - \gamma_3) dt$,

т.е.

$$\delta_3 = k_{\mathcal{E}}^{\gamma}(\gamma - \gamma_3) + k_{\mathcal{E}}^{\omega_x} \omega_x + \frac{k_{\mathcal{E}}^I}{p}(\gamma - \gamma_3). \quad (4.23)$$

ЛЕКЦИЯ №11

По теме: САУ Автоматическое управление тангажом

1. Динамические свойства системы "САУ-ЛА"

Если управление креном связано с вращением самолёта вокруг продольной оси, то управление тангажом — с вращением самолёта вокруг поперечной оси и поворотом вектора скорости. При этом оба эти вращения связаны через угол атаки. Угол атаки определяет величину и знак как продольного момента, так и подъёмной силы.

Автоматическое управление тангажом осуществляет внутренний контур продольного канала САУ отклонением стабилизатора от балансировочного положения по одному из следующих законов:

при жёсткой обратной связи

$$\delta_B = k_B^{\vartheta}(\vartheta - \vartheta_3) + k_B^{\omega_z} \omega_z; \quad (4.24)$$

при скоростной обратной связи

$$\dot{\delta}_B = k_B^{\vartheta}(\vartheta - \vartheta_3) + k_B^{\omega_z} \omega_z + k_B^{\dot{\omega}_z} \dot{\omega}_z; \quad (4.25)$$

при изодромной обратной связи

$$\delta_B = \frac{T_u p + 1}{T_u p} (k_B^{\vartheta}(\vartheta - \vartheta_3) + k_B^{\omega_z} \omega_z). \quad (4.26)$$

Из этих законов видно, что для управления тангажом, как и креном, необходимы: гировертикаль (ГВ) для выдачи сигнала текущего тангажа, датчик угловой скорости (ДУС) тангажа, суммирующее устройство (СУ), сервопривод (СП)

Управление техническими системами

с соответствующим видом обратной связи, устройство формирования заданного тангажа и орган управления (руль высоты или стабилизатор). Поэтому функциональная схема контура управления тангажом имеет вид, аналогичный схеме контура управления креном, представленной на рис. 4.5.

Как и в канале крена, сигнал заданного тангажа может формироваться как лётчиком, так и траекторным контуром продольного канала САУ, например, как показано на структурной схеме (рис. 4.13). При отключении траекторного контура получим структурную схему внутреннего контура «автопилот - самолёт» для управления тангажом (рис. 4.14,а).

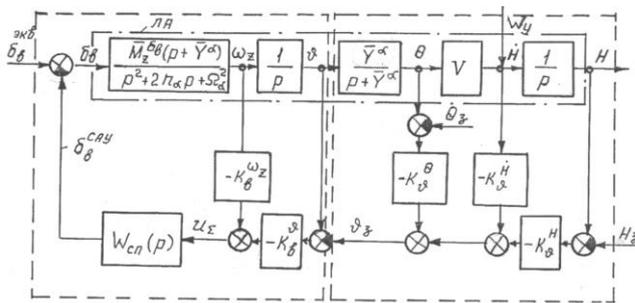
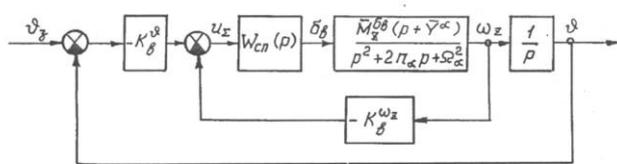
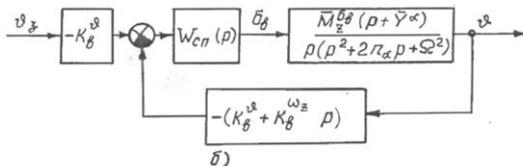


Рис. 4.13



а)



б)

Рис. 4.14

Динамические свойства системы «автопилот - самолёт» рассмотрим для автопилота с жёсткой обратной связью и работающего по закону управления (4.24).

Поскольку рассматривается изолированное продольное движение (при крене $\gamma = 0$), то $\mathcal{G} = \omega_z$. Это позволяет закон управления (4.24) представить в виде $\delta_B = -k_B^\theta \vartheta + (k_B^\theta + k_B^{\omega_z} p) \vartheta$ и соответственно структурную схему, как показано на рис. 4.14,б.

На схеме собственные динамические свойства самолёта также получены из дифференциальных уравнений короткопериодического продольного движения в

Управление техническими системами

приращениях относительно режима горизонтального полёта при отсутствии внешних воздействий ($\bar{F}_{yB}, \bar{M}_{zB}, \alpha_B$):

$$\begin{cases} \dot{\alpha} = p\alpha = \omega_z - \bar{Y}^{\alpha}\alpha + \bar{F}_{yB}, \\ \dot{\omega}_z = p^2\vartheta = \bar{M}_z^{\omega_z}\omega_z + \bar{M}_z^{\alpha}\alpha + \bar{M}_z^{\dot{\alpha}}p\alpha + \bar{M}_z^{\delta_B}\delta_B + \bar{M}_z^{\dot{\vartheta}}; \\ \dot{\vartheta} = p\vartheta = \omega_z; \\ \Theta = \vartheta - \alpha + \alpha_B \end{cases} \quad (4.27)$$

Передаточную функцию замкнутого контура «САУ - самолёт», показывающую изменение тангажа при ступенчатом воздействии ϑ_3 можно получить или непосредственно из структурной схемы (рис. 4.14,б), или путём алгебраических преобразований уравнений (4.27), добавив к ним отклонение

руля автопилотом $\delta_B = -k_B^{\vartheta}\vartheta_3 + (k_B^{\vartheta} + k_B^{\omega_z}p)\vartheta$.

В этом случае поступают следующим образом (при $\bar{F}_{yB} = \bar{M}_{zB} = 0$):

- определяют α из первого уравнения;
- во второе уравнение подставляют α , ω_z из третьего уравнения и δ_B из закона управления автопилота;
- решают полученное уравнение относительно ϑ / ϑ_3 - искомой передаточной функции.

В результате искомая передаточная функция будет:

$$\Phi_{\frac{\vartheta}{\vartheta_3}}(p) = -\frac{k_B^{\vartheta}\bar{M}_z^{\delta_B}(p + \bar{Y}^{\alpha})}{p^3 + a_2p^2 + a_1p + a_0}, \quad (4.28)$$

где

$$\begin{aligned} a_2 &= 2n_{\alpha} - k_B^{\omega_z}\bar{M}_z^{\delta_B}; \quad 2n_{\alpha} = -\bar{M}_z^{\omega_z} - \bar{M}_z^{\dot{\alpha}} + \bar{Y}^{\alpha}; \\ a_1 &= \Omega_{\alpha}^2 - \bar{M}_z^{\delta_B}\bar{Y}^{\alpha}k_B^{\omega_z} - \bar{M}_z^{\delta_B}k_B^{\vartheta}; \quad \Omega_{\alpha}^2 = -\bar{M}_z^{\alpha} - \bar{M}_z^{\omega_z}\bar{Y}^{\alpha}; \\ a_0 &= -\bar{M}_z^{\delta_B}\bar{Y}^{\alpha}k_B^{\vartheta}; \end{aligned} \quad (4.29)$$

$$\bar{M}_z^{\omega_z} = \frac{M_z^{\omega_z}}{I_z} = \frac{m_z^{\omega_z}qsb_a}{I_z}; \quad \bar{M}_z^{\alpha} = \frac{M_z^{\alpha}}{I_z} = \frac{m_z^{\alpha}qsb_a}{I_z};$$

$$\bar{M}_z^{\dot{\alpha}} = \frac{M_z^{\dot{\alpha}}}{I_z} = \frac{m_z^{\dot{\alpha}}qsb_a}{I_z} = \frac{b_a}{V} \frac{m_z^{\dot{\alpha}}qsb_a}{I_z}; \quad \bar{M}_z^{\delta_B} = \frac{M_z^{\delta_B}}{I_z}.$$

Полученная передаточная функция (4.28) замкнутого контура «автопилот - самолёт» характеризует изменение тангажа в малом продольном движении.

Условия устойчивости этого движения в соответствии с критерием Рауса - Гурвица определяются неравенствами

$$a_2 > 0; \quad a_1 > 0; \quad a_0 > 0; \quad a_2a_1 > a_0.$$

Управление техническими системами

Последнее неравенство после подстановки значений коэффициентов принимает следующий вид:

принимает следующий вид:

$$(2n_\alpha - \bar{M}_z^{\delta B} k_B^{\omega z}) [\Omega_\alpha^2 - \bar{M}_z^{\delta B} (\bar{Y}^\alpha k_B^{\omega z} + k_B^g)] > (-\bar{Y}^\alpha \bar{M}_z^{\delta B} k_B^g)$$

 Из анализа выражений (4.28) и (4.29) следует:
 – устойчивый самолёт ($n_\alpha > 0; \Omega_\alpha > 0$) с идеальным автопилотом всегда устойчив, так как при $k_B^g > 0$ соблюдаются условия устойчивости;

- увеличение $k_B^{\omega z}$ усиливает затухание апериодической и колебательной составляющих движения и оказывает благоприятное влияние на динамические свойства системы;
- увеличение k_B^g увеличивает частоту колебаний, но может как увеличивать, так и уменьшать затухание колебательной составляющей движения;
- выбором передаточных чисел k_B^g и $k_B^{\omega z}$ можно обеспечить заданный переходный процесс;
- в реальном автопилоте чрезмерное увеличение передаточных чисел может привести к появлению автоколебаний.

Расчёт оптимальных значений передаточных чисел $k_B^{\omega z}$ и k_B^g проведём из условий обеспечения заданных значений $t_{пер}$ и $\xi_{опт}$ использованием метода стандартных коэффициентов для передаточных функций с одним нулём.

Порядок расчёта следующий:

1. Передаточную функцию (4.28) приведём к форме Вышнеградского, но предварительно вынесем за скобки в знаменателе a_0 , а в числителе \bar{Y}^α , сократив на a_0 . В результате получим:

$$\Phi_{\delta 3}(p) = \frac{\frac{1}{\bar{Y}^\alpha} p + 1}{\frac{p^3}{a_0} + \frac{\alpha_2 p^2}{a_0} + \frac{\alpha_1 p}{a_0} + 1} = \frac{Tp_1 + 1}{p_1^3 + \frac{\alpha_2}{\Omega_0} p_1^2 + \frac{\alpha_1}{\Omega_0} p_1 + 1} = \quad (4.30)$$

$$= \frac{Tp_1 + 1}{p_1^3 + A_2 p_1^2 + A_1 p_1 + 1},$$

$T = \Omega_0 / \bar{Y}^\alpha; A_2 = \alpha_2 / \Omega_0; A_1 = \alpha_1 / \Omega_0; p_1 = p / \Omega_0; \Omega_0 = \sqrt[3]{a_0};$

где $A_2 = \frac{2n_\alpha - \bar{M}_z^{\delta B} k_B^{\omega z}}{\Omega_0}; A_1 = \frac{\Omega_\alpha^2 - \bar{M}_z^{\delta B} \bar{Y}^\alpha k_B^{\omega z} - \bar{M}_z^{\delta B} k_B^g}{\Omega_0^2}.$ (4.31)

Коэффициенты Вышнеградского A_2 и A_1 определяют закон распределения корней характеристического уравнения на комплексной плоскости, а параметр Ω_0 - модули корней, не влияя на закон распределения. Или иначе:
 A_2 и A_1 определяют характер кривой переходного процесса, а Ω_0 - его длительность.

Для автоматического управления тангажом требуется, чтобы относительный заброс тангажа не превышал 0,05, а время регулирования составляло 2..4 с. Поэтому задаёмся $t_{рег}$ и ξ .

2. Для выбора коэффициентов A_2 и A_1 используется диаграмма Вышнеградского, на которой выделяются области, соответствующие определённой форме процесса. Аperiodическому переходному процессу соответствует значение коэффициентов $A_2=3$ и $A_1=3$.

3. Из выражения $t_{рег} = 6 / \Omega_0$ определяется параметр $\Omega_0 = 6 / t_{рег}$.

4. После подстановки Ω_0 в выражения (4.31) получаем расчётные зависимости для определения передаточных чисел САУ

$$k_B^{\omega_z} = \frac{2n_\alpha - 18/t_{рег}}{\overline{M_z^{\delta_B}}}; \quad k_B^g = \frac{\Omega_\alpha^2 - \overline{M_z^{\delta_B}} \overline{Y^\alpha} k_B^{\omega_z} - 108/t_{рег}^2}{\overline{M_z^{\delta_B}}} \quad (4.32)$$

5. Производим математическое моделирование с использованием структурной схемы на рис. 4.14,б и рассчитанными значениями коэффициентов.

2. Работа САУ в режиме управления тангажом

Если управляющий сигнал задан ступенчатой функцией, то изменение параметров движения и продольных моментов, действующих на самолёт, в процессе перехода с одного тангажа на другой по закону управления (4.24) будет происходить так, как изображено на рис. 4.15. Покажем это.

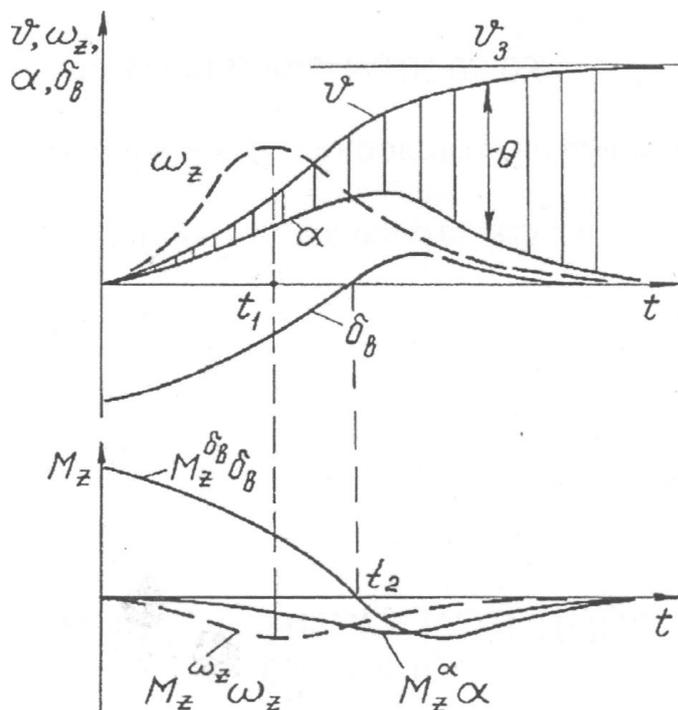


Рис. 4.15

Управление техническими системами

Пусть лётчик, желая перевести самолёт на новое большее значение тангажа $\vartheta_3 > \vartheta$, подал на вход САУ ступенчатый сигнал x_{ϑ_3} , пропорциональный ϑ_3 . В соответствии с законом (4.24), управляющий сигнал $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_3$ вызовет отклонение руля на угол $\delta_{B0} = k_B^{\vartheta} \Delta\vartheta < 0$. Появившийся продольный момент $M_z^{\delta_B} \delta_{B0} > 0$ вызовет вращение самолёта вокруг оси Oz_1 на увеличение угла атаки и тангажа.

При увеличении тангажа и угла атаки появятся демпфирующий момент $M_z^{\omega_z} \omega_z < 0$ и у устойчивого по перегрузке самолёта — восстанавливающий момент продольной статической устойчивости $M_z^{\alpha} \alpha < 0$ (направлен на уменьшение угла атаки), противоположно направленным моменту, создаваемому рулём.

Увеличение α вызовет увеличение подъёмной силы, благодаря чему будет увеличиваться и угол наклона траектории Θ . Последнее приведёт к тому, что тангаж будет изменяться быстрее угла атаки.

Увеличение ϑ приведёт к уменьшению отрицательного сигнала $k_B^{\vartheta} \Delta\vartheta$. Кроме того, вращение самолёта со скоростью $\omega_z > 0$ обусловит появление дополнительного компенсирующего сигнала $k_B^{\omega_z} \omega_z > 0$. В соответствии с законом (4.24), САУ уменьшает отклонение руля, что приводит к уменьшению управляющего момента $M_z^{\delta_B} \delta_B > 0$. В момент времени t_1 суммарный аэродинамический момент равен нулю, а скорость тангажа станет максимальной $\omega_z = \omega_{zmax}$. В дальнейшем скорость тангажа начнёт уменьшаться.

С момента времени t_2 положительный сигнал $k_B^{\omega_z} \omega_z$ становится больше по модулю сигнала $k_B^{\vartheta} \Delta\vartheta$ - стабилизатор отклонится в противоположную сторону, создавая дополнительный демпфирующий момент и обеспечивая гашение угловой скорости при выходе самолёта на установившийся тангаж, равный

$$\vartheta_{уст} = \Phi_{\vartheta} (p=0) \vartheta_3 = \frac{k_B^{\vartheta} \overline{M_z^{\delta_B}} \overline{Y}^{\alpha}}{M_z^{\delta_B} \overline{Y}^{\alpha} k_B^{\vartheta}} \vartheta_3 = \vartheta_3.$$

Управление техническими системами

При выходе на $\vartheta = \vartheta_3$ имеем $\Delta\alpha = 0$; $\omega_z = 0$; $\delta_B = 0$. Отсюда следует, что при задании нового значения тангажа $\vartheta_3 > \vartheta$ САУ выводит самолёт на этот угол при отсутствии внешних воздействий и в дальнейшем стабилизирует его. В установившемся полёте приращение угла атаки и отклонение стабилизатора равны нулю. Произошло приращение угла наклона траектории $\Delta\Theta_{уст} = \Delta\vartheta_{уст}$. В дальнейшем полёт происходит с набором высоты

$\Theta = const$ со стабилизированным значением тангажа $\vartheta = \vartheta_3$. Так как нарушается равновесие сил по касательной к траектории, то начнёт развиваться большое продольное движение.

Если в структурную схему подставить передаточную функцию самолёта не в малом, а в большом продольном движении, то установившийся тангаж по окончании движения будет

$$\vartheta_{уст} = \frac{1}{1 - \frac{M_z^\alpha a_0}{b_0 M_z^{\delta_B} k_B^g}} \vartheta_3 = \frac{\vartheta_3}{1 + \frac{a_0 m_z^\alpha}{b_0 k_B^g m_z^{\delta_B}}} < \vartheta_3$$

Следовательно, САУ с ЖОС и работающего по закону (4.24) с учётом большого продольного движения всегда отслеживает заданный тангаж с ошибкой тем большей, чем меньше передаточное число k_B^g , эффективность стабилизатора $m_z^{\delta_B}$ и больше продольная устойчивость самолёта m_z^α . Появление статической ошибки связано с сопутствующим изменением угла наклона траектории, высоты и скорости полёта.

3. Управление тангажом через контур перегрузки

Когда за управляемый параметр во внутреннем контуре САУ принимается избыточная нормальная перегрузка $n_y - n_{yA} - 1$, а не тангаж, то простейший закон управления будет иметь вид:

$$\delta_B = k_B^{n_y} (n_y - n_{y3}) + k_B^{\omega_z} \omega_z. \tag{4.33}$$

Для стабилизации (или управления) тангажа сигнал заданной перегрузки формируется по закону

$$n_{y3} = -k_{n_y}^g (\vartheta - \vartheta_3). \tag{4.34}$$

Отвечающая этим законам структурная схема замкнутого контура «САУ – самолёт» для управления тангажом приведена на рис. 4.16.

Управление техническими системами

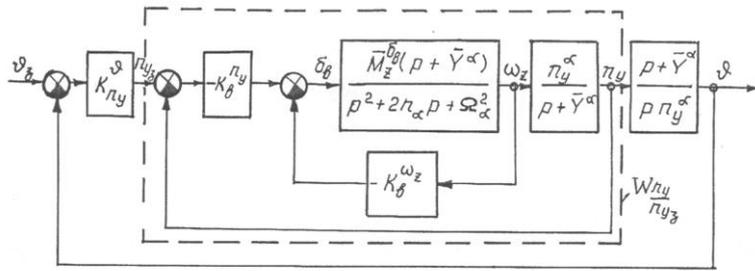


Рис. 4.16

Видно, что передаточная функция контура перегрузки $W_{ny}^{ny3}(p)$, обозначенная штриховой линией, есть передаточная функция контура «СУУ – самолёт» без автоматов статической управляемости (без k_B/C_B)

$$W_{ny}^{ny3}(p) = -\frac{k_B^{ny} \bar{M}_z^{\delta B} n_y^\alpha}{p^2 + 2n_{\alpha C} p + \Omega_{\alpha C}^2},$$

где $2n_{\alpha C} = 2n_\alpha - k_B^{\omega z} \bar{M}_z^{\delta B}$; $\Omega_{\alpha C}^2 = \Omega_\alpha^2 - k_B^{\omega z} \bar{M}_z^{\delta B} \bar{Y}^\alpha - k_B^{ny} \bar{M}_z^{\delta B} n_y^\alpha$.

Тогда структурную схему можно представить в виде (рис. 4.17):

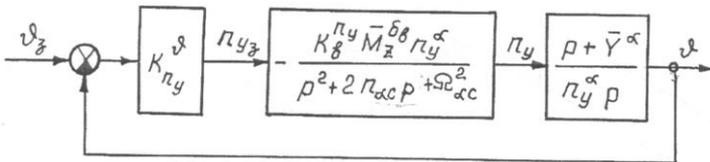


Рис. 4.17

Откуда передаточная функция контура управления тангажом будет

$$\Phi_{\vartheta_3}(p) = -\frac{k_{ny}^y k_B^{ny} \bar{M}_z^{\delta B} (p + \bar{Y}^\alpha)}{p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + A_0}, \quad (4.35)$$

где

$$A_2 = 2n_\alpha - k_B^{\omega z} \bar{M}_z^{\delta B},$$

$$A_1 = \Omega_\alpha^2 - k_B^{\omega z} \bar{M}_z^{\delta B} \bar{Y}^\alpha - k_B^{ny} \bar{M}_z^{\delta B} n_y^\alpha - k_B^{ny} k_{ny}^y \bar{M}_z^{\delta B},$$

$$A_0 = -k_B^{ny} k_{ny}^y \bar{M}_z^{\delta B} \bar{Y}^\alpha.$$

Из этих выражений видно, что управление тангажом через контур перегрузки практически не отличается от управления через контур тангажа. В обоих случаях при отсутствии возмущений $\Delta \vartheta_{уст} = \vartheta_3$, а наличие моментных воздействий вызывает появление статической ошибки по тангажу. Однако здесь имеется большая возможность для регулирования качества переходного процесса, так как коэффициент A_1 , имеет дополнительную составляющую ($-k_B^{ny} \bar{M}_z^{\delta B} n_y^\alpha$) и два регулируемых передаточных числа k_B^{ny} и k_{ny}^y . В этом случае также усиливается реакция самолёта по тангажу на порывы ветра, но ослабляется реакция по углу наклона траектории.

Необходимо заметить, что при управлении нормальной перегрузкой по закону (4.33) появляется статическая ошибка даже при отсутствии внешних воздействий. Действительно, например, для выполнения маневра с перегрузкой

$p_y = const$ необходимо держать стабилизатор отклонённым, а при данном законе при $p_y = p_{y3}$, $\delta_B = 0$. Поэтому при управлении перегрузкой применяют скоростную или изодромную обратную связь во внутреннем контуре САУ.

4. Реакция самолёта с автопилотом тангажа на внешние воздействия

Воздействие возмущающего продольного момента. Под действием возмущающего момента M_{zB} самолёт начнёт изменять тангаж. На возрастающее рассогласование $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{САУ}$, работающая по закону управления (4.24), будет увеличивать отклонение стабилизатора и создавать возрастающий противодействующий момент $M_z^{\delta_B} \delta_B$ до тех пор, пока при некотором рассогласовании $\Delta\vartheta_{уст}$ они не уравновесятся, то есть не наступит

$$M_{zB} + M_z^{\delta_B} \delta_{уст} = M_{zB} + M_z^{\delta_B} k_B^g \Delta\vartheta_{уст} = 0.$$

Откуда
$$\Delta\vartheta_{уст} = -\frac{M_{zB}}{k_B^g m_z^{\delta_B} q s b_A}.$$

С учётом большого продольного движения величина статической ошибки будет

$$\Delta\vartheta_{уст} = -\frac{M_{zB}}{k_B^g M_z^{\delta_B}} \left(\frac{1}{1 + \frac{a_0 m_z^{\alpha}}{b_0 m_z^{\delta_B} k_B^g}} \right).$$

Статическую ошибку в угле тангажа можно устранить, если применить автопилот со скоростной или изодромной обратной связью, или при ЖОС

ввести в закон (4.24) интегральный сигнал $k_B^{[g]} \left(\frac{\vartheta - \vartheta_3}{p} \right)$, что и реализуется на

наиболее ответственных режимах полёта: заходе на посадку, точном самолёт-товождении и др.

Воздействие возмущающей силы.

Пусть при сбросе груза или выгорании топлива сила тяжести самолёта уменьшилась на ΔG . Так как при этом угол атаки не изменился, то появившийся избыток подъёмной силы начнёт искривлять траекторию движения вверх (поворачивать вверх вектор скорости), увеличивая угол наклона траектории. Увеличение угла наклона траектории приведёт к уменьшению угла атаки, а соответственно и подъёмной силы. Установится такое значение угла атаки, при котором обеспечивается равенство подъёмной силы новому значению веса самолёта. Самолёт будет сбалансирован по силам. Уменьшение угла атаки у устойчивого по перегрузке самолёта приведёт к появлению момента продольной статической устойчивости, который будет стремиться повернуть продольную ось самолёта за вектором скорости на увеличение тангажа. Но при увеличении

Управление техническими системами

тангажа САУ по закону (4.24) отклонит стабилизатор, препятствуя отклонению тангажа от заданного значения. Установится такой угол отклонения стабилизатора, при котором создаваемый им момент уравнивает прирост момента продольной статической устойчивости. Самолёт будет сбалансирован по моментам. Однако стабилизатор может удерживаться в новом положении только за счет ошибки стабилизации тангажа.

При сбросе груза установившееся значение параметров определяется условиями:

- условие равенства нормальных сил

$$\Delta G \cos \Theta + C_y^\alpha q S \Delta \alpha_{уст} = 0;$$

– сумма продольных моментов равна нулю

$$m_z^\alpha \Delta \alpha + m_z^{\delta_B} \delta_{ВУСТ} = 0;$$

– отклонением руля автопилотом $\delta_{ВУСТ} = k_B^g \Delta \vartheta_{уст}$.

Из совместного решения этих уравнений получим:

$$\Delta \vartheta_{уст} = \frac{\Delta G \cos \Theta}{C_y^\alpha q S} \frac{m_z^\alpha}{k_B^g m_z^{\delta_B}}.$$

Наличие статической ошибки $\Delta \vartheta_{уст} > 0$ сопровождается изменением вы-

соты и скорости полёта и соответственно отклонением самолёта от исходного режима полёта.

Воздействие вертикальных порывов ветра.

При попадании в установившийся восходящий поток со скоростью $w_y = const$ самолёт в начальный момент времени получает приращение угла атаки на величину $a_B = w_y / V$ и отклонение вниз на такой же угол вектора воздушной скорости.

Увеличение угла атаки вызывает увеличение подъёмной силы и возникновение момента продольной устойчивости. Дополнительная подъёмная сила разворачивает вектор путевой скорости вверх, а момент продольной устойчивости стремится повернуть продольную ось вниз, навстречу вектору воздушной скорости. И то и другое ведёт к уменьшению угла атаки, то есть к повороту вектора воздушной скорости вверх. Повороту продольной оси и изменению тангажа препятствует автопилот отклонением руля. Вектор путевой скорости разворачивается вверх до тех пор, пока его вертикальная составляющая не станет равна скорости ветра w_y . Вектор воздушной скорости снова становится в горизонтальное положение. Тангаж, угол атаки и отклонение руля возвращаются к прежнему значению. Произошло приращение угла наклона

траектории на величину $\Delta\Theta = \alpha_B$. Самолёт начнёт двигаться по наклонной траектории за счёт переносной скорости воздуха.

При выходе из восходящего потока снова восстановится горизонтальный полёт, но уже на другой высоте. Следовательно, стабилизация тангажа не обеспечивает стабилизации высоты полёта.

ЛЕКЦИЯ №12

по теме: САУ движением центра масс летательных аппаратов.

1. Автоматическое управление движением ЦМ в горизонтальной плоскости

Автоматическое управление движением центра масс (ЦМ) ЛА можно отнести к более высокому иерархическому уровню системы управления, чем управление угловым положением и перегрузкой. *Управление ЦМ иначе называют траекторным управлением.*

Необходимость автоматизации траекторного движения боевых ЛА определяется следующими основными факторами:

- сложностью вывода ударного самолета в такое положение относительно цели, которое обеспечивает эффективное применение оружия;
- большой загрузкой летчика по управлению бортовым комплексом;
- зависимостью эффективности решения боевых задач от характеристик траекторного контура управления.

Управление ЦМ ЛА сводится к решению двух задач:

- 1) формированию пространственно-временной траектории полета и
- 2) стабилизации движения ЛА на этой траектории.

Траектория обычно задается в двух плоскостях: вертикальной (профиль полета) и горизонтальной (маршрут полета). При управлении в вертикальной плоскости основными управляемыми параметрами являются скорость и высота полета, в горизонтальной - боковое отклонение от линии заданного пути и путевой угол. Основной задачей, решаемой САУ на каждом этапе полета, является выдерживание заданных значений управляемых параметров.

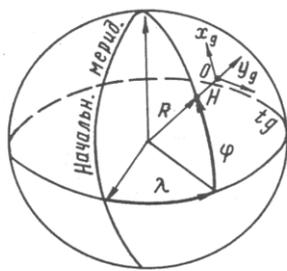
Системы координат, применяемые в навигационных комплексах

Управление техническими системами

В навигационных комплексах ЛА применяются наиболее часто сферические (географические и ортодромические) и прямоугольные системы координат.

В **географической системе координат** (рис. 5.1) положение ЛА определяется высотой H над уровнем моря и угловыми координатами: долготой λ и широтой φ . За основные плоскости в данной системе приняты плоскость географического экватора и плоскость начального меридиана.

Полюсы системы совпадают с географическими полюсами земного эллипсоида. Географическая система координат в виде меридианов и параллелей наносится на все навигационные карты и является основной для определения координат точек на картах.



Движение ЛА относительно земной поверхности характеризуется земной скоростью, составляющие которой V_{xg} , V_{yg} , V_{zg} связаны с географическими координатами следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \dot{H} &= V_{zg}; & \dot{\lambda} &= \frac{V_{xg}}{(R_3 + H) \cos \varphi}; \\ \dot{\varphi} &= \frac{V_{yg}}{(R_3 + H)}, \end{aligned} \quad (5.1)$$

Рис. 5.1

где R_3 – радиус Земли. При известных текущих значениях скоростей V_{xg} , V_{yg} , V_{zg} и начальных значениях координат H_0 , λ_0 , φ_0 текущие географические координаты определяются путем интегрирования уравнений (5.1).

Ортодромическая система координат (рис. 5.2) является также сферической системой, но с произвольным расположением полюсов.

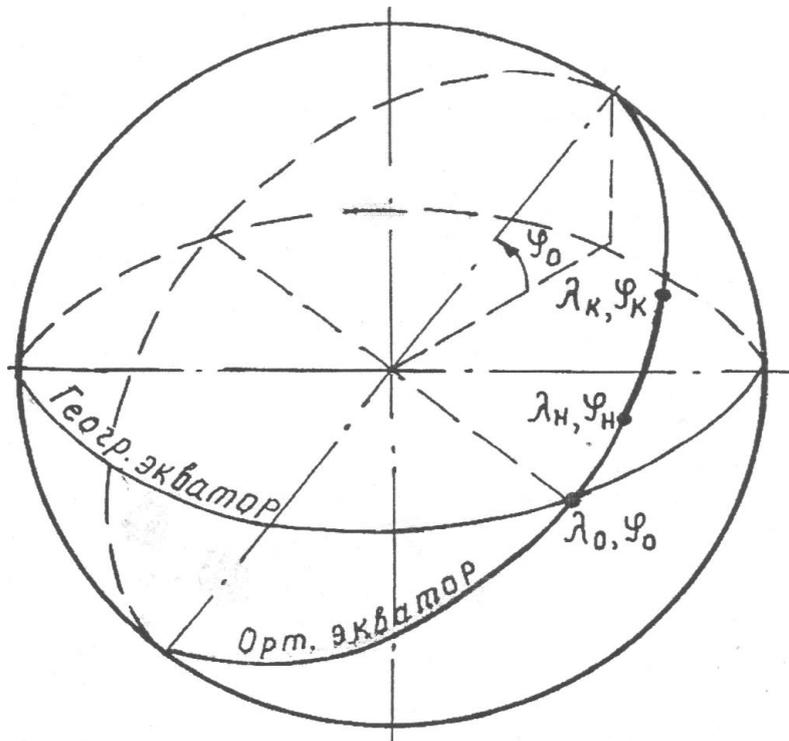


Рис. 5.2

Управление техническими системами

В данной системе за основные оси координат приняты две ортодромии (отсюда и название). Ортодромия, совмещенная с линией заданного пути (ЛЗП) или с осью маршрута, называется главной и принимается за ось x . Ось x является как бы условным экватором. Другая ортодромия, перпендикулярная главной, проводится через точку начала отсчёта координат и принимается за ось z . Данная ось представляет собой условный меридиан. Положение любой точки на поверхности Земного шара указывается двумя координатами x и z , которые обычно выражаются в километрах.

Путем выбора положения главной ортодромии можно добиться, чтобы полёт проходил с возможно меньшим отклонением от нее, т.е. при малых значениях координаты z . Это позволяет в пределах допустимых удалений от главной ортодромии (350...400 км) не учитывать сферичность Земли и упростить решение навигационных задач. Поэтому данная система является основной в навигационных устройствах. Кроме того, ортодромическая система координат наиболее удобна для выдерживания заданного направления полета с помощью гироскопических курсовых приборов.

Сферическая ортодромическая система координат однозначно определяется географическими координатами её начальной точки λ_0, φ_0 . Начальной и конечной точкам маршрута с географическими координатами λ_n, φ_n и λ_k, φ_k соответствуют ортодромические координаты $\lambda_{opt} = \lambda_{optn}, \varphi_{opt} = 0$ и

$$\lambda_{opt} = \lambda_{optk}, \varphi_{opt} = 0.$$

Текущие угловые ортодромические координаты λ_{opt} и φ_{opt} , соответствующие положению ЛА вдоль ортодромического экватора и отклонению от него вдоль ортодромического меридиана соответственно, определяются через географические координаты λ и φ по формулам

$$\lambda_{opt} = \lambda_{optk} \varphi_{opt} \lambda \varphi_0 \quad \sin \varphi_{opt} = \sin \varphi \cos \varphi_0 - \cos \varphi \sin \varphi_0 \cos(\lambda - \lambda_0);$$

$$\sin \lambda_{opt} = \cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0) \sec \varphi_{opt}.$$

где λ_0, φ_0 - географические координаты начальной точки отсчета ортодромических координат.

В полёте по известным значениям λ и φ вычисляются λ_{opt} и φ_{opt} . Тогда пройденное от точки начала отсчёта расстояние вдоль ортодромического

Управление техническими системами

экватора Δx и линейное боковое отклонение от него Δz определяются следующим образом:

$$\Delta x = (\lambda_{opt} - \lambda_{opt0}) R_3; \quad \Delta z = \varphi_{opt} R_3. \quad (5.2)$$

Зависимости (5.2) используются для управления движением ЛА. Радиус Земли R_3 принимается, как правило, равным 6371,1 км.

В том случае, если маршрут полёта представляется ломаной линией с прямолинейными отрезками между очередными пунктами маршрута, могут быть использованы частные ортодромические системы координат для каждого отрезка. Экватор такой системы проходит через начальную и конечную точки отрезка маршрута.

В произвольном положении ЛА относительно поверхности Земли для выдерживания заданных маршрута и программы движения необходимо наряду с сигналами Δx и Δz знать и ортодромический курс ψ_{opt} . Ортодромический курс определяется по замеренному магнитному курсу ψ и вычисленной азимутальной поправке Δ — углу сходимости меридианов географической и ортодромической систем координат

$$\psi_{opt} = \psi + \Delta.$$

Азимутальная поправка Δ определяется по известным значениям координат начальной точки (λ_0, φ_0) и текущим значениям величин λ и φ_{opt} по выражению:

$$\Delta = \arcsin \left[\sin \varphi_0 \sin(\lambda - \lambda_0) \sec \varphi_{opt} \right].$$

В качестве датчиков магнитного курса в курсовых системах выступают индукционные датчики, применяемые совместно с коррекционными механизмами.

Прямоугольная система координат (рис. 5.1) является плоской системой. Начало данной системы размещают, как правило, в точке текущего положения ЛА, ось OX_g направляют на север по направлению текущего меридиана, ось OY_g - вдоль радиуса сферы вверх. Ось OZ_g дополняет систему.

Небольшие сферические участки Земли практически совпадают с плоскостью, касательной к точке этого участка. Поэтому прямоугольные координаты вполне точно могут определять положение точек на земной поверхности в некоторых пределах.

Управление техническими системами

Прямоугольная система координат применяется при решении ряда боевых задач, а также для автоматизированного захода на посадку.

Исследования показывают, что на протяжении 1000 км вдоль главной ортодромии в полосе ± 600 км от нее ортодромическая система координат практически совпадает с прямоугольной (ошибка в определении места ЛА не превышает 1%).

Для программирования маршрута полёта определяются координаты опорных точек, ориентиров коррекции и радионавигационных станций. Данные координаты определяются в той системе координат, в которой воспринимает информацию программное устройство конкретного навигационного комплекса. В навигационных комплексах с БЦВМ вводятся географические координаты, которые выбираются из специальных каталогов или определяются по картам.

Методы определения координат местоположения ЛА.

Структура типового навигационного комплекса

Для определения местоположения ЛА могут быть использованы следующие методы навигации:

- 1) счисления пути,
- 2) позиционный и
- 3) обзорно-сравнительные.

Метод счисления пути основан на вычислении пройденного расстояния относительно известного начального положения ЛА. Исходной информацией для решения этой задачи служат скорость или ускорение ЛА и его курс.

Определение координат местоположения ЛА в навигационных комплексах осуществляется с использованием выражений (для ортодромической системы координат):

$$x = x_0 + \int_0^t X \cos \psi_{opt} dt = x_0 + \int_0^t W_x dt;$$

$$z_0 + \int_0^t V \sin \psi_{opt} \sec \frac{x}{R_3} dt = z_0 + \int_0^t W_z \sec \frac{x}{R_3} dt,$$

где: x_0, z_0 - ортодромические координаты начальной точки счисления пути;

W_x, W_z — составляющие путевой скорости полета;

$\sec \frac{x}{R_3}$ – поправочный множитель для пересчета длины дуги с ортодромической параллели на ортодромической широте x в длину дуги вдоль ортодромического экватора; R_3 - радиус Земли.

В зависимости от используемых датчиков информации различают несколько видов счисления пути:

- 1) доплеровский,
- 2) воздушный (аэрометрический),
- 3) инерциальный и
- 4) их комбинации.

Принцип действия *доплеровских измерителей путевой скорости и угла сноса* (ДИСС) основан на измерении частотного сдвига, возникающего в отраженном от земной поверхности сигнале при облучении ее с движущегося ЛА. Геометрическая форма многолучевой диаграммы направленности ДИСС обеспечивает измерение трёх составляющих скорости ЛА в системе координат, связанной с антенной. Для пересчета составляющих путевой скорости из антенной системы координат в горизонтальную применяются специальные вычислители, в которых учитываются углы крена и тангажа ЛА. На основе полученных значений составляющих вектора путевой скорости, за счёт её однократного интегрирования оцениваются координаты местоположения ЛА.

Достоинством навигационных систем, построенных на основе ДИСС, является независимость их работы от условий видимости, времени года и суток, высоты и скорости полёта. Однако доплеровские навигационные системы обладают недостаточной точностью контроля местоположения ЛА (ошибка составляет 1...2% от пройденного пути), ограниченной помехозащищённостью и чувствительны к виду подстилающей поверхности.

Навигационные системы, построенные на базе *системы воздушных сигналов* (СВС), обладают простотой технического исполнения и высокой надёжностью. Однако за счёт достаточно больших погрешностей измерения воздушной скорости эти системы обладают низкой точностью определения местоположения ЛА. Ошибка составляет 3.. .6% пройденного пути.

Основой для построения комплексов навигации в настоящее время стали *инерциальные навигационные системы* (ИНС). ИНС построены по принципу счисления пути методом двойного интегрирования ускорений, измеряемых в определенной системе координат с помощью акселерометров. К достоинствам

Управление техническими системами

ИНС относятся: автономность; независимость от погодных условий, времени суток, года; помехозащищённость; непрерывность информации.

Основным недостатком ИНС является нарастание погрешности определения положения ЛА с течением времени полёта. Современные ИНС среднего класса имеют среднеквадратические ошибки определения местоположения порядка 5... 10 км за час полёта.

Позиционный метод базируется на определении местоположения ЛА относительно заранее привязанных к карте наземных радиопередающих станций.

Основным преимуществом позиционного метода по сравнению с методом счисления пути является независимость точности определения координат ЛА от пройденного расстояния до момента измерения, т.е. ошибки не накапливаются во времени. Среди позиционных систем навигации наибольшее распространение получили радиосистемы ближней (РСБН) и дальней (РСДН) навигации, а также посадочные системы. Среднеквадратическое значение ошибки определения координат ЛА с помощью системы РСБН-6С составляет 0,25 км, а системы РСДН-3С - 1,5...2 км.

Недостатками радионавигационных систем являются возможность определения координат ЛА только в определенных зонах действия внешних станций (неавтономность), а также низкая помехозащищённость.

Перспективным направлением развития РСДН являются спутниковые радиотехнические навигационные системы (СРНС). СРНС носят глобальный характер и имеют существенно более высокую точность. Максимальная ошибка определения координат может составлять 50... 150 м.

Обзорно-сравнительные методы основаны на сличении измеряемых полей Земли (магнитных, гравитационных, топографических) с их эталонами, заранее занесёнными в память специальных бортовых устройств. Системы навигации, основанные на измерениях поверхностных полей рельефа с последующим сопоставлением их с эталонами, получили название корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС). Недостатками подобных систем являются сложность создания необходимого информационного обеспечения, а также неработоспособность в тех районах Земли, где отсутствуют аномальности используемого геофизического поля. Среднеквадратичная ошибка определения местоположения ЛА с помощью КЭНС TERCOM составляет около 100м. В перспективе данное значение может быть снижено до 10 м.

Управление техническими системами

Анализ возможностей конкретных методов и средств навигации позволяет сделать вывод о том, что **ни одна отдельно взятая навигационная система не может обеспечить пилотирование и навигацию современных ЛА**. Поэтому основным путем совершенствования навигационного оборудования ЛА является создание комплексных навигационных систем (КНС).

Сущность комплексирования заключается в использовании информационной и структурной избыточности для повышения точности, надёжности и помехозащищённости измерений навигационных параметров. Информационная избыточность обеспечивается получением однородной информации от нескольких датчиков различной физической природы с последующей совместной обработкой этой информации в специализированном вычислителе. Избыточность структуры комплекса обеспечивает его работоспособность при отказе одного из навигационных датчиков. При этом возможно некоторое ухудшение точности измерений.

Одной из основных задач при создании КНС является рациональный выбор состава навигационных систем и оптимальное объединение их в единый комплекс. Структура типового навигационного комплекса современного ЛА представлена на рис. 5.3.

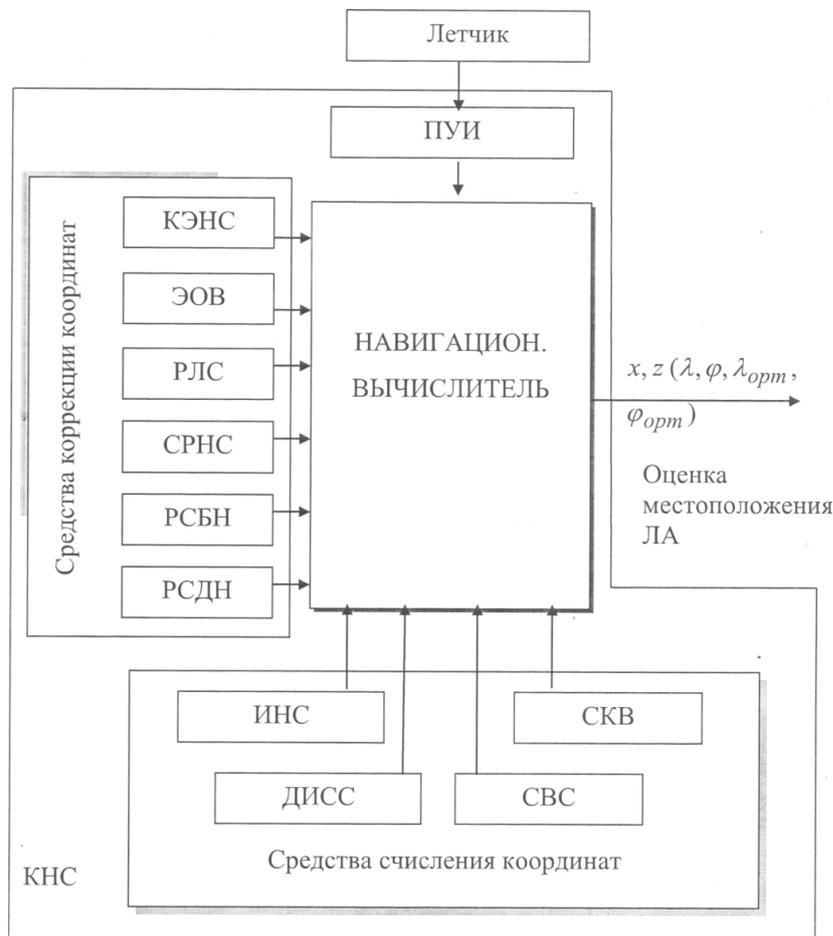


Рис. 5.3

Основным методом определения координат ЛА в таком комплексе является автономное счисление пути, основу которого составляет ИНС. Данный комплекс обладает функциональной избыточностью методов счисления пути. Это обеспечивается наличием ДИСС, СВС, системы курса и вертикали СКВ.

Управление режимами работы комплекса осуществляется лётчиком с помощью пульта управления и индикации (ПУИ).

Коррекция координат, полученных в результате счисления, осуществляется по данным различных систем коррекции, использующих для определения места ЛА позиционный метод. При коррекции численных координат выполняются две операции:

- 1) определение координат ЛА с помощью средства, выбранного в качестве корректора (РСБН, РЛС, оптических визиров и др.);
- 2) замена численных координат на новые полученные значения.

Включение в КНС нескольких средств коррекции позволяет обеспечить необходимую точность навигации в любых условиях обстановки.

Методы управления движением центра масс ЛА на маршруте

Автоматизированный вывод ЛА в заданную точку (цель, ППМ и др.) с помощью КНС может выполняться путевым, курсовым и маршрутным методами, а также их комбинацией. Выбор метода управления определяется видом траектории движения ЛА, которая назначается с учётом цели и решаемой тактической задачи.

Путевой метод предусматривает ориентацию вектора путевой скорости в направлении заданной цели или ППМ из произвольного исходного положения (рис. 5.4). При этом методе ЛА выводится в заданную точку по линии кратчайшего пути.

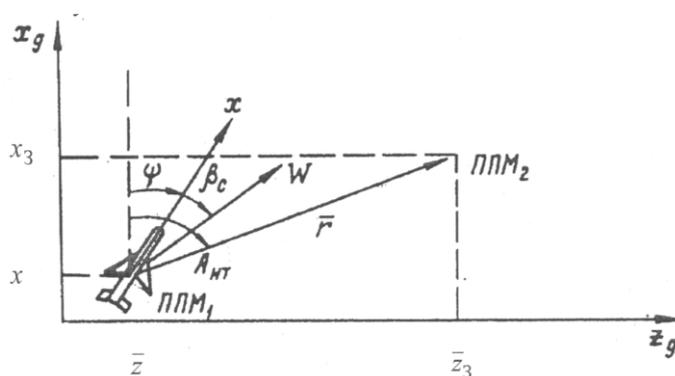


Рис. 5.4

Управление техническими системами

В качестве основного сигнала управления, характеризующего текущее значение ошибки, здесь используется отклонение от заданного путевого угла

$$\Delta\Psi_{\Pi} = \Psi - \Psi_3 = \psi + \beta_C - A_{HT},$$

где A_{HT} - пеленг заданной навигационной точки, который измеряется РСБН или вычисляется по известным (счисленным) координатам местоположения ЛА x_g, z_g и известным (внесенным в память БЦВМ) координатам точки x_3, z_3 .

$$A_{HT} = \text{arctg} \frac{z_3 - z}{x_3 - x};$$

β_C – угол сноса, измеряемый СВС;

ψ – текущий ортодромический курс, измеряемый СКВ.

По рассогласованию $\Delta\Psi_{\Pi}$ САУ формированием сигнала заданного крена по (4.40) разворачивает самолёт в сторону заданного путевого угла.

Курсовой метод можно рассматривать как частный случай путевого, когда не учитывается угол сноса. При курсовом методе продольная ось самолета направляется на навигационную точку, т.е. $\psi_3 = A_{HT}$.

Отличительной особенностью данного метода является траектория движения ЦМ ЛА, получившая название радиодромии. Радиодромия отличается тем, что из-за действия ветра ЛА отклоняется от линии первоначального курса, соединяющей навигационные точки. Поэтому ЛА необходимо постоянно доворачивать на цель. В окрестностях заданной точки угол поворота претерпевает резкие изменения. В связи с этим на некотором удалении от заданной точки сигнал заданного курса фиксируют.

Недостатком путевого и курсового методов является невозвращение ЛА на первоначальную линию пути после случайных или преднамеренных отклонений. Выход в заданную точку продолжается с нового направления. Таким образом, линия фактического пути может занимать случайное положение. Выход на цель с заданного направления не обеспечивается.

Сущность **маршрутного метода** состоит в том, что по координатам x_1, z_1 и x_2, z_2 отрезка маршрута определяется линия заданного пути (ЛЗП), ЛА переводится на эту линию и продолжает полет по ней.

Управление ЛА производится по отклонению от заданного курса ($\psi_3 = A_{HT}$) или заданного путевого угла ($\varphi_3 = A_{HT}$) и боковому отклонению от ЛЗП Δz , которое наиболее просто получается при счислении пути в част-

Управление техническими системами

ортодромической системе координат. В случае применения обычной ортодромической системы координат (рис. 5.5) эти параметры можно рассчитать по выражениям:

$$A_{HT} = \arctg \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1}; \quad \Delta z = l_1 \sin \varphi; \quad \Delta \psi = \psi - \psi_3,$$

где $\psi_3 = A_{HT}$; $\varphi = \psi_3 - \arctg \frac{z - z_1}{x - x_1}$; $l_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (z - z_1)^2}$

x, z – численные координаты ЦМ ЛА.

САУ для стабилизации ЛА на ЛЗП для формирования заданного крена использует сигналы Δz и δ или Δz и $\Delta \psi = \psi - \psi_3$.

Маршрутный метод управления обеспечивает полет по ЛЗП и выход на цель с заданного направления.

Таким образом, управление движением ЦМ в маршрутном полёте предполагает решение трёх взаимосвязанных задач:

- 1) получение информации о текущем положении ЛА (счисление координат и их коррекция);
- 2) формирование управляющего сигнала боковым движением ЛА в виде заданного значения курса ψ_3 и бокового отклонения от ЛЗП Δz ;
- 3) обработку управляющих сигналов.

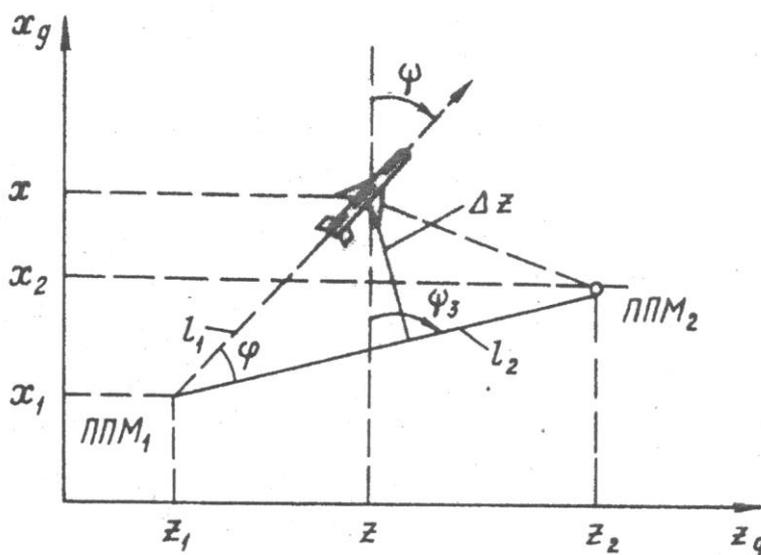


Рис. 5.5

Первые две задачи решает КНС. Обработку управляющих сигналов осуществляет САУ, функциональная схема которой представлена на рис. 5.6.

Управление техническими системами

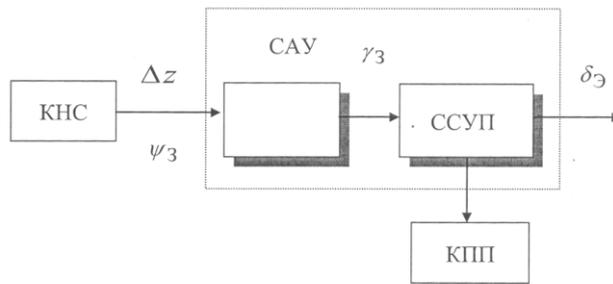


Рис. 5.6. Функциональная схема системы управления движением ЦМ ЛА:
 КНС – комплексная навигационная система, ВТУ – вычислитель траекторного управления (траекторный контур САУ), ССУП – система стабилизации углового положения (пилотажный контур САУ), КПП – командно-пилотажный прибор.

Состав и законы управления САУ

Автоматическое управление траекторией в горизонтальной плоскости осуществляет канал крена САУ отклонением элеронов. В канале рыскания САУ обеспечивает заданную путевую устойчивость и демпфирование колебаний рыскания.

Для вывода самолёта и последующего удержания на заданной траектории траекторный контур САУ формирует сигнал заданного крена по одному из следующих законов

$$\gamma_3 = -k_\gamma^Z (z - z_3) + k_\gamma^\psi \Delta\psi; \tag{5.3}$$

$$\gamma_3 = -k_\gamma^Z (z - z_3) - k_\gamma^{\dot{z}} \dot{z}; \tag{5.4}$$

$$\gamma_3 = -k_\gamma^Z (z - z_3) + k_\gamma^\psi \frac{T_u p}{T_u p + 1} \Delta\psi; \tag{5.5}$$

$$\gamma_3 = -k_\gamma^Z (z - z_3) - k_\gamma^{\dot{z}} \dot{z} - k_\gamma^{\int} \frac{\Delta z}{p}, \tag{5.6}$$

а пилотажный контур САУ отклонением элеронов, например по закону (4.12) выводит самолёт на этот крен $\gamma = \gamma_3$.

- Процесс управления осуществляется с помощью следующих систем:
- системы стабилизации угла крена (пилотажная часть САУ), включающей датчики угла крена и угловой скорости крена, вычислитель, сервопривод;
 - вычислителя траекторного контура, формирующего сигналы заданного крена, например, по законам (5.3)...(5.6);
 - самостоятельных информационных систем, формирующих сигналы $\Delta z = z - z_3$ и $\Delta\psi$, входящих в состав КНС.

Динамические свойства системы «САУ - самолёт» при управлении траекторией в горизонтальной плоскости

Динамические свойства системы рассмотрим для САУ с ЖОС сервопривода, осуществляющей формирование γ_3 по законам (5.3) и (5.4). Так как время регулирования при управлении креном приблизительно на порядок меньше времени регулирования при управлении траекторией, то можно пренебречь инерционностью внутреннего контура САУ и считать, что в каждый момент времени САУ обеспечивает равенство $\gamma = \gamma_3$. Тогда уравнения управляемой системы имеют вид:

$$\dot{z} = -V \sin \psi \approx -V\psi;$$

$$\dot{\psi} = -\frac{g}{V} n_y \sin \gamma \approx -\frac{g}{V} n_y \gamma;$$

$$\gamma = \gamma_3;$$

$$\gamma_3 = -k_\gamma^Z (z - z_3) - k_\gamma^{\dot{z}} \dot{z} \quad \text{или} \quad \gamma_3 = -k_\gamma^Z (z - z_3) + k_\gamma^\psi \Delta \psi.$$

Входным сигналом контура управления является значение заданной координаты z_3 , а выходным - ее текущее значение z . Структурная схема контура управления, приведенная на рис. 4.6, преобразуется в схему (рис. 5.7) для закона управления (5.3) и в схему (рис. 5.8) для закона управления (5.4).

Структурным схемам соответствуют следующие передаточные функции

$$W_{\frac{z}{z_3}}(p) = \frac{gn_y k_\gamma^Z}{p^2 + \frac{gn_y k_\gamma^\psi}{V} p + gn_y k_\gamma^Z}; \quad (5.7)$$

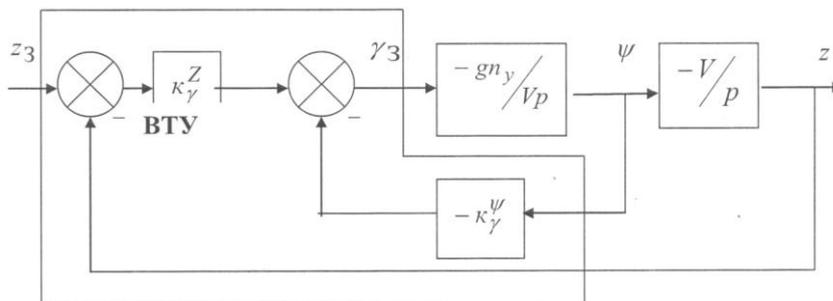


Рис. 5.7

Управление техническими системами

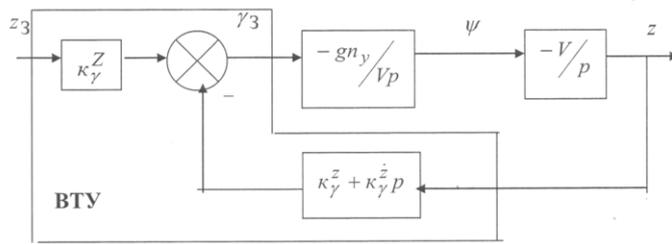


Рис. 5.8

$$W_{\frac{z}{z_3}}(p) = \frac{gn_y k_\gamma^Z}{p^2 + gn_y k_\gamma^z p + gn_y k_\gamma^Z} \quad (5.8)$$

Передаточная функция (5.7) описывает динамические свойства системы «САУ - самолёт» при реализации в САУ закона (5.3), а передаточная функция (5.8) - закона (5.4).

Анализ передаточных функций позволяет сделать следующие выводы:

- при принятых допущениях динамические свойства контура управления описываются звеном второго порядка;

- динамические свойства контура определяются параметрами САУ и не зависят от свойств ЛА;

- выбором коэффициентов закона управления можно обеспечить необходимое качество переходного процесса. При этом демпфирование колебаний траекторного движения обеспечивается правильным выбором передаточных чисел $k_\gamma^{\dot{z}}$ и k_γ^ψ , а устойчивость движения - k_γ^Z ;

- демпфирование колебаний при использовании закона (5.3) зависит от скорости полёта. Для обеспечения высокого качества переходного процесса при изменении скорости необходимо изменять и передаточный коэффициент

k_γ^ψ . Расчёт передаточных чисел можно осуществлять по методике, изложенной в п. 4.5.2.

Пример.

Определить значения передаточных чисел k_γ^Z и $k_\gamma^{\dot{z}}$ для обеспечения за-

Управление техническими системами

данных значений $\xi_{z3} = 1$ и $t_{pez} = 48$ с.

При $\xi_{z3} = 1$ имеем $t_{pez} = 4.8 / \Omega_{0z}$.

Тогда $\Omega_{0z} = 4.8 / t_{pez} = \sqrt{gn_y k_\gamma^Z}$.

Откуда

$$k_\gamma^Z = \frac{(4.8)^2}{t_{pez}^2 gn_y} = \frac{23.04}{48^2 \cdot 10} = 0.001 \text{ рад/м} = 0.057 \text{ град/м}.$$

Из $\xi_{z3} = 1 = \frac{n_{0z}}{\Omega_{0z}} = \frac{k_\gamma^Z}{2} \sqrt{\frac{gn_y}{k_\gamma^Z}}$ имеем

$$k_\gamma^Z = \frac{2\xi_{z3} \sqrt{k_\gamma^Z}}{\sqrt{gn_y}} = 2 \sqrt{\frac{0.001}{10}} = 0.02 \text{ рад.с м}^{-1} = 1.14 \text{ град/(м/с)}.$$

Работа САУ в режиме

**управления траекторией
в горизонтальной плоскости**

Рассмотрим динамику вывода ЛА на линию заданного пути. Пусть в САУ реализована ЖОС сервопривода, то есть закон управления элеронами имеет вид $\delta_\Omega = k_\Omega^\gamma (\gamma - \gamma_3) + k_\Omega^{\omega_x} \omega_x$, а заданный крен формируется по закону (5.3). ЛА выполняет полёт с заданным курсом, т.е. $\Delta\psi = 0$, и нулевым креном.

В начальный момент времени в САУ поступил сигнал для перевода ЛА на другую линию пути, находящуюся левее прежней (рис. 5.9). При подаче управляющего сигнала $\Delta z > 0$ появится сигнал пропорциональный этому рассогласованию. САУ отклонит элероны, и самолет начнет крениться на левое крыло ($\gamma < 0$).

Пилотажный контур отработает сигнал заданного крена $\gamma = \gamma_3$. При этом элероны вернуться в нейтральное положение.

При накренении (поз.1) появится горизонтальная составляющая подъемной силы, которая будет искривлять траекторию ЛА, т.е. поворачивать вектор скорости влево. Так как в начальный момент направление продольной оси сохраняется, то поворот скорости вызовет появление скольжения на опущенное крыло, и, у устойчивого в путевом отношении ЛА, момента рыскания, который будет разворачивать продольную ось ЛА вслед за вектором скорости. При развороте по курсу в законе (5.3) появится составляющая $k_\gamma^\psi \Delta\psi > 0$, которая направлена на уменьшение заданного крена.

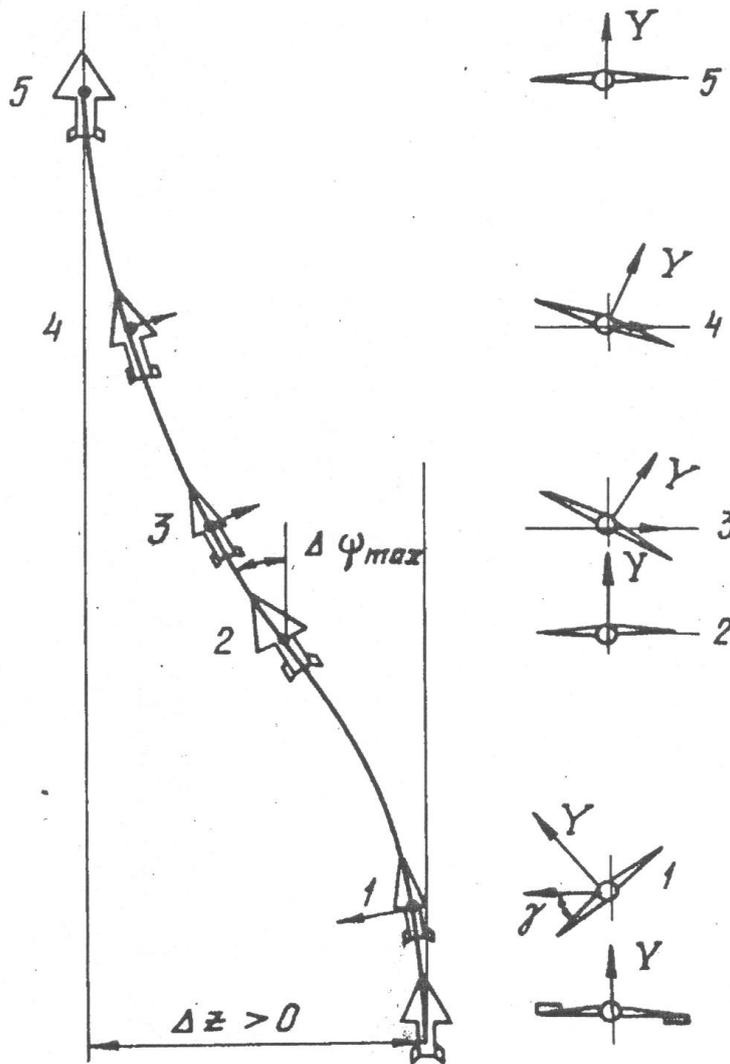


Рис. 5.9

Уменьшение Δz и увеличение $\Delta \psi$ приведёт к уменьшению заданного значения крена ($\gamma = \gamma_3$) < 0 . В некоторой точке эти сигналы сравниваются, заданный крен будет равным нулю (поз.2), а отклонение по курсу максимально. В дальнейшем САУ переводит самолёт в правый крен (поз.3). Траектория искривляется в другом направлении, самолёт разворачивается вправо, возвращаясь к заданному курсу. В результате обеспечивается плавный выход самолёта на заданную траекторию с заданным курсом и нулевым креном.

Самолёт выводится на новое заданное значение линии пути без статической ошибки. Это видно из выражений (5.7), (5.8) при $p=0$:

$$W_{\frac{z}{z_p}}(p=0) = \frac{g n_y k_\gamma^Z}{g n_y k_\gamma^Z} = 1, \text{ откуда } z_{уст} = z_3.$$

Влияние законов управления САУ и внешних воздействий на движение центра масс в горизонтальной плоскости

Воздействие бокового ветра.

При выключенной САУ при попадании поперечно- и флюгерноустойчивого самолёта в боковой ветер со скоростью w_z , он после прекращения малых боковых движений развернётся навстречу ветру на угол ψ и приобретёт некоторый остаточный крен γ (рис. 5.10).

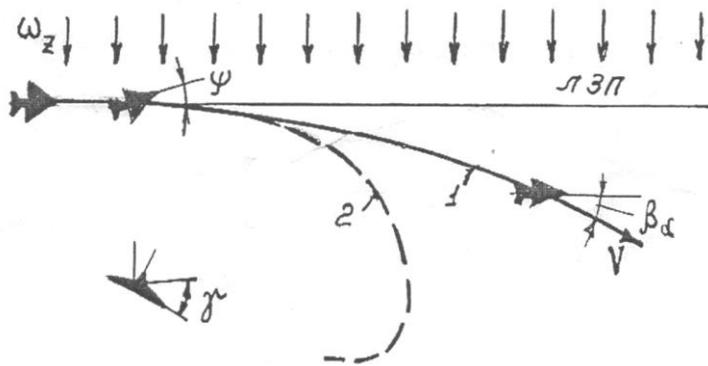


Рис. 5.10

Последний является причиной нарушения равновесия сил и начала развития большого бокового движения. В процессе искривления траектории возникает скольжение на опущенное крыло и появление моментов крена и рыскания. Первый будет стремиться устранить крен, а второй - развернуть самолёт для устранения возникшего скольжения. Если самолёт в большом боковом движении устойчив, то самолёт будет сноситься ветром по траектории 1, выдерживая прежний курс и нулевой крен. Если самолёт неустойчив, то он в процессе большого бокового движения будет непрерывно увеличивать крен, входя в более глубокую спираль по траектории 2. Таким образом, самолёт без САУ при наличии бокового ветра отклоняется от линии заданного пути (ЛЗП).

При включении САУ, формирующей заданный крен по закону (5.3), при всех видах обратной связи сервопривода неизбежно появление статических ошибок при действии бокового ветра. Это объясняется тем, что сигнал угла рыскания, обусловленный разворотом продольной оси ЛА в сторону ветра для устранения скольжения, может быть уравновешен только сигналом бокового смещения. Действительно,

$$\gamma_3 = -k_\gamma^Z (z - z_3) + k_\gamma^\psi \Delta\psi_{уст} = 0.$$

Откуда

$$\Delta z_{уст} = \frac{k_\gamma^\psi}{k_\gamma^Z} \Delta\psi_{уст} = \frac{k_\gamma^\psi}{k_\gamma^Z} \frac{W_z}{V},$$

т.е. чем больше боковой ветер и меньше скорость полёта, тем больше ошибка. Динамика процесса такова. Боковым ветром самолёт сносится с линии заданного пути. По мере увеличения ошибки Δz САУ накреняет ЛА. Так как при крене ЛА разворачивается по курсу, сигнал, пропорциональный курсу, уменьшает крен. Когда боковая составляющая скорости уравнивает скорость ветра, возрастание ошибки Δz прекратится (кривая 1 на рис. 5.11).

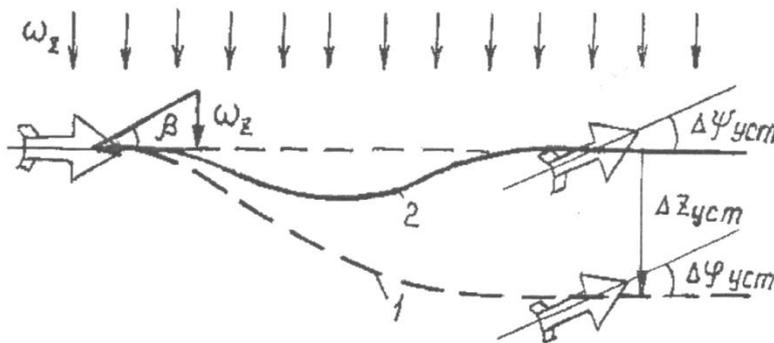


Рис. 5.11

Если САУ формирует заданный крен по законам (5.4) - (5.6), то при воздействии бокового ветра обеспечивается полёт самолёта по линии заданного пути без статической ошибки (кривая 2 на рис. 5.11). В самом деле:

$$\psi_3 = -k_\gamma^Z (z - z_3) - k_\gamma^{\dot{z}} \dot{z},$$

а так как в установившемся режиме $\dot{z} = 0$, то и $(z - z_3) = 0$. Это обеспечивается разворотом самолёта по курсу носом против ветра на угол $\Delta\psi_{уст} = W_x / V$.

Воздействие постоянного возмущающего момента. При действии постоянного возмущающего момента крена (например, при несимметричном сбросе груза) в установившемся процессе $\delta_{эуст} \neq 0$. Поведение ЛА с САУ

описывается следующими уравнениями

$$M_{xB} + M_x^{\delta_э} \delta_{эуст} = 0;$$

$$\delta_{эуст} = \kappa_э^\gamma (\gamma - \gamma_3) + \kappa_э^{\omega_x} \omega_x = -\kappa_э^\gamma \gamma_3;$$

$$\gamma_3 = -\kappa_\gamma^Z (z - z_3) - \kappa_\gamma^{\dot{z}} \dot{z} = -\kappa_\gamma^Z \Delta z_{уст}.$$

/ // у

Управление техническими системами

Первое уравнение показывает, что действие возмущающего момента может быть компенсировано отклонением элеронов. Однако элероны могут быть отклонены только при наличии ошибки стабилизации ЛЗП $\Delta z_{уст}$. Это следует из анализа второго и третьего уравнений, т.к. на установившемся режиме полёта (по окончании переходного процесса) $\dot{\phi} = \omega_x = \gamma = 0$. Решая совместно данные уравнения, получим выражение для оценки статической ошибки

$$\Delta z_{уст} = - \frac{M_{xB}}{\kappa_{\delta}^{\gamma} \kappa_{\gamma}^Z m_x^{\delta_{\delta}} q S l},$$

т.е. самолет будет лететь с отклоненными элеронами, выдерживая заданный курс, с нулевым креном, но имея боковое отклонение от линии заданного пути $\Delta z_{уст}$ (кривая 1 на рис. 5.12).

Таким образом, при ЖОС сервопривода и формировании заданного крена по законам (5.3) ... (5.5) появляется статическая ошибка по боковому отклонению.

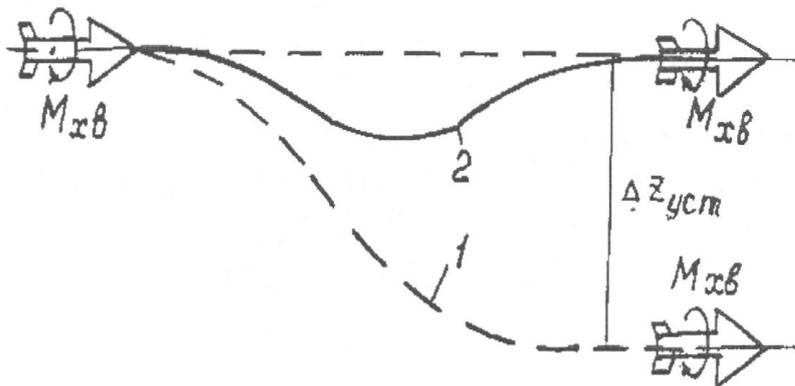


Рис. 5.12

Чтобы и при действии возмущающего момента крена самолёт удерживался на линии заданного пути (кривая 2 на рис. 5.12), необходимо:

- при ЖОС сервопривода использовать закон управления (5.6);
- при использовании законов формирования крена (5.3) ... (5.5) применять СОС или ИОС сервопривода.

Лекция №13

по теме: Автоматическое управление скоростью и высотой полета летательных аппаратов.

2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ПОЛЁТА

Управление скоростью полёта осуществляется в основном двумя способами:

- 1) изменением тяги двигателей;
- 2) отклонением руля высоты.

Управление скоростью полета изменением тяги двигателей. Управление скоростью полёта изменением тяги двигателей применяется в основном при прямолинейном движении и, в частности, при движении самолета по глиссаде.

Автомат, осуществляющий стабилизацию скорости путём изменения тяги двигателей, обычно называют автоматом тяги (АТ). Изменение тяги автомат осуществляет через отклонение рычага управления двигателем (РУД) δ_p .

Автомат тяги необходим для стабилизации скорости полёта с одновременной стабилизацией САУ траектории ЦМ ЛА. Примером такого режима может служить режим захода на посадку. В случае регулирования тяги осуществляется непосредственное воздействие на продольные силы, действующие на самолёт. Закон управления АТ с ЖОС сервопривода можно записать в виде

$$\delta_p = -k_p^V (V - V_3) - k_p^{\dot{V}} \dot{V}.$$

При исследовании динамики движения самолёта по скорости с АТ необходимо к уравнениям движения самолёта добавить уравнения, описывающие законы управления АТ и САУ. Будем полагать, что канал тангажа САУ отклонением стабилизатора сохраняет траекторию прямолинейной (угол наклона траектории постоянный). Тогда система уравнений, описывающая движение самолёта по скорости с АТ сводится, таким образом, к следующей:

$$\begin{aligned} m\dot{V} &= -X^V V + P; \\ (T_{\delta p} p + 1)P &= k_{\delta p} \delta_p; \\ \delta_p &= -k_p^V (V - V_3) - k_p^{\dot{V}} \dot{V}. \end{aligned} \quad (5.9)$$

Первое уравнение является уравнением проекции сил на продольную ось. Второе характеризует изменение тяги при отклонении РУД. Двигатель при этом описывается инерционным звеном. Третье уравнение определяет отклонение

Управление техническими системами

РУД АТ. Инерционностью этого процесса можно пренебречь. Для анализа динамических свойств системы «самолёт - АТ» при управлении скоростью полёта необходимо получить передаточную функцию $W_{\frac{V}{V_3}}(p)$.

Структурная схема, соответствующая уравнениям (5.9), представлена на рис. 5.13.

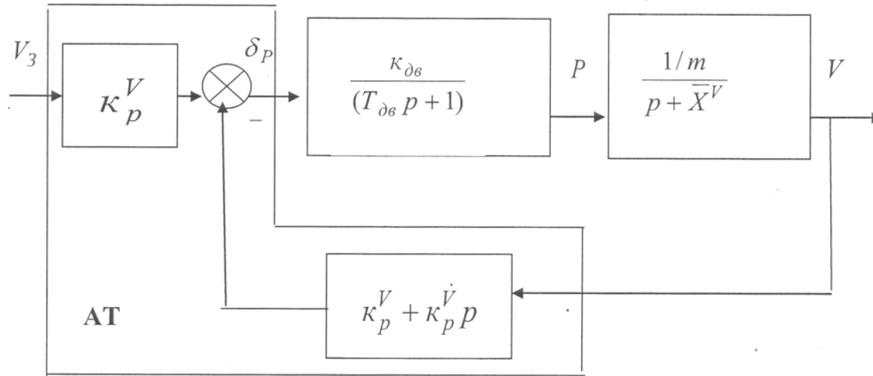


Рис. 5.13. Структурная схема контура управления скоростью

Передаточная схема контура управления имеет вид

$$W_{\frac{V}{V_3}}(p) = \frac{k_p^V k_{\delta} \frac{1}{m} \frac{1}{T_{\delta}}}{p^2 + (\bar{X}^V + \frac{1}{T_{\delta}}(1 + k_{\delta} k_p^V \frac{1}{m}))p + \frac{1}{T_{\delta}}(\bar{X}^V + k_{\delta} \frac{1}{m} k_p^V)} \quad (5.10)$$

Анализ передаточной функции (5.10) позволяет сделать следующие выводы:

- динамические свойства контура управления «самолёт - АТ» описываются звеном второго порядка;
- динамические свойства рассматриваемого контура управления определяются собственными свойствами самолёта, динамическими характеристиками двигателей (коэффициентом усиления и постоянной времени) и параметрами АТ;
- увеличение коэффициента k_p^V способствует повышению собственной частоты контура управления, а $k_p^{V\&}$ - коэффициента демпфирования. Изменением параметров АТ (коэффициентов k_p^V и $k_p^{V\&}$) можно влиять на качество переходного процесса;
- существует статическая ошибка в отработке заданного значения скорости

рости $V_{уст} = \frac{k_p^V k_{\delta}}{\bar{X}^V m + k_{\delta} k_p^V} V_3$. Введение в закон управления АТ сигнала инте-

траля от скорости обеспечит астатическую стабилизацию скорости.

Управление скоростью с помощью руля высоты. Регулирование скорости полёта отклонением руля высоты применяется в том случае, если не накладываются жёсткие требования к движению самолёта по заданной траектории.

Руль высоты при управлении скоростью отклоняется по закону

$$\delta_{\epsilon} = -k_{\epsilon}^V (V - V_3) - k_{\epsilon}^{V\&}\dot{V}. \quad (5.11)$$

При увеличении скорости полёта руль высоты отклонится на увеличение угла атаки. Увеличение угла атаки вызовет увеличение подъемной силы и силы лобового сопротивления. В результате траектория полёта начнёт искривляться, и скорость полёта начнет уменьшаться.

Если считать, что ЛА при отклонении руля высоты мгновенно выходит на заданный угол атаки, то передаточная функция замкнутого контура имеет вид

$$\frac{W_V}{V_3}(p) = \frac{\kappa_{\epsilon}^V (\epsilon_2 p^2 + \epsilon_1 p + \epsilon_0)}{A_3 p^3 + A_2 p^2 + A_1 p + A_0}, \quad (5.12)$$

где коэффициенты знаменателя являются функциями аэродинамической компоновки самолёта и передаточных коэффициентов закона управления.

Изменением передаточных коэффициентов k_{ϵ}^V и $k_{\epsilon}^{V\&}$ можно регулировать значения коэффициентов A_3 , A_2 , A_1 и A_0 и обеспечить устойчивость замкнутого контура управления. Однако при использовании закона (5.11) не всегда представляется возможным получить желаемый переходный процесс.

Анализ передаточной функции (5.12) позволяет сделать также вывод о том, что и при управлении скоростью с помощью руля высоты появляется статическая ошибка, для устранения которой в закон управления (5.11) необходимо ввести дополнительный интегральный сигнал.

Стабилизацию скорости полёта, в принципе, можно обеспечить воздействием на лобовое сопротивление с помощью тормозных щитков. Однако такой способ стабилизации скорости не выгоден, так как в исходном режиме полёта для обеспечения регулирования скорости в одну и другую стороны тормозные щитки должны быть отклонены на некоторую величину, вследствие чего увеличится лобовое сопротивление самолёта.

3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОТОЙ ПОЛЁТА

Законы управления и принцип работы САУ при управлении высотой полёта

Управление техническими системами

Автоматическое управление высотой полёта в общем случае требует связанного управления летательным аппаратом, т.е. одновременного воздействия на стабилизатор и тягу двигателей. Однако, если допустить, что скорость полёта выдерживается постоянной (например, с помощью АТ), то можно в первом приближении рассматривать автономную систему управления высотой полёта с помощью стабилизатора (руля высоты).

При автоматическом управлении высотой полёта главным сигналом в законе управления САУ будет сигнал отклонения от заданной высоты. САУ может обеспечивать управление или стабилизацию как барометрической, так и геометрической высоты полёта. В первом случае сигнал отклонения от заданной высоты поступает с корректора высоты типа КВ-16 или с корректора- задатчика высоты (КЗВ), а во втором случае текущую геометрическую высоту измеряет радиовысотомер. Однако состав сигналов и структура законов управления могут быть различными в зависимости от типа самолёта и возможностей бортового оборудования.

Непосредственное отклонение руля высоты осуществляется пилотажным контуром САУ. При этом заданный сигнал для этого контура формируется траекторным контуром. Если в качестве управляемого параметра пилотажный контур использует тангаж, то законы формирования заданного тангажа могут иметь следующий вид:

$$\vartheta_3 = -\kappa_g^H (H - H_3); \quad (5.13)$$

$$\vartheta_3 = -\kappa_g^H (H - H_3) - \kappa_g^{\dot{H}} \dot{H}; \quad (5.14)$$

$$\vartheta_3 = -\kappa_g^H (H - H_3) - \kappa_g^\Theta \Theta. \quad (5.15)$$

Если в закон управления пилотажного контура САУ с ЖОС $\delta_B = k_B^\vartheta (\vartheta - \vartheta_3) + k_B^{\omega_z} \omega_z$ подставить значение заданного тангажа в соответствии, например, с выражением (5.13), то отклонение руля высоты можно представить соотношением

$$\delta_B = k_B^H (H - H_3) + k_B^\vartheta (\vartheta - \vartheta_3) + k_B^{\omega_z} \omega_z. \quad (5.16)$$

В полученном законе управления основным управляющим сигналом в контуре стабилизации высоты является сигнал, пропорциональный рассогласованию по высоте. Сигналы, пропорциональные тангажу, производной высоты полёта, углу наклона траектории, обеспечивают демпфирование колебаний большого продольного движения, а пропорциональные скорости тангажа - демпфирование колебаний малого продольного движения.

Для маневренных самолётов в качестве управляемого параметра во внутреннем контуре используют перегрузку (а не тангаж). В этом случае внешний контур САУ формирует сигнал заданной избыточной перегрузки аналогично (5.13)...(5.15).

Рассмотрим динамику выхода самолёта на заданную высоту при работе САУ по закону (5.16).

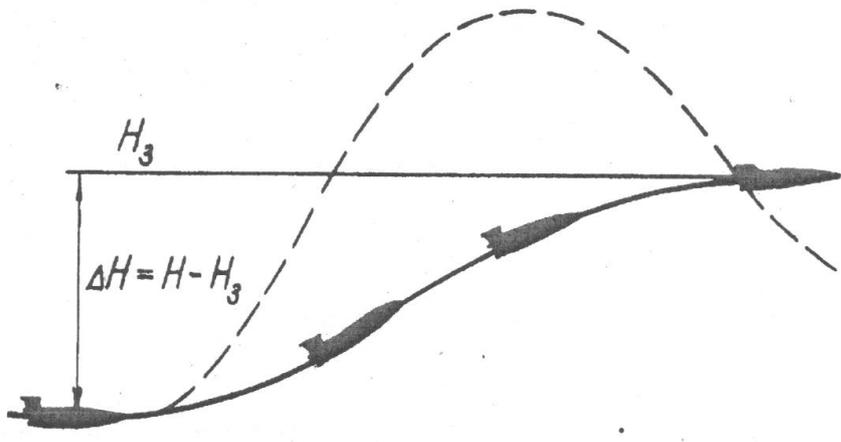


Рис. 5.14

Предположим, что высота полёта самолёта меньше заданной (рис. 5.14). Тогда руль высоты отклонится на кабрирование пропорционально рассогласованию. Возникнет продольный момент, который вызовет вращение самолёта на увеличение угла атаки и тангажа. При увеличении угла атаки увеличится подъёмная сила.

В результате чего самолет переходит в набор высоты с увеличением угла наклона траектории. По мере приближения к заданной высоте сигнал рассогласования по высоте уменьшается, а сигнал тангажа увеличивается. В некоторый момент времени они сравниваются.

Руль высоты в этой точке вернётся в нейтральное положение. При дальнейшем движении сигнал, пропорциональный тангажу, становится больше сигнала, пропорционального рассогласованию по высоте. Руль высоты отклоняется на пикирование. Угол атаки начнет уменьшаться, появится отрицательный прирост подъёмной силы, а траектория начнёт искривляться вниз.

При отсутствии сигнала, пропорционального тангажу, процесс возвращения самолёта к заданной траектории будет колебательным.

Динамические свойства системы «САУ - самолёт» в режиме стабилизации высоты полёта

Динамические свойства системы «САУ — самолёт» во многом зависят от закона управления, реализованного в САУ. Для определенности полагаем, что

Управление техническими системами

пилотажный контур управляет тангажом, а траекторный - формирует заданный тангаж в соответствии с законом (5.15). Будем считать, что пилотажный контур мгновенно обрабатывает заданный тангаж, т.е. всегда выполняется равенство $\vartheta = \vartheta_3$. Возможность принятия данного допущения связано с тем, что время регулирования при управлении тангажом, как правило, на порядок меньше, чем при управлении высотой полёта.

Для анализа динамических свойств и расчёта передаточных коэффициентов необходимо определить передаточную функцию $\frac{W_H}{H_3}(p)$. Для вывода воспользуемся следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \dot{H} &= V \sin \Theta \approx V\Theta \\ \Theta &= \vartheta - \alpha; \\ \dot{\alpha} &= \omega_z - \bar{Y}^\alpha \alpha; \\ \vartheta &= \vartheta_3; \\ \vartheta_3 &= -\kappa_9^H (H - H_3) - \kappa_9^\Theta \Theta. \end{aligned} \tag{5.17}$$

Структурная схема, соответствующая уравнениям (5.17), представлена на рис. 5.15.

Структурной схеме соответствует следующая передаточная функция

$$\frac{W_H}{H_3}(p) = \frac{\kappa_9^H \bar{Y}^\alpha V}{p^2 + (\bar{Y}^\alpha + \kappa_9^\Theta \bar{Y}^\alpha)p + \kappa_9^H \bar{Y}^\alpha V} = \frac{\kappa_9^H \bar{Y}^\alpha V}{p + 2n_H p + \Omega_H^2}. \tag{5.18}$$

Анализ передаточной функции (5.18) позволяет сделать следующие выводы:

- динамические свойства контура стабилизации высоты полёта при принятых допущениях описываются звеном второго порядка;

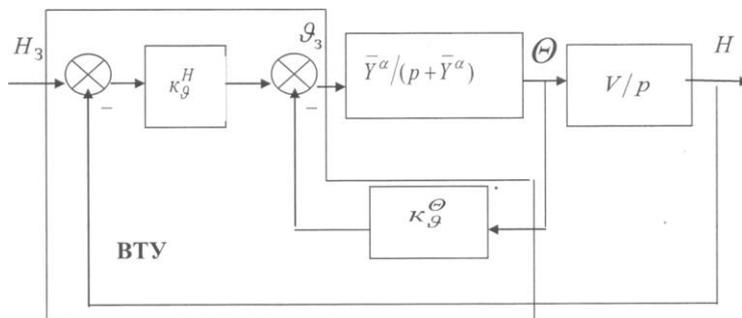


Рис. 5.15. Структурная схема контура стабилизации высоты

- коэффициент демпфирования контура определяется как собственными свойствами самолета, так и передаточным числом k_9^Θ ;
- собственная частота контура определяется скоростью полёта, производной подъемной силы по углу атаки \bar{Y}^α и коэффициентом k_9^H ;
- при отсутствии внешних возмущений текущая высота равна заданной, т.е. статическая ошибка отсутствует.

Влияние внешних возмущений на контур стабилизации высоты

Управление техническими системами

Отклонение высоты полёта от её заданного значения при исправной работе высотомера или корректора высоты может быть вызвано действием возмущающего момента, сбросом груза или вертикальными порывами ветра.

Будем полагать, что САУ осуществляет стабилизацию высоты полёта по закону (5.13).

Уравнения движения самолёта с учётом действия внешних возмущений имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{H} &= V\Theta \\ \Theta &= \vartheta - \alpha + \alpha_B; \\ \dot{\alpha} &= \omega_z - \bar{Y}^\alpha \alpha + \bar{F}_{yB}; \\ \delta_\epsilon &= \kappa_\epsilon^\vartheta (\vartheta - \vartheta_3) + \kappa_\epsilon^{\omega_z} \omega_z; \\ \vartheta_3 &= -\kappa_\vartheta^H (H - H_3). \end{aligned} \quad (5.19)$$

Действие возмущающего момента ($\bar{M}_{ZB} \neq 0, \alpha_B = 0, \bar{F}_{yB} = 0$). Действие возмущающего момента компенсируется соответствующим отклонением стабилизатора, т.е. $\bar{M}_{ZB} + \bar{M}_Z^{\delta_\epsilon} \delta_{\epsilon\text{уст}} = 0$. Из анализа первых трёх уравнений (5.19) следует, что по окончании переходного процесса $\Theta = \alpha = \vartheta = 0$. Следовательно, $\delta_{\epsilon\text{уст}} = \kappa_\epsilon^\vartheta (\vartheta - \vartheta_3) = -\kappa_\epsilon^\vartheta \vartheta_3 = -\kappa_\epsilon^\vartheta \kappa_\vartheta^H \Delta H_{\text{уст}}$. Это означает, что при ЖОС сервопривода САУ парирование возмущающего момента возможно только за счёт ошибки стабилизации высоты полёта, которая определяется следующим образом

$$\Delta H_{\text{уст}} = \frac{\bar{M}_{ZB}}{-\kappa_\epsilon^\vartheta \kappa_\vartheta^H m_z^{\delta_\epsilon} q S \delta_a}$$

Данный вывод справедлив для любого из законов управления (5.13)...(5.15). При скоростной и изодромной обратных связях сервопривода самолёт сохранит заданную высоту и при действии постоянного возмущающего момента. Кроме того, астатизм к возмущающему моменту может быть обеспечен включением в закон управления (5.13) интеграла от ошибки стабилизации высоты полёта.

Действие вертикального порыва ветра ($\bar{M}_{ZB} = 0, \alpha_B \neq 0, \bar{F}_{yB} = 0$).

После прекращения малых движений, вызванных увеличением угла атаки, самолёт приобретает скорость ветра и начинает отклоняться от заданной высоты. От высотомера поступит сигнал, пропорциональный отклонению высоты от заданного значения. Это приводит к отклонению руля, появлению пикирующего момента, отрицательному приросту угла атаки и тангажа. Но при изменении тангажа поступает сигнал, пропорциональный тангажу. Данный сигнал противоположен по знаку сигналу рассогласования. Вследствие этого отклонение стабилизатора уменьшается. Когда сигналы взаимно компенсируются, руль возвратится в исходное положение, т.е. $\delta_{\text{вуст}} = 0$. Из анализа уравнений (5.19) следует, что $\Theta = \alpha = 0$, а $\vartheta_{\text{уст}} = -\alpha_B$.

Таким образом, $\delta_{\text{вуст}} = k_B^\vartheta \vartheta_{\text{уст}} + k_B^H \Delta H_{\text{уст}} = 0$, откуда

$$\Delta H_{уст} = -\frac{\kappa_{\delta}^{\mathcal{G}}}{\kappa_{\delta}^H} \mathcal{G}_{уст} = \frac{\kappa_{\delta}^{\mathcal{G}}}{\kappa_{\delta}^H} \frac{W_y}{V}.$$

Заметим, что статическая ошибка выдерживания высоты полёта в неспокойной атмосфере при наличии сигнала тангажа в законе управления (5.13) будет иметь место при использовании любого вида обратной связи, а не только жёсткой. Это объясняется тем, что сигнал изменения тангажа всегда компенсируется сигналом изменения высоты, а установившееся положение руля высоты не зависит от величины установившегося ветра.

При формировании заданного тангажа по выражениям (5.14) и (5.15) отсутствует сигнал тангажа, а отклонение руля высоты происходит по закону

$$\delta_{\delta} = K_{\delta}^H \Delta H + K_{\delta}^{\dot{H}} \dot{H} + K_{\delta}^{\omega_Z} \omega_Z.$$

Поэтому и в неспокойной атмосфере САУ выдерживает заданную высоту без статической ошибки. Действительно, здесь

$$\delta_{\delta \text{ уст}} = K_{\delta}^H \Delta H_{уст} = 0 \text{ при } \Delta H_{уст} = 0.$$

Действие нормальной силы ($\bar{M}_{zB} = 0$, $\alpha_B = 0$, $\bar{F}_{yB} \neq 0$). При сбросе грузов избыток подъёмной силы приводит к увеличению угла атаки. Установится такое значение $\alpha_{уст}$, при котором обеспечится равенство подъёмной силы новому значению силы тяжести самолёта. Из третьего уравнения системы (5.19) следует, что $\alpha_{уст} = -\frac{\bar{F}_{yB}}{\bar{Y}\alpha}$. Но у устойчивого по углу атаки самолета возникнет момент, который должен быть компенсирован соответствующим отклонением руля, т.е. $-\bar{M}_z^{\alpha} \alpha_{уст} + \bar{M}_z^{\delta_{\delta}} \delta_{\delta \text{ уст}} = 0$,

где $\delta_{\delta \text{ уст}} = \kappa_{\delta}^{\mathcal{G}} \mathcal{G}_{уст} + \kappa_{\delta}^H \Delta H_{уст}$. Из второго уравнения системы (5.19) следует, что $\mathcal{G}_{уст} = \alpha_{уст}$. Тогда выражение для оценки статической ошибки имеет вид

$$\Delta H_{уст} = -\frac{(\bar{M}_z^{\alpha} / \bar{M}_z^{\delta_{\delta}} - \kappa_{\delta}^{\mathcal{G}}) \bar{F}_{yB}}{\kappa_{\delta}^H \bar{Y}\alpha}.$$

Лекция № 14

по теме: Системы управления оборудованием

1. Назначение, состав, технические и программные средства СУО

Системы управления оборудованием предназначены для организации работы отдельных типов оборудования исполнительной системы, а также для согласования их совместного функционирования.

Управление базируется на использовании модульного принципа. Основные модули представляют собой оборудование с программным управлением. Функционально модуль с программным управлением подразделяется на

Управление техническими системами

управляющий автомат и объект управления. В управляющий автомат загружается программа, которую он преобразует в последовательность управляющих воздействий, передаваемых по каналам связи. Объект управления, которым может быть, например, станок, обрабатывает управляющие воздействия, выполняя соответствующие рабочие операции.

Текущее состояние объекта управления характеризуется величинами сигналов обратной связи, формируемыми датчиками и подводимыми в управляющий автомат. За счет наличия обратной связи управляющий автомат может формировать или корректировать последовательность действий в соответствии с текущим состоянием объекта управления. Например, может быть разрешено выполнение очередной рабочей операции после получения сигнала с датчика о завершении предыдущей операции или выбрана соответствующая ветвь программы после поступления с датчика сигнала о необходимости изменения последовательности действий по результатам контроля объекта обработки.

Для взаимодействия с другими модулями в управляющем автомате формируется информация, отражающая такие характеристики состояния модуля, как моменты окончания отдельных фаз технологического процесса, завершение выполнения программы или наличие особых ситуаций, возникающих в процессе функционирования модуля.

Программное управление модулем обеспечивает, во-первых, его автоматическое функционирование в соответствии с заданной программой и, во-вторых, возможность изменения процесса функционирования путем загрузки в модуль другой программы, что характеризует гибкость работы модуля.

Система управления включает технические и программные средства.

Технические средства системы управления - это вычислительные машины, устройства сопряжения с объектом и устройства передачи данных. Технические средства функционируют под управлением программных средств.

Программные средства - это программы, определяющие порядок реализации функций, возложенных на систему управления. В зависимости от назначения программы эти средства делятся на обслуживающие и функциональные.

Обслуживающие программы предназначены для выполнения вспомогательных в смысле целевого назначения модуля функций, таких как управление начальной загрузкой программ и данных в память ЭВМ, контроль работоспособности ЭВМ и других аппаратурных средств системы управления, управление обменом данными и другими модулями ГАП. Совокупность обслуживающих программ,

Управление техническими системами

обеспечивающих управление работой ЭВМ и реализующих вспомогательные функции по управлению модулем, является операционной системой ЭВМ.

Функциональные программы, называемые также технологическими или прикладными, предназначены для организации управления работой модуля. В них содержится информация о последовательности действий в управляемом объекте в соответствии с технологическими программами.

В процессе автоматического функционирования система управления модулем ГАП обеспечивает:

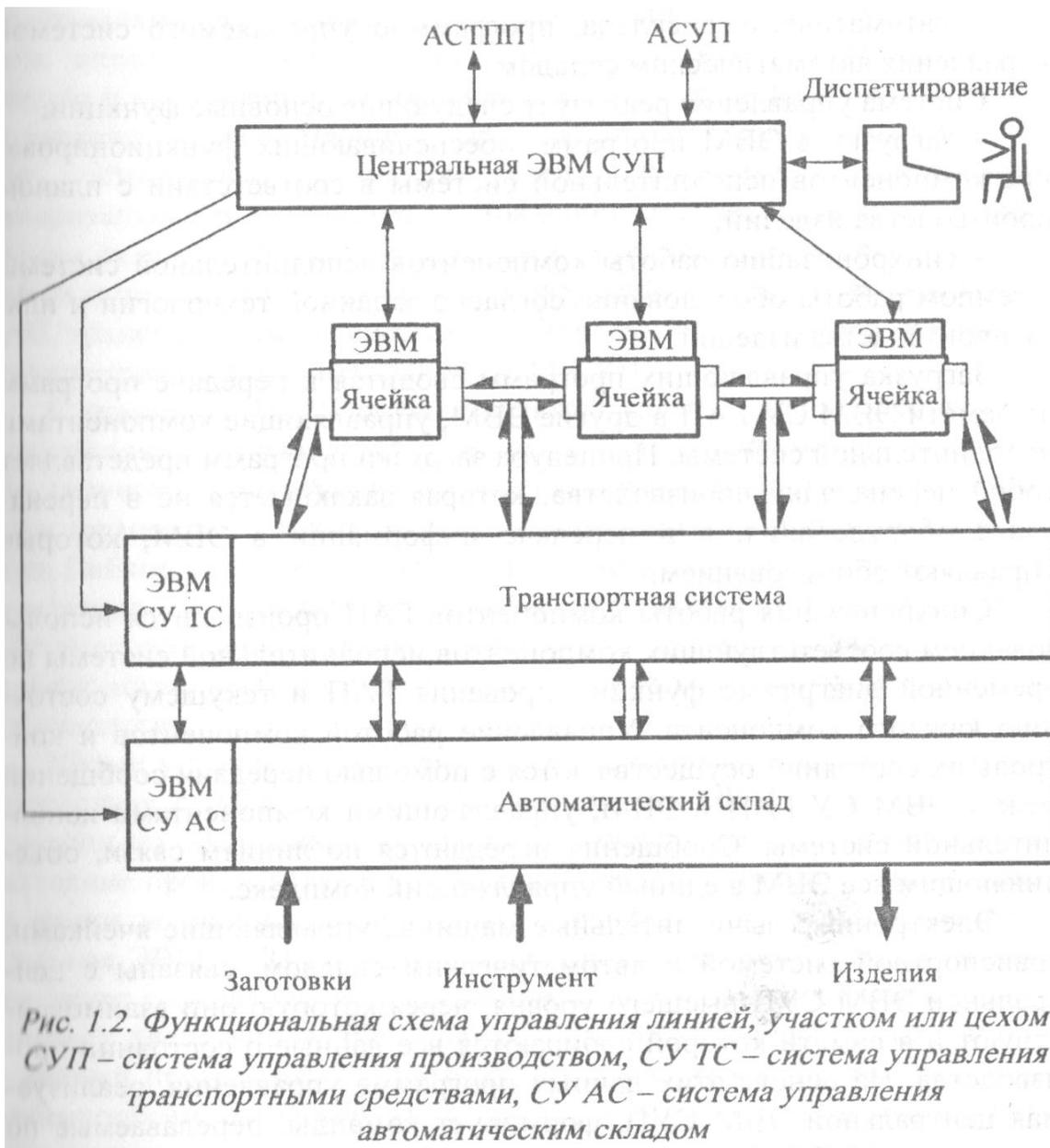
- управление порядком функционирования оборудования;
- формирование данных о нормальном или аварийном завершении операций;
- контроль за исправностью управляющих устройств и управляемого оборудования.

Комплекс самостоятельных единиц оборудования, объединенных так, чтобы было возможно их независимое или параллельное функционирование под управлением одной программы, называется ячейкой ГАП. Как правило, каждой ячейкой производства, транспортной системой и автоматическим складом управляют специальные ЭВМ. Совместное функционирование ячеек, транспорта и склада обеспечивается СУ ГАП, которая включает в себя центральную ЭВМ, управляющую ЭВМ низшего уровня иерархии, аппаратуру для связи с другими ЭВМ и оборудование операторов, контролирующих работу ГАП.

2. Функциональная схема ГАП и СУ производством с уровнями управления.

Функциональная схема СУ ГАП, действующей на уровне линии, участка и цеха, представлена на рис. 1.2.

Управление техническими системами



Здесь материальные потоки, в отличие от информационных, обозначены двойными стрелками.

Исполнительный комплекс состоит из:

- системы ячеек, объединяющей обрабатывающие, контрольно- измерительные и робототехнические модули для реализации заданной технологии;
- транспортной системы, включающей в себя автоматические транспортные средства, и программной системы управления транспортными средствами;
- автоматического склада, программно управляемого системой управления автоматическим складом.

Система управления реализует следующие основные функции:

Управление техническими системами

- загрузку в ЭВМ программ, обеспечивающих функционирование компонентов исполнительной системы в соответствии с планом производства изделий;
- синхронизацию работы компонентов исполнительной системы с темпом работы оборудования согласно заданной технологии и плану производства изделий.

Загрузка управляющих программ сводится к передаче программ из памяти ЭВМ СУ ГАП в другие ЭВМ, управляющие компонентами исполнительной системы. Процедура загрузки программ представляет собой переналадку производства, которая заключается не в переналадке оборудования, а в передаче информации в ЭВМ, которые управляют оборудованием.

Синхронизация работы компонентов ГАП производится использованием соответствующих компонентов исполнительной системы по временной диаграмме функционирования ГАП и текущему состоянию каждого компонента. Управление работой компонентов и контроль их состояний осуществляются с помощью передачи сообщений между ЭВМ СУ ГАП и ЭВМ, управляющими компонентами исполнительной системы. Сообщения передаются по линиям связи, объединяющим все ЭВМ в единый управляющий комплекс.

Электронные вычислительные машины, управляющие ячейками, транспортной системой и автоматическим складом, связаны с центральной ЭВМ СУП высшего уровня, через которую они взаимодействуют и в памяти которой собираются все данные о состоянии производства. На основе этих данных программа управления, реализуемая центральной ЭВМ СУП, формирует команды, передаваемые по линиям связи в ЭВМ нижнего уровня, управляющие конкретным оборудованием. Уменьшение нагрузки на центральную ЭВМ СУП производится за счет передачи данных между ЭВМ одного уровня. Такая связь обеспечивает, например, координацию работы транспортной системы и автоматического склада.

Система управления производством может быть информационно связана с автоматизированной *системой технологической подготовки производства* (АСТПП) и *автоматизированной системой управления производством* (АСУП). С помощью АСТПП выполняется подготовка программ функционирования производства для каждого из изделий, входящих в номенклатуру. Подготовка программ заключается в разработке маршрутов движения заготовок в процессе их обработки между секциями автоматического склада и ячейками линии, участка или цеха; определении состава инструмента для каждого технического участка и

Управление техническими системами

составлении технологического маршрута изделия. На основе технологического маршрута разрабатываются программы управления станками, промышленными роботами, контрольно-измерительными устройствами, транспортной системой и автоматическим складом. Временная диаграмма производства изделия составляется путем определения времени операций, выполняемых ячейками ГАП, транспортными средствами и складом. Исходя из нее, формируется программа для центральной ЭВМ СУП.

С помощью АСУП осуществляются календарное и оперативное и планирование производства, учет продукции и использование производственного оборудования, комплектация производства заготовками и инструментом, а также выдача информации о состоянии производства. Гибкое автоматизированное производство функционирует в соответствии с календарным планом, который составляется АСУП. Система управления производством передает в АСУП данные о ходе производства, необходимые для оперативного планирования и учета производства.

Кроме управления исполнительной системой, обеспечения взаимодействия с АСТПП и АСУП центральная ЭВМ СУП выполняет функции по обслуживанию диспетчера-оператора, контролирующего состояние производства и управляющего им в ситуациях, выходящих за рамки возможностей программ управления. В этом случае центральная ЭВМ СУП принимает команды от человека и на их основе реализует управление оборудованием. Для выполнения функций, связанных с диспетчированием, центральная ЭВМ снабжается соответствующими программами и устройствами ввода-вывода данных, обеспечивающими, например, ввод данных в ЭВМ с клавиатуры диспетчера-оператора и вывод их на дисплей и печатающее устройство.

Система управления производством является многоуровневой системой программного управления на базе ЭВМ. Принципиальная схема управления производством показана на рис. 1.3.

Управление техническими системами

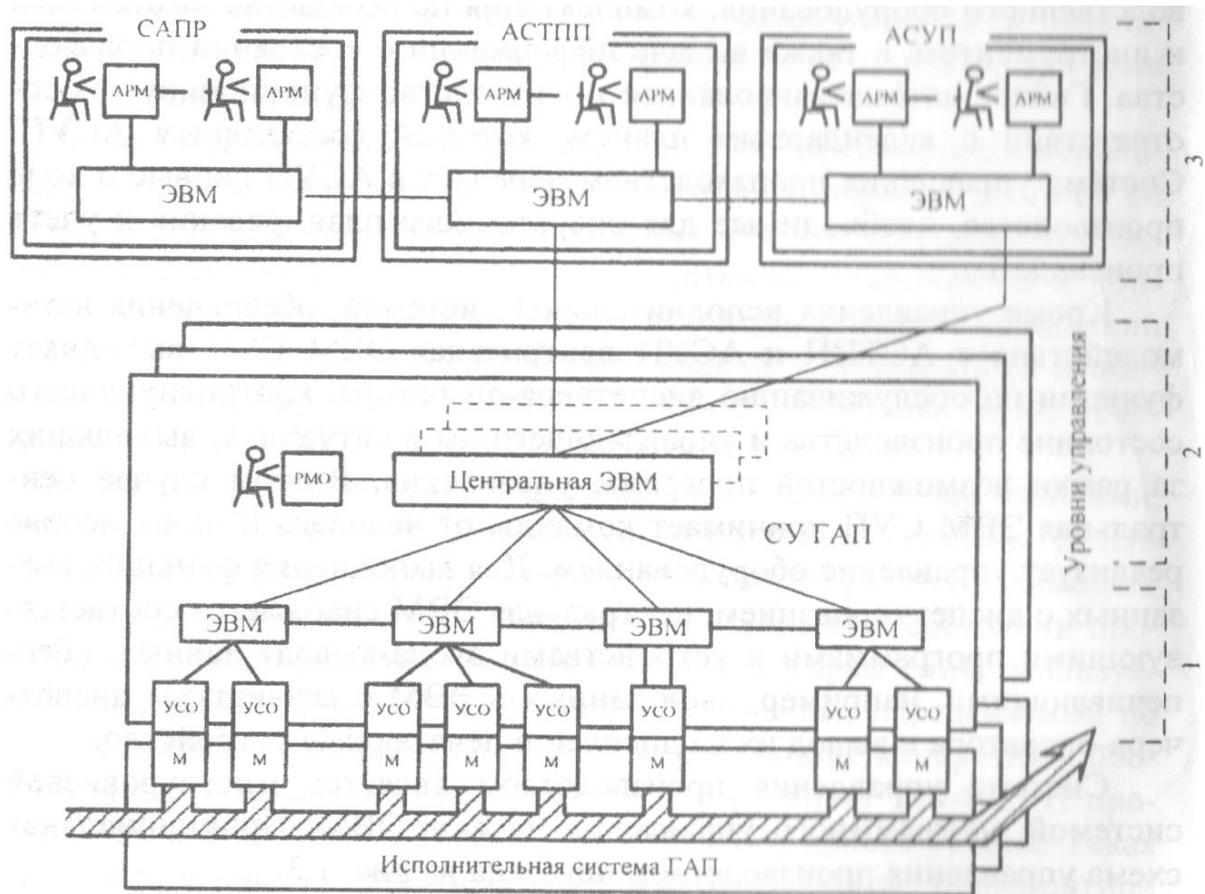


Рис. 1.3. Уровни управления производством
 АРМ – автоматизированное рабочее место; РМО – рабочее место оператора; УСО – устройство сопряжения с объектом, М – модуль исполнительной системы

Исполнительная система представлена в виде совокупности модулей, выполняющих технологические и транспортные операции над материальным потоком. Через устройства сопряжения с объектами ЭВМ управляет модулями.

Первый уровень управления решает задачи управления отдельными компонентами исполнительной системы. Входящие в него ЭВМ могут взаимодействовать между собой для согласования работы соседних модулей.

Второй уровень координирует работу ЭВМ первого уровня и реализуется центральной ЭВМ системы управления линией, участком или цехом. Поскольку линии, участки и цехи материально и организационно взаимосвязаны, они также должны быть информационно взаимосвязаны путем сопряжения своих центральных ЭВМ или через ЭВМ более высокого уровня иерархии.

Третий уровень управления представляем собой ЭВМ АСТПП и ЭВМ АСУП, которые связаны с центральной ЭВМ.

Через них можно оперативно вводит необходимую информацию в виде программ и данных по технологической подготовке производства и по его плановому

Управление техническими системами

управлению. ЭВМ третьего уровня в общем случае включают в себя также ЭВМ САПР.

Современная *автоматизированная система управления технологическим процессом* (АСУТП) представляет собой многоуровневую человеко-машинную систему управления. Создание АСУ сложными технологическими процессами осуществляется с использованием автоматических информационных систем сбора данных и вычислительных комплексов, которые постоянно совершенствуются по мере эволюции технических средств и программного обеспечения.

Непрерывную во времени картину развития АСУТП можно разделить на три этапа, обусловленные появлением качественно новых научных идей и технических средств.

Первый этап отражает внедрение *систем автоматического регулирования* (САР). Объектами управления на этом этапе являются отдельные параметры, установки, агрегаты; решение задач стабилизации, программного управления, слежения переходит от человека к САР. Человек реализует функции расчета задания и параметров настройки регуляторов.

Второй этап - автоматизация технологических процессов. Объектом управления становится рассредоточенная в пространстве система. С помощью *систем автоматического управления* (САУ) реализуются все более сложные законы управления, решаются задачи оптимального и адаптивного управления, проводится идентификация объекта и состояний системы. Характерной особенностью этого этапа является внедрение систем телемеханики в управление технологическими процессами. Человек все больше отдаляется от объекта управления, между объектом и диспетчером выстраивается целый ряд измерительных систем, исполнительных механизмов, средств телемеханики, мнемосхем и других *средств отображения информации* (СОИ).

Третий этап - автоматизированные системы управления технологическими процессами характеризуется внедрением в управление технологическими процессами вычислительной техники. Вначале - применение микропроцессоров, использование на отдельных фазах управления вычислительных систем. Затем активное развитие человеко-машинных систем управления, инженерной психологии, методов и моделей исследования операций и, наконец, диспетчерское управление на основе использования автоматических

Управление техническими системами

информационных систем сбора данных и современных вычислительных комплексов.

Диспетчер в многоуровневой автоматизированной системе управления технологическими процессами получает информацию с монитора ЭВМ или с электронной системы отображения информации и воздействует на объекты, находящиеся от него на значительном расстоянии, с помощью телекоммуникационных систем, контроллеров, интеллектуальных исполнительных механизмов.

3. SCADA-системы

Концепция SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) - диспетчерское управление и сбор данных – позволяет достичь высокого уровня автоматизации в решении задач разработки систем управления, сбора, обработки, передачи, хранения и отображении информации.

Дружественность *человеко-машинной интерфейса* (HMI/MMI), предоставляемого SCADA-системами, полнота и наглядность представляемой на экране информации, удобство пользования подсказками и справочной системой повышает эффективное взаимодействие диспетчера с системой и сводит к нулю его критические ошибки при управлении. В настоящее время SCADA является основным и наиболее перспективным методом автоматизированного управления сложными динамическими системами и процессами.

Многие проекты *автоматизированных систем контроля и управления* (СКУ) для большого спектра областей применения позволяют выделить обобщенную схему их реализации, представленную на рис. 1.4.

Управление техническими системами



Рис. 1.4. Обобщенная схема системы контроля и управления технологическими процессами

Как правило, это двухуровневые системы, так как именно на этих уровнях реализуется непосредственное управление технологическими процессами. Специфика каждой конкретной системы управления определяется используемой на каждом уровне программно-аппаратной платформой.

Нижний уровень - уровень объекта (контроллерный) - включает различные датчики для сбора информации о ходе технологического процесса, электроприводы и исполнительные механизмы для реализации регулирующих и управляющих воздействий. Датчики поставляют информацию локальным программируемым логическим контроллерам PLC (*Programming Logical Controller*), которые могут выполнять следующие функции:

- сбор и обработка информации о параметрах технологического процесса;
- управление электроприводами и другими исполнительными механизмами;
- решение задач автоматического логического управления и др.

Так как информация в контроллерах предварительно обрабатывается и частично используется на месте, существенно снижаются требования к пропускной способности каналов связи.

Управление техническими системами

В качестве локальных PLC в системах контроля и управления различными технологическими процессами в настоящее время применяются контроллеры как отечественного, так и зарубежного производства. На рынке представлены десятки типов контроллеров, способных обрабатывать от нескольких до нескольких сот переменных.

К аппаратно-программным средствам контроллерного уровня управления предъявляются жесткие требования по надежности, времени реакции на исполнительные устройства, датчики и т.д. Программируемые логические контроллеры должны гарантированно откликаться на внешние события, поступающие от объекта, за время, определенное для каждого события. Для критичных с этой точки зрения объектов рекомендуется использовать контроллеры с *операционными системами реального времени* (ОСРВ). Контроллеры под управлением ОСРВ функционируют в режиме жесткого реального времени.

Микро-SCADA - это системы, реализующие стандартные базовые функции, присущие SCADA-системам верхнего уровня, но ориентированные на решение задач автоматизации в определенной отрасли, т.е. узкоспециализированные системы. В противоположность им SCADA-системы верхнего уровня являются универсальными.

Все компоненты системы управления объединены между собой каналами связи. Обеспечение взаимодействия SCADA-систем с локальными контроллерами, контроллерами верхнего уровня, офисными и промышленными сетями возложено на так называемое *коммуникационное программное обеспечение*.

Большой объем информации, непрерывно поступающий с устройств ввода-вывода систем управления, предопределяет наличие в таких системах баз данных (БД). Основная задача баз данных – своевременно обеспечить пользователя всех уровней управления требуемой информацией.

Для специалиста-разработчика системы автоматизации, так же как и для специалиста-технолога, очень важен графический пользовательский интерфейс. Функционально графические интерфейсы SCADA-систем похожи. В каждой из них существует графический объектно-ориентированный редактор с определенным набором анимационных функций. Используемая векторная графика дает возможность осуществлять широкий набор операций над выбранным объектом, а также быстро обновлять изображение на экране, используя средства анимации.

Крайне важен также вопрос о поддержке в рассматриваемых системах стандартных функций GUI (*Graphic Users Interface*), поскольку большинство

Управление техническими системами

SCADA-систем работают под управлением Windows, что и определяет тип используемого GUI.

Система является открытой, если для нее определены и описаны используемые форматы данных и процедурный интерфейс, что позволяет подключить к ней внешние независимо разработанные компоненты.

Современные SCADA-системы не ограничивают выбора аппаратуры нижнего уровня, так как предоставляют большой набор драйверов или серверов ввода-вывода и имеют хорошо развитые средства создания собственных программных модулей или драйверов новых устройств нижнего уровня. Сами драйверы разрабатываются с использованием стандартных языков программирования.

Для организации взаимодействия с контроллерами могут быть использованы следующие аппаратные средства:

- *COM-порты.* В этом случае контроллер или объединенные сетью контроллеры подключаются по протоколам RS-232, RS-422, KS-485.
- *Сетевые платы.* Использование такой аппаратной поддержки возможно, если соответствующие контроллеры снабжены интерфейсным выходом на Ethernet.
- *Вставные платы.* В этом случае протокол взаимодействия определяется платой и может быть уникальным. В настоящее время предлагаются реализации в стандартах ISA, PCI, Compact PCI.

ЛЕКЦИЯ №15

по теме: Станки и системы ЧПУ

1. Состав промышленной технологической системы и оборудование для изготовления заготовок

Промышленная технологическая система имеет следующий состав технических средств:

- оборудование для изготовления заготовок,
- станки токарной группы,
- обрабатывающие центры,
- системы числового программного управления (ЧПУ),
- промышленные роботы (ИР).

Управление техническими системами

Оборудование для изготовления заготовок используется в технологии изготовления изделия, от заготовок до получения готовой детали. Типовыми операциями при изготовлении заготовок корпусных деталей, в частности корпусных деталей для ЭВМ, является

- горячая штамповка,
- радиальная и торцевая раскатка,
- литье.

Одним из наиболее прогрессивных видов формообразования в производстве корпусных деталей из цветных сплавов является литье под давлением. В автоматизированный комплекс литья под давлением входят:

- ❖ машина литья под давлением,
- ❖ раздаточная электропечь,
- ❖ робот для заливки расплавленного металла,
- ❖ устройство смазки пресс-форм,
- ❖ робот для извлечения отливки из пресс-формы,
- ❖ резервуар для охлаждения отливки ,
- ❖ пресс для обработки литников и облоя.

2. Станки токарной группы и системы ЧПУ

Станки токарной группы подразделяются в зависимости от вида крепления заготовки на патронные, центровые и комбинированные патронно-центровые. Для малых производственных площадей целесообразно использование патронных станков с ЧПУ вертикального исполнения. Широко распространен серийный станок с двумя четырехпозиционными суппортами с независимыми перемещениями. Удобство загрузки и установки детали в патрон, постоянство ориентации детали при транспортировании и обработке обуславливают простоту автоматизации этих операций и встраивание станков указанной модели в гибкие автоматизированные комплексы.

Патронно-центровые станки эффективно используются на опытных производствах с часто меняющейся номенклатурой изделий. Применение патронно-центровых станков несколько увеличивает производственные площади, но повышает универсальность из-за возможности обработки широкой номенклатуры деталей.

Обработывающие центры являются станками сверлильно- фрезерно-расточной группы для обработки корпусных и плоскостных деталей. Они обладают возможностью автоматизации смены инструмента и деталей, а также

Управление техническими системами

осуществления автоматического контроля обрабатываемых деталей. Примером обрабатывающего центра является многоцелевой горизонтальный сверлильно-фрезерно-расточный станок, показанный на рис. 2.1.

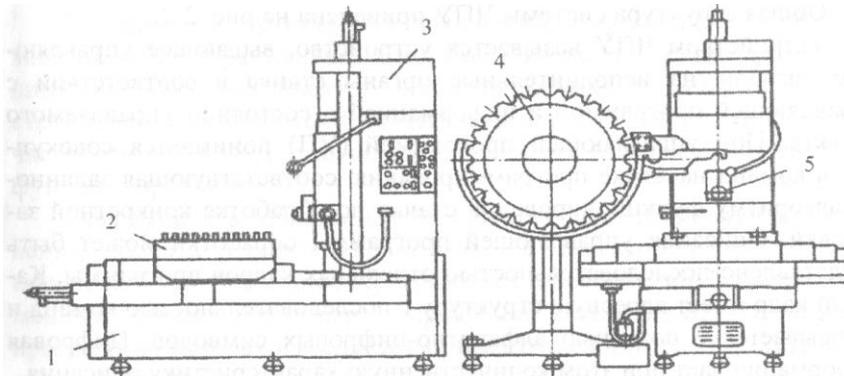


Рис. 2.1. Многоцелевой горизонтальный сверлильно-фрезерно-расточный станок:
1 – основание; 2 – стол; 3 – шпиндельная бабка; 4 – инструментальный магазин; 5 – шпиндель

Этот станок предназначен для комплексной обработки корпусных деталей средних размеров с четырех сторон без переустановки. Размеры деталей ограничены рабочей поверхностью стола. На станке можно производить фрезерование плоскостей, пазов и криволинейных поверхностей концевыми, торцевыми и дисковыми фрезами, а также выполнять операции растачивания, сверления, зенкерования и нарезания резьбы метчиками.

Для автоматической установки инструмента по углу и получения возможности нарезания резьбы резцом станок оснащен устройством для контроля угла поворота. Расширение технологических возможностей станка достигается за счет поворотного стола, точность которого позволяет обрабатывать соосные отверстия консольным инструментом. Устройство для автоматической смены инструмента содержит инструментальный магазин на несколько десятков позиций. Важной характеристикой станка является минимальное время разгона и торможения привода подач, находящееся в пределах 0,2 с. Это обеспечивает высокую производительность станка.

Системы ЧПУ позволяют осуществлять выполнение технологической операции по заранее определенной программе, заданной в цифровой форме.

Системой ЧПУ называется совокупность функционально взаимосвязанных и взаимодействующих технических и программных средств, обеспечивающих числовое программное управление объектом управления, например станком.

Общая структура системы ЧПУ прицелена на рис. 2.2

Управление техническими системами

Устройством ЧПУ называется устройство, выдающее управляющие сигналы на исполнительные органы станка в соответствии с управляющей программой и информацией о состоянии управляемого объекта. Под управляющей программой (УП) понимается совокупность команд на языке программирования, соответствующий заданному алгоритму функционирования станка по обработке заготовки. Описание управляющей программы может быть представлено последовательностью отдельных кадров программы. Каждый кадр имеет адресную структуру с последовательным набором команд и записывается с помощью алфавитно-цифровых символов. Цифровая информация дает при этом количественную характеристику описания.

Устройства ЧПУ выпускаются в виде номенклатурно-технических рядов, характеризующихся числом каналов управления приводами, типом управляемых приводов перемещений и используемых в них датчиков, объемом информации обмена со станком и конструктивным исполнением.

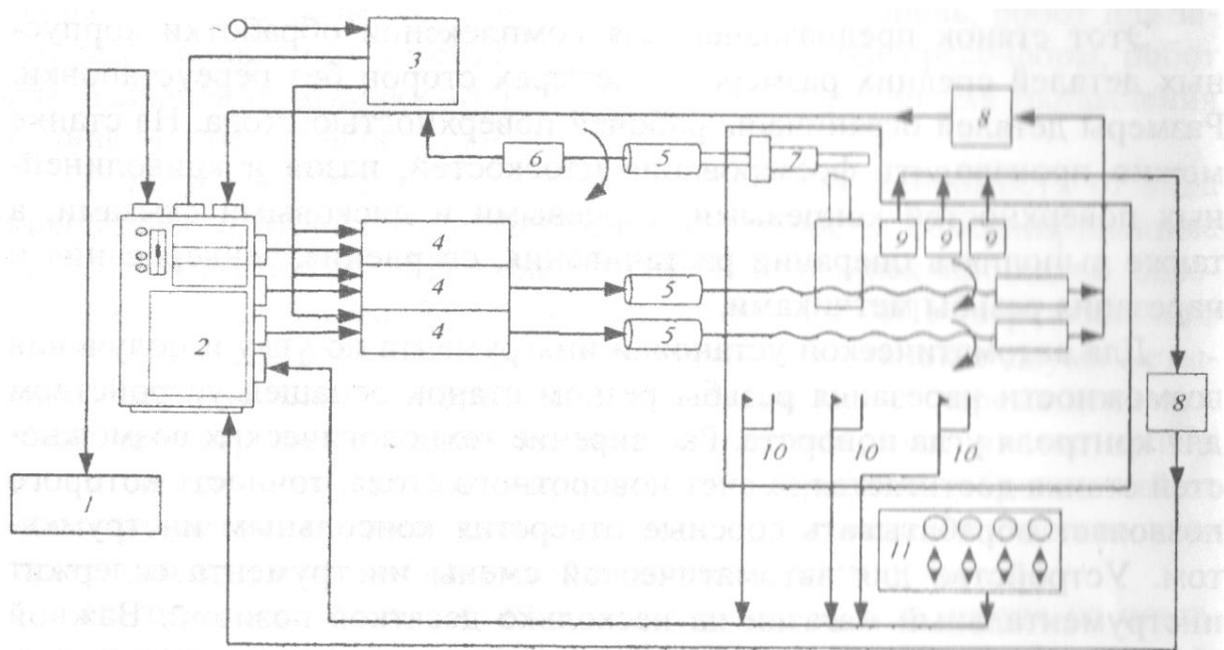


Рис. 2.2. Общая структура системы ЧПУ;

1 - аппаратура связи с ЭВМ верхнего ранга, периферийные устройства ввода-вывода данных; 2 - устройство ЧПУ; 3 станция питания и другие вспомогательные узлы; 4 - блок управления двигателями подачи;

5 - двигатели приводов подачи и привода главного движения;

6 - измерительные преобразователи перемещений рабочих органов станка; 7 - кинематическая система станка; 8 - нормирующие и согласующие блоки измерительных каналов;

9 - измерительные датчики параметров

Управление техническими системами

технологического процесса; 10 - сигнальные датчики фиксированных положений рабочих органов; 11- рабочие органы пульта управления станка

Унификация системы ЧПУ для разных технологических объектов экономически эффективна. Системы, обеспечивающие управление широким классом объектов, называются многоцелевыми. Перенастройка многоцелевых систем ЧПУ для нового объекта управления, в частности для нового станка, обеспечивается изменением алгоритмов функционирования.

Совокупность программ, отражающих алгоритмы функционирования объекта управления, называется *системным программным обеспечением*. Системное программное обеспечение остается неизменным для данного объекта управления в отличие от управляющей программы, которая изменяется при изготовлении разных деталей на одном и том же объекте.

Существует несколько поколений систем ЧПУ. Системы первого поколения наиболее просты. К ним относятся системы ЧПУ, работавшие от магнитной ленты по управляющей программе. Для этих систем характерно промежуточное преобразование закодированной управляющей программы в виде числовых массивов на перфоленте в непрерывную программу на магнитной ленте. Это преобразование выполняется на специальном централизованном интерполяторе, который не совмещен со станком. Система управления станка воспроизводит только запись с магнитной ленты. Отсюда следует основной недостаток таких систем, заключающийся в невозможности коррекции управляющей программы непосредственно у станка, а также удлинённый цикл технологической подготовки производства, обусловленный наличием дополнительного программносителя в виде магнитной ленты.

Ко второму поколению относятся системы со структурой *NC (Numerical Control)*. Название структуры образовано из первых букв английского эквивалента выражения "числовое управление". Эта система обеспечивает работу станка от управляющей программы, закодированной на восьмидорожечной перфоленте. Характерной чертой структур типа *NC* является аппаратная реализация функциональных узлов системы, приводящая к низкому уровню унификации и соответственно к большому разнообразию типов устройств ЧПУ. Отсутствие при этом оперативной памяти обуславливает жесткость алгоритмов функционирования, а необходимость обращения к программносителю на перфоленте в каждом кадре уменьшает надежность системы.

Управление техническими системами

В третьем поколении систем ЧПУ была повышена унификация и гибкость за счет использования структур типа CNC (*Computer Numerical Control*), что означает "числовое управление на основе ЭВМ". Эта структура соответствует многоцелевым перепрограммируемым системам ЧПУ, которые приспособливают управляющую ЭВМ для решения задач систем ЧПУ. В качестве программируемого преобразователя здесь выступает процессор, включающий себя арифметико-логическое устройство и устройство управления.

Хранение информации осуществляется в оперативном запоминающем устройстве, постоянном запоминающем устройстве и полупостоянном запоминающем устройстве, а также во внешних устройствах. Управление технологическим процессом осуществляется по меткам реального времени, которые формируются таймером. Связь между блоками системы и технологическим объектом организуется через интерфейсные шины, а связь с внешними устройствами – через контроллер обмена. Согласование управления процессами во всех блоках реализуется устройством управления. Обмен информацией с технологическим объектом производится через шипы местного интерфейса. Типичными узлами связи с технологическим оборудованием являются многоканальные аналого-цифровые преобразователи, цифроаналоговые преобразователи, а также узлы приема и вывода цифровых сигналов в виде кодов.

Высокий уровень унификации систем типа CNC достигается за счет использования таких свойств управляющей вычислительной техники, как программируемость и агрегируемость. **Программируемость** позволяет редактировать управляющую программу у станка и без конструктивных вмешательств изменять алгоритмы функционирования системы. **Агрегируемость** позволяет использовать эти системы для управления самым различным оборудованием, что характеризует их как многоцелевые.

Еще большее развитие функциональных возможностей проявляется в системах ЧПУ типа DNC (*Direct Numerical Control*), что означает "прямое числовое управление". С помощью этих систем можно управлять напрямую от ЭВМ целой группой станков. В памяти ЭВМ находятся управляющие программы деталей, изготавливаемых на этих станках. Однако одноуровневые системы типа DNC не являются эффективными из-за возможности сбоя работы всех станков при отказе ЭВМ. Оптимальными в смысле эффективности являются двухуровневые системы типа DNC с ЭВМ на верхнем уровне и с системами ЧПУ типа CNC на нижнем.

Управление техническими системами

Каждым технологическим объектом управляет собственная система типа *CNC*, а работу всех систем организует одна ЭВМ.

Принципиальным отличием систем *DNC* является отсутствие перфоленты в системах ЧПУ нижнего уровня, что позволяет передавать управляющие программы по линиям связи между верхним и нижним уровнями без участия человека. Таким образом, системы ЧПУ типа *DNC* в наибольшей степени удовлетворяют следующим требованиям, предъявляемым к системам управления в условиях гибких автоматизированных производств:

- возможность программирования без конструктивных изменений различных законов управления с хранением системного программного обеспечения в оперативной памяти;
- энергонезависимость, обеспечивающая хранение системного программного обеспечения и накопленных необходимых массивов информации;
- помехоустойчивость, позволяющая управлять технологическим оборудованием, вызывающим высокий уровень помех;
- многокоординатное и многопараметрическое управление при возможности агрегатирования средств сопряжения;
- обеспечение требуемой производительности и точности управления, а также достаточного ресурса памяти.

Основные задачи систем ЧПУ в условиях гибкого автоматизированного производства можно сформулировать следующим образом:

1. Ввод и хранение системного программного обеспечения и управляющей программы. Ввод информации может производиться по каналу связи с ЭВМ верхнего уровня.
2. Реализация циклов - выделение повторяющихся участков программы для ее сокращения. Фиксированные циклы характерны для определенных технологических операций, встречающихся при изготовлении многих изделий, например при сверлении. Программные технологические циклы соответствуют повторяющимся участкам данного изделия.
3. Интерпретация кадра - проведение предварительных процедур для отработки очередного кадра программы с целью обеспечения непрерывности управления.
4. Интерполяция - получение с требуемой точностью координат промежуточных точек траектории движения по координатам крайних точек и заданной функции интерполяции.

Управление техническими системами

5. Управление приводами подач - организация цифровых позиционных следящих систем для каждой координаты движения. На вход системы управления приводами поступают коды, зависящие от результатов интерполяции. Этим кодам соответствует определенное перемещение по координате.
6. Коррекция на размеры инструментов - смещение координат при коррекции управляющей программы на длину инструмента или формирование эквидистантных траекторий при учете фактического радиуса инструмента.
7. Логическое управление - управление технологическими узлами дискретного действия, входные сигналы которых производят релейные операции.
8. Смена инструмента — поиск гнезда магазина с требуемым инструментом и замена отработавшего инструмент на новый.
9. Адаптивное управление – организация обратной связи с помощью датчиков непосредственно от изготавливаемого изделия для повышения качества его обработки.
10. Автоматический встроенный контроль – установка датчиков контроля в зоне обработки изделия.

Приведенный перечень задач может быть дополнен задачами обмена информацией с сопрягаемыми устройствами.

Все задачи определяют необходимость развития многоцелевых систем ЧПУ, обладающих свойствами унификации и гибкости. Основным способом реализации задач является программный, при котором решаемой задаче ставится в соответствие не конструктивный, а программный модуль, являющийся частью системного программного обеспечения и хранящийся в памяти.

Смена инструмента может реализовываться по схеме, представленной на рис. 2.3.

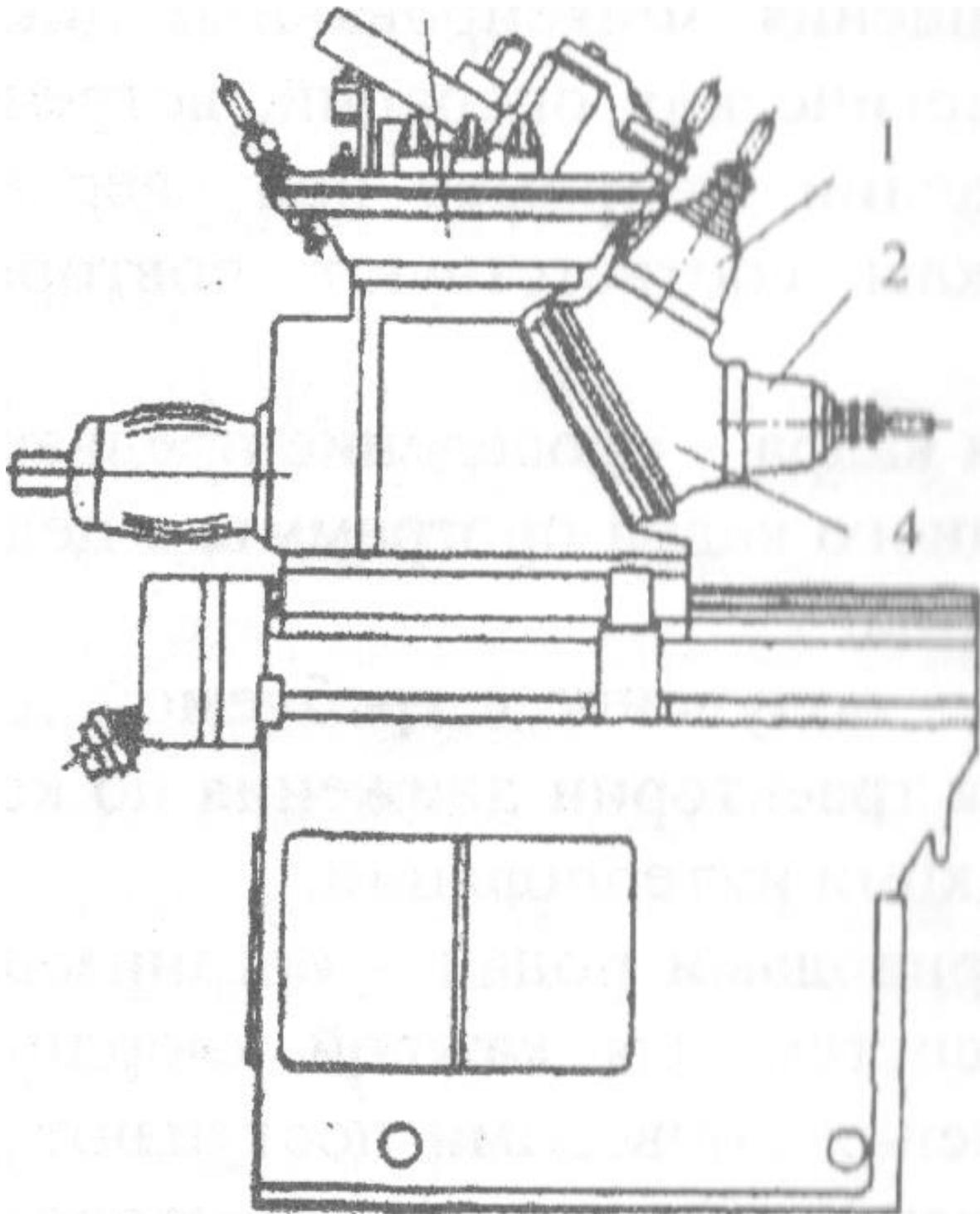


Рис. 2.3. Схема смены инструмента 1 - магазин, 2 - инструментальная оправка, 3 - ось шпинделя станка, 4 - барабан

Магазин расположен на корпусе шпиндельной бабки так, что при транспортировании инструментальной оправки в зону перегрузки ее ось совмещается с осью шпинделя станка. При перемещении шпиндельной каретки оправка захватывается и зажимается в шпинделе. При дальнейшем движении шпинделя вдоль оси оправка освобождается из захватов магазина, после чего включается привод шпинделя и выполняется операция обработки заготовки.

Управление техническими системами

Время смены инструмента в механизмах таких конструкций складывается из времени поиска заданного инструмента, захвата шпинделем и выталкивания из магазина инструментальной оправки и ее установки в магазин после выполнения операции обработки детали.

Для сокращения времени смены инструмента используют двухшпindelную поворотную головку (рис. 2.4).

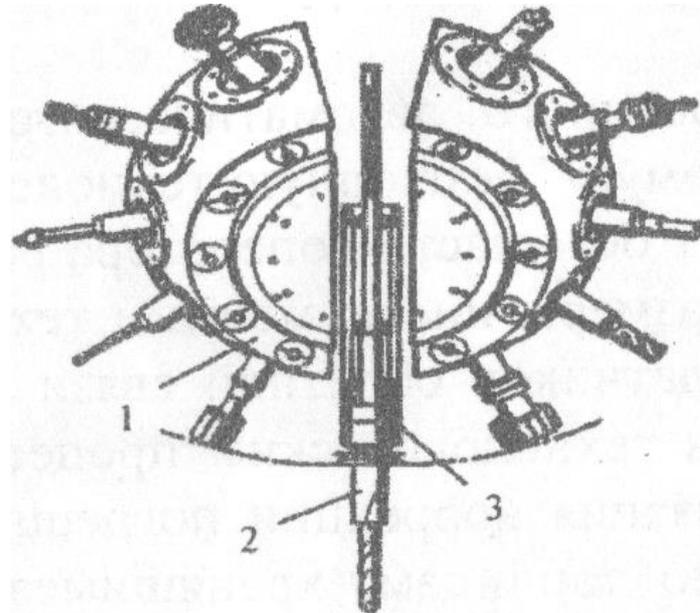


Рис. 2.4. Двухшпindelная поворотная головка: 1 - барабан, 2 - инструмент, 3 - магазин

Загрузка инструмента из магазина осуществляется, в то время как шпинделем производится обработка детали. Затем барабан поворачивается, и шпиндели меняются местами. Время смены инструмента определяется временем поворота барабана на 180° и его зажима.

Для обработки крупногабаритных изделий используют схему с закрепленным объектом обработки и подвижным инструментом. Пример обработки корпусных деталей по такой схеме приведен на рис. 2.5.

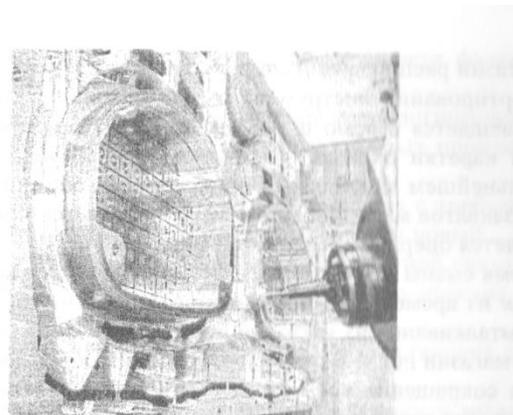


Рис. 2.5. Пример обработки крупногабаритного изделия

Организация встроенного автоматического контроля ускоряет переход на так называемую "безлюдную технологию". Контроль в зоне обработки позволяет без участия оператора решать задачи базирования, коррекции на размеры инструмента и технической диагностики. Расширение сети датчиков обратной связи от объекта позволит более гибко управлять технологическим процессом. Перспективной является также организация коррекции погрешностей механических узлов оборудования по таблицам, хранящимся в памяти системы ЧПУ. Формирование таблиц может быть автоматизировано за счет средств встроенного контроля.

Безотказность систем ЧПУ можно повысить как общим улучшением качества средств автоматики, так и совершенствованием организации систем. Иерархические системы производят обмен информацией между уровнями через унифицированные системы сопряжения — *интерфейсы*.

В соответствии с формой передачи данных интерфейсы подразделяют на параллельные, последовательно-параллельные и последовательные. При передаче данных параллельным или последовательно- параллельным способами сигналы в приемное устройство поступают не одновременно, что обусловлено разбросом параметров шин сопряжения и формирующих схем. Это может привести к ошибкам в считывании информации, поэтому предпочтение отдают последовательным интерфейсам, так как исключается указанный недостаток. Однако они характеризуются меньшей скоростью обмена.

Большое значение имеет эффективность каналов и линий связи между терминальными системами ЧПУ и ЭВМ верхнего уровня. Перспективным является применение оптических линий связи, обладающих высокой помехоустойчивостью.

В последнее время в области ЧПУ произошли изменения, затрагивающие функциональные возможности, аппаратную платформу и системные средства, архитектуру и состав прикладного математического обеспечения. Доминирующие позиции заняла концепция открытых систем ЧПУ - PCNC (*Personal Computer Numerical Control*), построенных на базе персонального компьютера.

Пример PCNC станка для лазерной обработки деталей приведен на рис. 2.6.

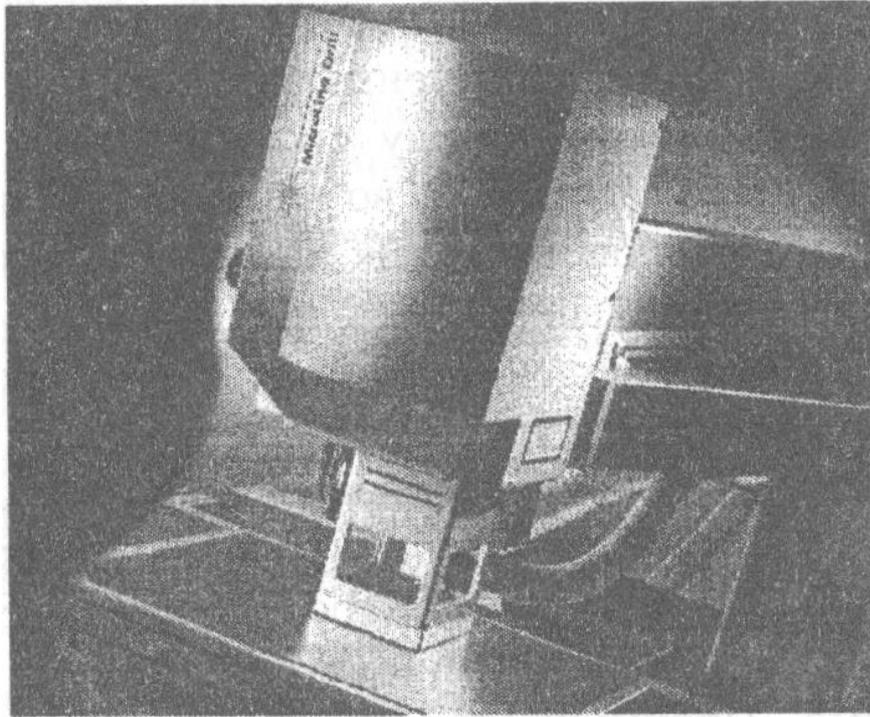


Рис. 2.6. PCNC - станок для лазерной обработки деталей

Гибкие и сложные системы ЧПУ с открытой архитектурой выполняют согласно двухкомпьютерной архитектурной модели. По мере роста вычислительной мощности компьютеров все более используемым становится однокомпьютерный вариант.

Двухкомпьютерная модель предполагает размещение PC- подсистемы на одном компьютере, а NC-подсистемы - на другом. В PC-подсистеме наиболее целесообразна операционная система Windows NT, а в NC-подсистеме - операционная система реального времени UNIX. Обе операционные системы совместимы в том смысле, что поддерживают коммуникационные протоколы TCP/IP, и это позволяет построить коммуникационную среду, объединяющую подсистемы. Включение в эту среду прикладного уровня с многочисленными функциями доступа к интерфейсам модулей создает виртуальную шину, оказывающую услуги доступа на низком уровне. Объектная надстройка в шине формирует глобальный сервер, т.е. единую для обеих подсистем объектно-ориентированную магистраль.

Одно компьютерная модель предполагает использование традиционного компьютера, оснащенного дополнительными контроллерами для связи с мехатронными объектами управления. В их числе могут быть: контроллер следящих приводов, программируемый контроллер PLC (*Programmable Logic*

Управление техническими системами

Controller), специальные устройства для управления технологическими процессами и др. В качестве операционной может быть использована система Windows NT, которая, однако, не является системой реального времени и в этой связи требует соответствующего расширения. Система RTX модифицирует слой HAL (*Hardware Abstraction Layer*) операционной системы Windows NT и дополняет его диспетчером потоков реального времени.

Современные принципы построения архитектуры ЧПУ заключаются в четком разграничении между системными, прикладными и коммуникационными компонентами, возможности независимого развития любого из этих компонентов, как на основе оригинальных разработок, так и путем встраивания покупных программных систем, а также в организации взаимодействия подсистем "клиент-сервер" и стандартизации интерфейсов и транзакций.

В настоящее время наиболее универсальными являются открытые системы ЧПУ, подсистемы которой (включая интерфейс оператора Motion Control и контроллер электроавтоматики SoftPLC) стали полностью программно-реализованными на единой компьютерной Windows-платформе. Преимущества программной реализации подсистемы формообразования объединились с достоинствами цифровых следящих приводов.

Эволюция цифрового привода привела к созданию *интеллектуальных цифровых приводов*, обеспечивающих повышенные скорость и точность. Для их использования необходим быстродействующий цифровой стандартный интерфейс, который обеспечивал бы возможность подключения приводов от любых производителей. Всем этим требованиям отвечает SERCOS - интерфейс (*Serial Realtime Communication System*) для цифровых следящих приводов, который стал базой международного стандарта IEC 61491 и европейского стандарта EN 61491 для систем ЧПУ.

Каждая координатная ось управляется циклическими командами, генерируемыми интерполятором системы управления. При этом обеспечиваются высокая точность отдельной оси и совокупная точность интерполируемого движения. Обработка сигналов интеллектуального цифрового привода выполняется при помощи микроконтроллера. Микроконтроллер способен не только осуществлять традиционное управление моментом и скоростью подачи, но и выполнять тонкую интерполяцию и позиционное управление с исключительно коротким вычислительным циклом. В сравнении с традиционными приводами достигается

Управление техническими системами

максимально высокая точность, причем различие особенно заметно при высоких скоростях подачи.

Цифровые приводы работают циклически, а циклом является интерполяционный цикл системы ЧПУ. В каждом цикле значения переменных обновляются для каждого привода. Цифровой интерфейс должен обеспечить синхронизацию циклов контроллера и следящих приводов. Такая синхронизация осуществляется с микросекундной точностью, поскольку оказывает влияние на взаимную координацию приводов и одновременное выполнение команд. SERCOS интерфейс осуществляет синхронизацию для любого количества следящих приводов. Отдельные следящие приводы объединяются по своим входам в "кольцо" при помощи оптоволоконного кабеля.

Для унифицированного доступа к следующему поколению станков с ЧПУ, имеющих Web-доступ, используют язык XML, программное обеспечение управления движением XMC, OMAC-схемы (*Open Modular Architecture for Controllers*) и протокол SOAP (*Simple Object Access Protocol*). Структура такого доступа приведена на рис. 2.7.



Рис. 2.7. Структура Web-доступа к системам с ЧПУ

При этом реализуется концепция взаимодействия оборудования в рамках всего жизненного цикла производства изделий с использованием MES-систем (*Manufacturing Enterprise Solutions*).

MES-система - это автоматизированная система управления и оптимизации производственной деятельности, которая в режиме реального времени инициирует, отслеживает, оптимизирует и документирует производственные процессы от начала выполнения заказа до выпуска готовой продукции.

Управление техническими системами

Для осуществления принципа “проектирование и производство в любом месте” (design anywhere, build anywhere) создана архитектура системы ЧПУ для ОС Windows типа GNC (Generative Numerical Control) - интеллектуальная система ЧПУ.

В ряде производств, включая автомобильную промышленность, используется концепция, согласно которой станок с ЧПУ становится узлом корпоративной Web-сети. Наибольшую эффективность OMAC API имеет в Web-домене коллективно используемых станков с ЧПУ. Функции OMAC API конвертируются в язык Internet. Центральным элементом в этой архитектуре служит программный компонент - Windows-расширение XMC (extension for Motion Control) для каждого конкретного станка с ЧПУ. Следовательно, XMC размещается между OMAC API и станком с ЧПУ. XMC-XML система использует OMAC XML схемы и SOAP протокол, чтобы создать гомогенную информационную структуру над системами ЧПУ от разных производителей. Единственным ограничением служит обязательное использование ОС Windows в интерфейсе оператора.

Многочисленные пользователи устанавливает дополнительное оборудование, чтобы сделать традиционные системы ЧПУ открытыми. Как правило, в обновлении механической части станков нет нужды, а существенные улучшения могут быть достигнуты путем дооснащения станков с ЧПУ внешним одноплатным компьютером MTIB (*Machine Tool Interface Board*). Цель состоит в превращении системы ЧПУ в узел корпоративной сети, использующий OMAC XML схемы как стандартный универсальный язык ЧПУ. Система ЧПУ становится Web-сервером, который получает, разделяет и распространяет информацию по всему предприятию. XML используется для распространения информации в пределах и за пределами предприятия.

Другая тенденция в развитии современных систем ЧПУ состоит в создании STEP-NC интерфейса. В рамках этой тенденции работает система ЧПУ типа STEP-NC (STEP-NC-CNC), которая получает STEP-NC данные, распознает их и не нуждается в дополнительных инструкциях для выполнения задания.

Фаза активного развития STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*) приходится на начало 90-х годов. Для описания форматов данных был создан язык EXPRES, а для графического представления — язык EXPRES-G. STEP-NC унаследовал использование этих языков.

Параллельно с программной индустрией качественные изменения произошли и в области моделирования и представления данных. Во-первых, появился

Управление техническими системами

графический язык моделирования UML (*Unified Modeling Language*) ISO 19501, ставший стандартом для визуализации, спецификации, конструирования и документирования систем, в которых ключевая роль принадлежит программному обеспечению. Во-вторых, появился стандарт разметки документов - расширяемый язык разметки XML (*extensible Markup Language*). Формат XML для компьютерных документов достаточно гибок, и его можно приспособить для самых разнообразных сфер деятельности. XML определяет общие правила синтаксиса, используемые для разметки данных при помощи простых доступных для чтения тегов.

Сегодня около 80% разработчиков на фирмах, производящих системы ЧПУ, связаны с программным обеспечением, и лишь 20% занимаются аппаратурой. Это и определяет долю программного обеспечения в современной системе ЧПУ.

Стандарт ISO 14649 предоставляет системе ЧПУ обширную связанную информацию, включающую четыре раздела:

- описание задач управления,
- технологическая информация,
- описание инструмента,
- геометрическое описание.

Раздел задач представляет собой логическую последовательность выполняемых блоков и типов данных. Детали каждого шага операции описаны в разделе технологической информации; причем они связаны отношениями с описанием инструмента и геометрическим описанием.

Важнейшим элементом технологического процесса служат типовые формы "*features*" которые определяют области удаляемого материала заготовки, а их внешний вид является частью внешнего вида изделия "*workpiece*". Типовые формы задают параметрически или в виде совокупности образующей и направляющей. Особый случай представляют поверхности свободной формы, для которых определяют область, в пределах которой поверхность свободной формы размещается.

Системы ЧПУ, воспринимающие стандарт STEP-NC (ISO 14649), могут относиться к одному из трех типов. Первый базируется на традиционном использовании G-кодов (ISO 6983), т.е. построен на основе обычной системы ЧПУ без каких-либо внутренних изменений. Управляющие программы ISO 14649 конвертируются в формат ISO 6983 на уровне постпроцессирования.

Управление техническими системами

Второй тип имеет встроенный интерпретатор ISO 14649, который интерпретирует управляющие программы самостоятельно. При этом какие-либо функции искусственного интеллекта отсутствуют. Третий тип (со встроенной системой искусственного интеллекта) является полномасштабным вариантом STEP-NC-CNC, располагающим следующими возможностями:

- реализация интеллектуальных сетевых функций системы ЧПУ, поддерживающих цепочку CAD-CAM-CNC, выполненную на основе модели ISO 14649;
- полная автоматизация цикла от наладки до измерения;
- возможность автономного управления объектом.

Управляющие программы ISO 14649 содержат самые разнообразные данные. Используя подобные данные, система ЧПУ способна генерировать траектории инструмента в соответствии с текущей цеховой ситуацией, а также самостоятельно составлять планы операции и адекватно реагировать на непредвиденные события.

Лекция №16

по теме: Промышленные роботы и робототехнические системы

1. Промышленные роботы и роботизированные технологические комплексы

Наиболее универсальным оборудованием, обеспечивающим гибкость автоматизированных производств, являются промышленные роботы (ПР).

Промышленный робот - это автоматическая машина, стационарная или мобильная, состоящая из исполнительного устройства в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности, и перепрограммируемого устройства программного управления для выполнения двигательных и управляющих функций в производственном процессе.

Манипулятор — управляемое устройство для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объектов в пространстве, оснащенное рабочим органом, предназначенным для

Управление техническими системами

непосредственного выполнения технологических операций и (или) вспомогательных переходов.

В данном определении под *перепрограммируемостью* понимается такое свойство ПР, как замена управляющей программы автоматически или при помощи человека-оператора. К перепрограммированию относится изменение последовательности и (или) значений перемещений по степеням подвижности, а также управляющих функций с помощью средств управления на пульте устройства управления.

Структурная схема ПР, основные элементы конструкции и виды движений рабочих органов приведены на рис. 2.8.

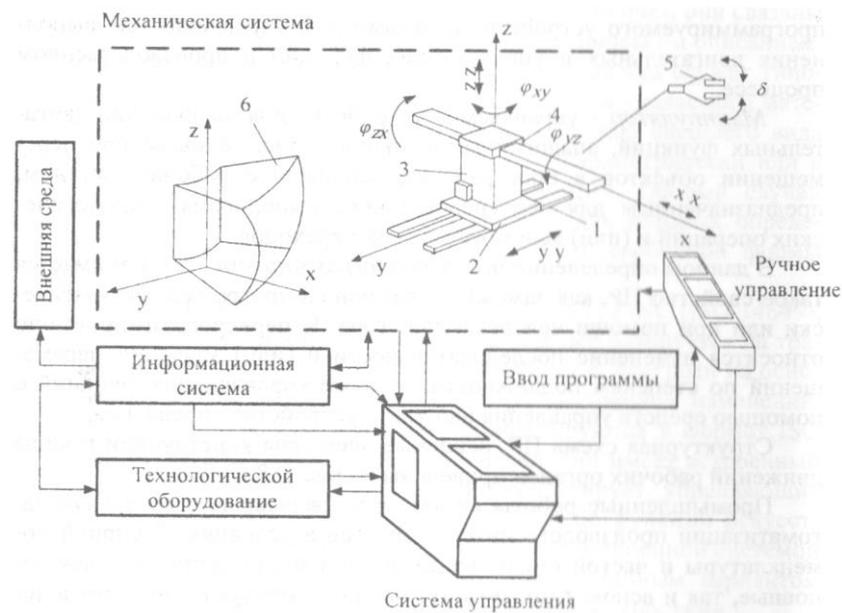


Рис. 2.8. Структурная схема промышленного робота

1 - путепровод; 2 - основание; 3 - корпус; 4 - манипулятор;

5 - захватное устройство; 6 - рабочая зона и система координат основных движений ПР; xx - направление движения манипулятора вдоль продольной оси; yy - направление движения корпуса робота по путепроводу; zz - направление движения манипулятора вверх-вниз; φ_{xy} - угол поворота корпуса робота вокруг вертикальной оси, φ_{zx} - угол поворота руки в вертикальной плоскости; φ_{yz} - угол поворота захвата относительно оси xx , δ - направление движения захвата детали

Промышленные роботы являются универсальным средством автоматизации производственных процессов в условиях обширной номенклатуры и частой смены изделий. Они могут выполнять как основные, так и вспомогательные операции по обслуживанию технологического оборудования.

Управление техническими системами

На базе ПР создаются *роботизированные технологические комплексы* (РТК), являющиеся совокупностью единицы технологического оборудования, ПР и средств оснащения, которые функционируют автономно и осуществляют многократные циклы.

Средствами оснащения РТК могут быть устройства накопления, ориентации, поштучной выдачи объектов производства и другие устройства, обеспечивающие функционирование РТК.

При обслуживании основного технологического оборудования ПР осуществляют такие операции, как загрузка и разгрузка деталей, контроль, смена инструментов, уборка отходов, установка и смена средств контроля в автоматическом режиме. Широко распространено применение ПР для обслуживания складского оборудования. В транспортных системах ПР могут выполнять самостоятельные операции по перемещению и накоплению грузов, а также по обслуживанию конвейерных линий.

К ПР предъявляются следующие основные требования:

- проведение работы в автоматическом режиме при осуществлении как основных, так и вспомогательных операций;
- автоматическая перенастройка по управляющим командам при смене предметов производства;
- соответствие уровня ПР типу выполняемых работ и рациональное сочетание сложности ПР со сложностью специального оборудования и оснащения, обеспечивающего его работу в автоматическом режиме;
- сопрягаемость ПР по механической части, приводам и устройствам управления с оборудованием, в составе которого они будут работать;
- наличие выходов на основное технологическое оборудование и оснащение, а также на верхние уровни управления;
- надежность функционирования.

Для достижения надежности технологических систем с ПР необходимо применять резервирование и диагностику состояния отдельных составляющих или систем в целом.

Перед принятием решения о целесообразности использования конкретного ПР в данном технологическом процессе производится технико-экономический анализ и оценка различных вариантов применения ПР.

При выборе ПР для включения в систему ГАП используется техническая классификация промышленных роботов, в основу которой положено деление ПР

Управление техническими системами

по функциям, особенностям элементов и групп роботов. Схема технологической классификации ПР представлена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Схема технологической классификации промышленных роботов

Группы	Общее исполнение							
	Подвижность	Грузоподъемность	Число манипуляторов	Система координат	Тип приводов	Исполнение	Точность позиционирования	
А	Неподвижный	Сверхлегкие (до 1 кг)	1	Прямоугольная	Пневматический	Нормальное	Малая (ниже 1 мм)	
Б	Подвижный напольный	Легкие (1–10 кг)	2	Цилиндрическая	Гидравлический	Пылезащитное	Средняя (0,1–1 мм)	
В	Подвижный подвесной	Средние (10–100 кг)	Многоманипуляторный	Сферическая	Электромеханический	Теплозащитное	Высокая (выше 0,1 мм)	
Г	Подвижный вертикального перемещения	Тяжелые (свыше 100 кг)	-	Комбинированная	Комбинированный	Пожаро- и взрывобезопасное	-	
Группы	Подвижность				Управляемость			
	Степень универсальности	Степень подвижности	Ход манипуляторов	Быстродействие	Тип управления	Метод программирования	Объем памяти	Число внешних команд
А	Специальный	Малая (с числом степеней до 3)	Малый (до 300 мм)	Малое (линейная скорость до 0,5 м/с)	Цикловое программное	Обучением ручное, полуавтоматическое, автоматическое	Малый (менее 100 кадров)	Малое (до 15)
Б	Специализированный	Средняя (4–6)	Средний (300–1000 мм)	Среднее (0,5–1 м/с)	Позиционно-программное	Аналитическое: автоматический расчет программ	Средний (100–600)	Среднее (15–60)
В	Универсальный	Высокая (6 и более)	Большой (свыше 1000 мм)	Большое (свыше 1 м/с)	Контурное программное	Самообучением с участием оператора, в процессе работы	Большой (свыше 600)	Большое (свыше 60)
Г	-	-	-	-	Адаптивное	-	-	-

Классификационные особенности определяются общим исполнением, подвижностью и управлением ПР.

Общее исполнение ПР характеризуется подвижностью корпуса, грузоподъемностью, числом манипуляторов, системой координат, типом приводов, исполнением, точностью позиционирования и степенью универсальности.

Подвижность корпуса определяет исполнение ПР применительно к условиям работы корпуса робота в неподвижном или подвижном состоянии. Роботы с неподвижными корпусами используются как при обслуживании различного оборудования, так и при выполнении основных технологических операций. При этом они могут устанавливаться на подставках различных конструкций перед обслуживаемым оборудованием или непосредственно на нем. Эти ПР удобны в эксплуатации, но их технологические возможности ограничены пределами рабочей зоны манипулятора.

Подвижные напольные ПР перемещаются вдоль технологического оборудования на рельсовых направляющих или на автоматических тележках - *робокарах*. Подвижные подвесные ПР передвигаются по монорельсам, расположенным над обслуживаемым оборудованием. Подвижные ПР могут обслуживать несколько единиц технологического оборудования, расположенного вдоль трассы передвижения. Это расширяет технологические возможности ПР, но

Управление техническими системами

усложняет условия эксплуатации. Особую группу составляют ПР вертикального перемещения, использующие захватные устройства для пошагового или непрерывного перемещения по вертикальным и наклонным поверхностям.

Грузоподъемность определяет способность ПР брать, удерживать и транспортировать предметы с регламентируемой массой. Эта характеристика ПР наряду с подвижностью корпуса является одной из основных классификационных характеристик.

Сверхлегкие роботы грузоподъемностью не выше 1 кг в основном применяются на вспомогательных операциях и при сборке. Обычно они представляют собой простые специализированные пневматические ПР, обладающие высоким быстродействием.

Легкие роботы грузоподъемностью до 10 кг обладают средним быстродействием и более сложной кинематикой движений при различных типах приводов.

Средние роботы грузоподъемностью до 100 кг бывают специальными, специализированными и универсальными. Приводы у них обычно гидравлические, электромеханические или комбинированные, обеспечивающие скорость перемещений около 0,5 м/с.

Тяжелые ПР грузоподъемностью свыше 100 кг относятся, как правило, к группе специальных и специализированных. Движения реализуются гидравлическими и электромеханическими приводами с малым быстродействием.

Число манипуляторов наряду с быстродействием обуславливает производительность ПР. Одноманипуляторные ПР применяются для осуществления транспортно-установочных операций с высоким быстродействием или для обслуживания технологического оборудования при выполнении основной операции, требующей значительного машинного времени. Двухманипуляторные ПР используются для взятия, транспортировки, загрузки и разгрузки изделий при обслуживании оборудования с малым рабочим циклом. Два манипулятора позволяют совмещать операции загрузки и разгрузки, что сокращает продолжительность технологического процесса. Многоманипуляторные роботы относятся к группе специальных и используются в производствах, имеющих возможность одновременного обслуживания нескольких единиц технологического оборудования.

Система координат определяет технологические возможности ПР.

Управление техническими системами

Прямоугольная система координат наиболее проста и обеспечивает перемещение захватного устройства ПР в зоне, имеющей форму параллелепипеда. Конструкции роботов с этой системой координат несложные и удобны для программирования. К недостаткам прямоугольной системы координат относится некоторое ограничение технологических возможностей, так как трудно брать объект манипулирования из мест со сложными подходами и подавать его в труднодоступные места, что часто бывает необходимо в процессе обработки детали. Использование прямоугольной системы координат, как правило, приводит к усложнению технологического оснащения для обслуживания ПР и к увеличению производственной площади.

Цилиндрическая система координат обеспечивает перемещение захватного устройства ПР в зоне, имеющей форму цилиндра. Конструкции ПР для этой системы координат также относительно несложны, а технологические возможности несколько возрастают.

Сферическая система координат обладает наибольшими технологическими возможностями и обеспечивает перемещение захватного устройства ПР в зоне, ограниченной частью сферы. При этом ПР в основном имеют складывающийся манипулятор и занимают меньше производственной площади. Однако конструкции ПР с такой системой координат более сложные, так же как и способы их программирования.

Тип приводов определяется видом энергии, обеспечивающем перемещение отдельных звеньев ПР в нужном направлении. *Пневматические приводы* применяются в ПР с грузоподъемностью, как правило, до 10 кг и создаются на базе пневматических цилиндров. Преимущество подобных приводов заключается в простоте и надежности конструкции, а также дешевизне сжатого воздуха как вида энергии. Их недостатки, прежде всего, связаны со сложностью промежуточного позиционирования исполнительного механизма и управления скоростью при перемещении. *Гидравлические приводы* применяются в ПР с большой грузоподъемностью и создаются на базе гидравлических цилиндров и двигателей. Гидравлические приводы компактны и способны развивать большие усилия. Их технологические возможности расширяются за счет обеспечения регулирования усилий в исполнительных механизмах и скоростей перемещения. Недостатки данных приводов - небольшая быстроходность и повышенные требования к условиям эксплуатации, связанные с использованием жидкости в качестве рабочей среды.

Управление техническими системами

Электрические приводы применяются в ПР с различной грузоподъемностью и создаются на базе электродвигателей постоянного и переменного тока, а также шаговых двигателей. Работы с электроприводами обладают наибольшей технологической гибкостью и хорошо стыкуются с обслуживаемым оборудованием. Они достаточно надежны в работе, просты в обслуживании, регулировании, не имеют трубопроводов, так как питаются электроэнергией. К их недостаткам можно отнести сравнительно низкие показатели удельной мощности.

Комбинированные приводы представляют собой различные сочетания рассмотренных типов приводов и создаются для расширения технологических возможностей ПР.

Исполнение ПР обуславливает возможность их использования в различных условиях эксплуатации.

Роботы нормального исполнения предназначены для обычных условий эксплуатации. Роботы пылезащищенного исполнения используются при повышенной запыленности согласно существующим нормам. Роботы теплозащищенного исполнения применяются на производствах с зонами повышенной температуры, таких, как термическое, кузнечно-прессовое и литейное производства. Роботы пожарозащищенного и взрывозащищенного исполнения предназначены соответственно для производств с повышенными уровнями пожароопасности и взрывоопасности. При этом особое внимание уделяется оборудованию, используемому для предотвращения аварийных ситуаций.

Роботы комбинированного исполнения объединяют в себе свойства, присущие рассмотренным выше исполнениям в требуемом сочетании.

Точность позиционирования обеспечивает точность выхода рабочего органа манипулятора в заданные точки, а также воспроизведения заданной траектории. При выполнении ПР основных технологических операций точность позиционирования должна соответствовать техническим требованиям на обработку или сборку изделий. Необходимо учитывать, что точность позиционирования меняется в зависимости от положения захватного устройства ПР в зоне манипулирования. На границах зоны уменьшение точности может происходить, в частности, за счет влияния упругой податливости звеньев манипулятора. Увеличения точности можно достичь уменьшением скорости перемещения ПР.

Управление техническими системами

Для повышения производительности и понижения требований к точности самого ПР используют компенсационные элементы, обеспечивающие податливость в процессе захвата или установки детали в рабочее положение,

К роботам с малой точностью позиционирования относят ПР с погрешностью позиционирования более 1,0 мм. Они в основном используются на вспомогательных операциях, реже на основных операциях, например при окраске.

К роботам со средней точностью позиционирования m относят ПР с погрешностью позиционирования от 0,1 до 1,0 мм. Они широко используются, так как в основном удовлетворяют требованиям, предъявляемым к обслуживанию различных видов технологического оборудования.

Роботами с высокой точностью позиционирования являются ПР с погрешностью позиционирования менее 0,1 мм, используемые обычно при выполнении сборочных операций.

Степень универсальности обуславливает необходимый уровень соответствия ПР запланированным работам.

Специальные ПР предназначаются обычно для выполнения одной операции. Они просты, экономичны и удобны в эксплуатации.

Специализированные ПР используются для выполнения однотипных операций, в пределах которых обладают необходимой гибкостью. Технологические возможности специализированных роботов, состоящих из унифицированных модулей, расширяются путем варьирования компоновки ПР в зависимости от конкретных требований производства.

Универсальные ПР предназначены для выполнения самых разнообразных операций при обширной номенклатуре изделий. Имеется возможность быстрого перепрограммирования роботов этого типа, но они соответственно дороже и сложнее в эксплуатации. Универсальные промышленные роботы обладают пятью и более степенями подвижности.

Подвижность ПР характеризуется степенью подвижности, ходом манипулятора и быстродействием.

Степень подвижности определяет способность ПР к выполнению сложных движений в процессе работы. Переносные степени подвижности осуществляют транспортные движения перемещением манипулятора. Ориентирующие степени подвижности устанавливают транспортируемый предмет в требуемое положение и в заданное место. Они реализуются с помощью конечного звена манипулятора и расположенных на нем приводов установочных перемещений.

Управление техническими системами

Степени подвижности могут быть линейными и угловыми. Малая подвижность - с числом степеней подвижности до 3 - характерна для специальных ПР. Она упрощает конструкцию ПР, но одновременно ограничивает его возможности. Средняя подвижность — с числом степеней подвижности до 6 - характерна для специализированных и универсальных ПР, где вводятся ориентирующие степени подвижности. Высокая подвижность предполагает наличие более 6 степеней подвижности. В промышленном производстве целесообразность использования такого числа степеней подвижности возникает сравнительно редко.

Ход манипулятора обуславливает перемещение манипулятора при обслуживании оборудования или при выполнении основных технологических операций.

Манипуляторы с малым ходом (до 300 мм) предназначены в основном для сверхлегких и легких специальных и специализированных ПР.

Манипуляторы со средним ходом (до 1000 мм) применяются для промышленных роботов с различными грузоподъемностью и универсальностью. Манипуляторы с большим ходом (более 1000 мм) предназначены для специализированных и универсальных ПР средней и большой грузоподъемности со сферической системой координат. Ход манипулятора в сочетании с переносными степенями подвижности определяет зону обслуживания ПР, являющуюся важным параметром при организации рабочего места. С увеличением хода манипулятора расширяется перечень обслуживаемого им технологического оборудования.

Быстродействие обуславливает среднюю скорость перемещения предметов номинальной массы при транспортировке. Увеличение быстродействия обеспечивает сокращение времени на обслуживание технологического оборудования и повышение производительности ПР. Быстродействие определяется скоростью соответствующих приводов манипулятора, значения которой в свою очередь зависят от массы груза, хода манипулятора и сложности траектории перемещения манипулятора.

Для подбора характеристики робота по быстродействию необходимо знать суммарную скорость перемещения рабочего органа, складывающуюся из скоростей отдельных приводов.

Управление техническими системами

Малое быстродействие соответствует скорости перемещения до 0,5 м/с. Оно характерно для гидравлических ПР со средней и большой грузоподъемностью.

Среднее быстродействие, соответствующее скорости перемещения до 1,0 м/с, присуще ПР с различными системами приводов и широко используется при автоматизации производственных процессов.

Большое быстродействие соответствует скорости перемещения выше 1,0 м/с, которая используется весьма ограниченно в связи со сложностью эксплуатации соответствующих промышленных роботов.

Управление ПР характеризуется типом управления, методами программирования, объемом памяти и числом внешних команд программы. Тип управления определяет возможности ПР по организации траекторий движения. Управление может быть программным и адаптивным. Программное управление в свою очередь подразделяется на цикловое, позиционное и контурное.

Цикловое программное управление обеспечивает обычно позиционирование с помощью механических упоров, располагаемых в крайних положениях по каждой степени подвижности. Для увеличения числа точек позиционирования применяют дополнительные промежуточные выдвижные упоры. Цикловые системы наиболее просты, дешевы и надежны в эксплуатации. Их недостатками являются малая универсальность и ограниченные технологические возможности.

Позиционное программное управление обеспечивает от десятков до сотен программируемых точек траектории движения по каждой степени подвижности. В этом случае при программировании задается соответствующий набор точек рабочей зоны, через которые последовательно должны пройти звенья манипулятора при выполнении программы. Позиционное управление повышает универсальность и технологические возможности ПР, однако не позволяет регулировать траектории между заданными точками.

Контурное управление позволяет производить перемещение манипуляторов ПР по непрерывным траекториям и с непрерывно программируемой скоростью движения. Системы контурного управления подразделяются на аналоговые и цифровые. В аналоговых контурных системах управления программа записывается на носитель аналоговой информации, например на магнитную ленту или магнитный диск. Эти системы просты, но имеют большой объем памяти и неудобны для сопряжения с ЭВМ. В цифровых контурных системах управления

Управление техническими системами

программа задается набором точек, а при воспроизведении интерполируется в аналоговый сигнал. Цифровые системы обладают повышенной точностью и удобством связи с ЭВМ. При расширенных технологических возможностях контурные системы относительно сложнее и дороже.

Комбинированные системы программного управления создаются для оптимального сочетания цикловых, позиционных и контурных типов управления.

Адаптивное управление обеспечивает расширение возможностей ПР за счет использования систем осязания на базе сенсорных устройств, позволяющих определять положение, конфигурацию и другие параметры объектов манипулирования и окружающей среды. В соответствии с полученными сигналами производится автоматическое изменение управляющей программы. Адаптивные ПР могут работать в условиях неопределенности без специальных приспособлений, например для ориентирования деталей перед захватом. При встраивании рассмотренных систем управления ПР в ГАП необходимо обеспечивать их стыковку с соответствующими уровнями локальной вычислительной сети.

Методы программирования работы ПР обеспечивают составление и ввод программы для управления ПР. В программе фиксируются последовательность осуществления движений, положение звеньев, время выполнения элементов движений, а также могут задаваться скорости перемещения звеньев, команды на внешнее оборудование, и усилия, связанные с выполнением операций.

В зависимости от способов ввода информации в устройство управления ПР различаются следующие основные методы подготовки программ: программирование обучением, автоматическое программирование и программирование самообучением.

Программирование обучением осуществляется при непосредственном участии оператора и является наиболее простым методом. Автоматическое программирование гарантирует заблаговременную подготовку программ с помощью автоматизированных систем.

Программирование самообучением может быть частичным и полным. При частичном самообучении автоматически создается укрупненная программа с отдельными элементами действия для определенных периодов работы. На ее основе устройство управления ПР разрабатывает остальную часть программы с учетом информации, получаемой от сенсорных устройств. При полном самообучении устройство управления ПР на основании задания цели и информации от сенсорных устройств формирует рабочие программы в реальном

Управление техническими системами

времени. Программирование самообучением применяется в ПР с адаптивным управлением.

Объем памяти устройства управления ПР определяет количество записанной управляющей информации в процессе программирования, которая обычно представляется в виде кадров. *Кадры* это отдельные элементы программы, состоящие из определенной группы команд и адресов, по которым выполняются команды и обеспечивается проверка их исполнения.

Малый объем памяти (до 100 кадров) имеют ПР с цикловым позиционным управлением с небольшим числом точек позиционирования.

Средний объем памяти (от 100 до 600 кадров) имеют ПР с позиционным и контурным управлением.

Большой объем памяти (свыше 600 кадров) имеют ПР с развитым контурным и адаптивным управлением.

Число внешних команд определяет возможности ПР по согласованию работы с внешним оборудованием. Число внешних команд может быть малым - до 15, средним - от 15 до 60 и большим - свыше 60 команд.

2. Робототехнические системы

На базе рассмотренных ПР создаются *робототехнические системы*, среди которых можно выделить следующие основные классы:

- манипуляционные робототехнические системы;
- мобильные робототехнические системы;
- информационные и управляющие робототехнические системы.

Манипуляционные робототехнические системы наиболее распространены и подразделяются на три вида, включающие в себя:

- 1) автоматически действующие роботы, автоматические манипуляторы и роботизированные технологические комплексы (РТК);
- 2) дистанционно управляемые роботы, манипуляторы и РТК;
- 3) непосредственно управляемые оператором манипуляторы.

Мобильные робототехнические системы представляют собой движущиеся платформы или шасси, перемещением которых управляет автоматика. При этом они кроме программы маршрута движения имеют датчики коррекции маршрута, а также могут автоматически нагружаться и разгружаться. Подклассом таких систем являются робототехнические системы для перемещения по вертикальным поверхностям.

Управление техническими системами

Информационные и управляющие робототехнические системы - это комплексы измерительно-информационных и управляющих средств, автоматически производящих сбор, обработку и передачу информации, а также использующих ее для формирования различных управляющих сигналов.

Различные классы робототехнических систем могут сочетаться в одном комплексе. Роботизация - это проблема, требующая решения вопроса о совместном использовании ПР с различным оборудованием при едином управлении от ЭВМ и встроенных микропроцессоров. Эта задача не только техническая, но и социально-психологическая. Поэтому кроме умения пользоваться новой техникой требуется понимание ее значения для будущей деятельности предприятия.

В составе основного технологического оборудования ПР обеспечивают автоматизацию операций взятия заготовок из накопительных и ориентирующих устройств, транспортировки и укладки их в тару или на промежуточные устройства для выполнения последующих операций. Использование ПР позволяет также осуществлять перенастройку технологического оборудования. При необходимости захвата рассредоточенных деталей требуется использование адаптивных роботов, способных производить распознавание положения деталей.

Операции по обслуживанию основного технологического оборудования часто требуют создания специальных захватных устройств ПР для различных типов и размеров деталей. В средствах инструментального обеспечения ПР производят автоматическую смену инструментов и инструментальных блоков по мере их износа или при переходе к обработке новой группы деталей.

В системах удаления отходов производства на металлорежущем оборудовании элементная стружка удаляется из зоны резания с помощью стружкоприемника, из которого она направляется в тару непосредственно или по конвейерной системе. Заполненная тара с помощью ПР выдвигается на позицию выдачи, заменяется новой, транспортируется к месту приема стружки, высвобождается и доставляется к месту хранения или к станку на позицию загрузки.

Удаление витой стружки осуществляют ПР, снабженные элементами технического зрения. Выведенная из зоны резания стружка подается в стружкоприемную часть с дробильными устройствами, а затем в тару.

Очистка установочных мест от стружки необходима для установки и крепления заготовок, а также налет с деталями. Для очистки могут ис-

Управление техническими системами

пользоваться мобильными ПР, конструктивное исполнение которых определяется особенностями станков и инструментального оснащения.

Практически все области применения ПР включают в себя операции транспортировки и контроля. В ряде случаев для повышения эффективности использования ПР и увеличения производительности технологического процесса целесообразно совмещение выполнения указанных операций во времени. Примером может служить процесс сортировки деталей по допускам, широко распространенный и осуществляемый перед подачей деталей для обработки на основное технологическое оборудование. Если требуется выполнить сортировку деталей по габаритным размерам, можно использовать ПР по схеме, показанной на рис. 2.9.

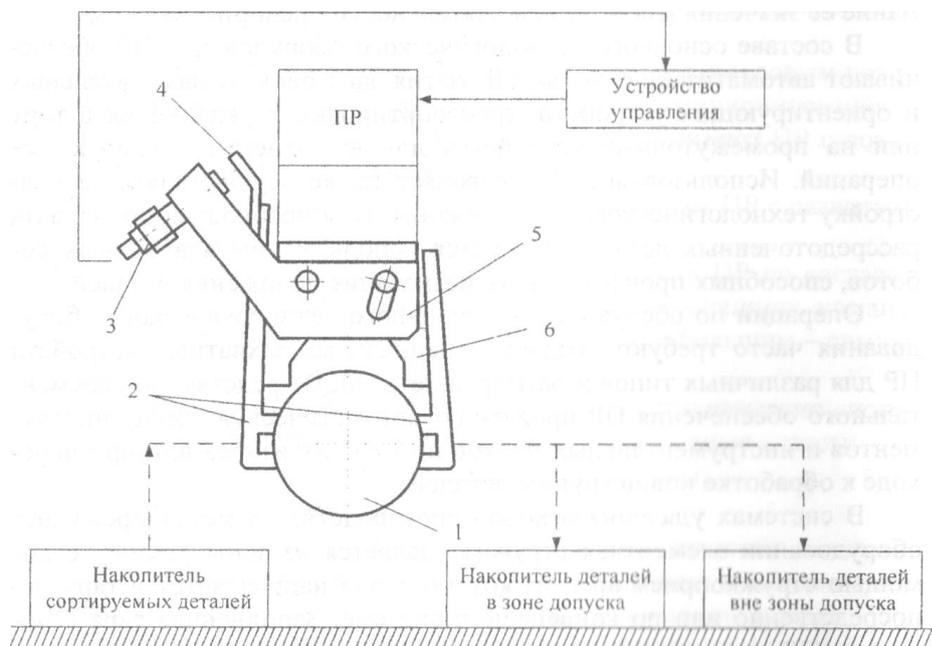


Рис. 2.9. Схема совмещения операций транспортировки и контроля при сортировке деталей:

1 - контролируемая деталь; 2 - профильные губки; 3- локационный датчик; 4 - ограничитель; 5 - измерительный кронштейн; 6 - шарнирно-рычажный механизм

Робот захватывает детали, нуждающиеся в сортировке, из подающего накопителя и транспортирует их в направлении приемных накопителей, одновременно производя контроль наличия в зоне допуска габаритного размера детали. По результатам контроля устройство управления ПР организует его движение соответственно к накопителю деталей, размеры которых находятся в зоне допуска, или к накопителю деталей, размеры которых выходят за пределы зоны допуска. Операция контроля производится после зажатия детали шарнирно-

Управление техническими системами

рычажным механизмом с профильными губками, вид которых выбирается в зависимости от формы детали. Поскольку положение ограничителя относительно датчика, закрепленного на измерительном кронштейне, обусловлено размерами детали, на выходе датчика вырабатывается информационный сигнал, анализируемый затем в устройстве управления. По результатам анализа принимается решение о выборе необходимой траектории движения ПР.

В качестве датчика можно использовать пневматический локационный измеритель, обладающий высокой точностью идентификации положения ограничителя. Гибкость выполнения операции контроля обеспечивается легкостью перенастройки конструкции на различные номинальные размеры деталей путем предварительной установки измерительного кронштейна в положение, определяющее рабочий зазор между датчиком и ограничителем. Чувствительность измерений регулируется изменением длины измерительного кронштейна. Из приведенного примера следует, что важное значение при автоматизации операций транспортировки и контроля имеет конструкция захватного устройства ПР.

Захватные устройства промышленных роботов служат для захватывания и удержания в определенном положении объектов манипулирования. Обычно ПР комплектуют набором типовых захватных устройств, которые можно менять в зависимости от требований конкретного рабочего задания. К числу обязательных требований относятся надежность захватывания и удержания объекта, стабильность базирования, недопустимость повреждений объектов, а также высокая прочность при малых габаритах и массе. Дополнительными требованиями являются возможность захватывания деталей в широком диапазоне массы, размеров и формы; легкость и быстрота замены захватных устройств; автоматическое изменение усилия удержания объекта в зависимости от массы детали; способность захвата неориентированно расположенных деталей.

Некоторые дополнительные требования можно удовлетворить, используя адаптивные захватные устройства, оснащенные датчиками внешней информации о наличии объекта манипулирования, его форме, размерах, массе, состоянии поверхности, усилию удержания, степени возможного проскальзывания и о других параметрах.

На рис. 2.10 представлен общий вид антропоморфного трехпалого захватного устройства, способного переносить хрупкие изделия небольшой массы со значительными отклонениями формы и размеров, например лампы.

Управление техническими системами

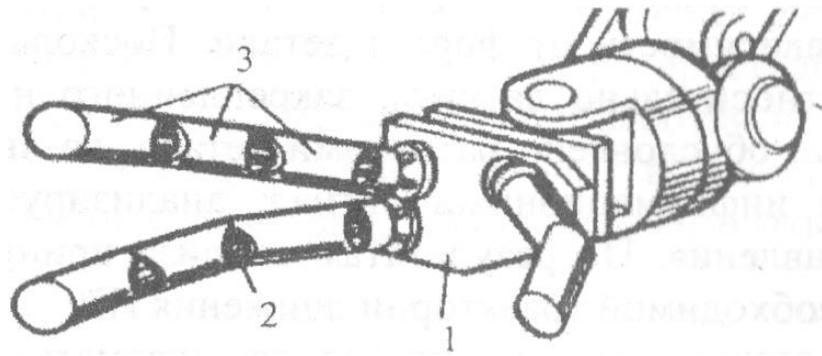


Рис. 2.10. Захватное устройство с тросовым механизмом:
1 - кисть, 2 - тросы, 3 - фаланги пальцев

Движение пальцев осуществляется с **помощью** пропущенных внутри них тросов, что делает конструкцию компактной. Трехпалая кисть обеспечивает более десяти степеней подвижности двигателем постоянного тока, вынесенным за пределы хватного устройства.

На рис. 2.11, изображено адаптивное хватное устройство, способное зафиксировать соприкосновение с объектом и усилие удержания, а также ориентировать хватное устройство на объект посредством локации, что позволяет осуществлять поиск, распознавание и сборку объектов.

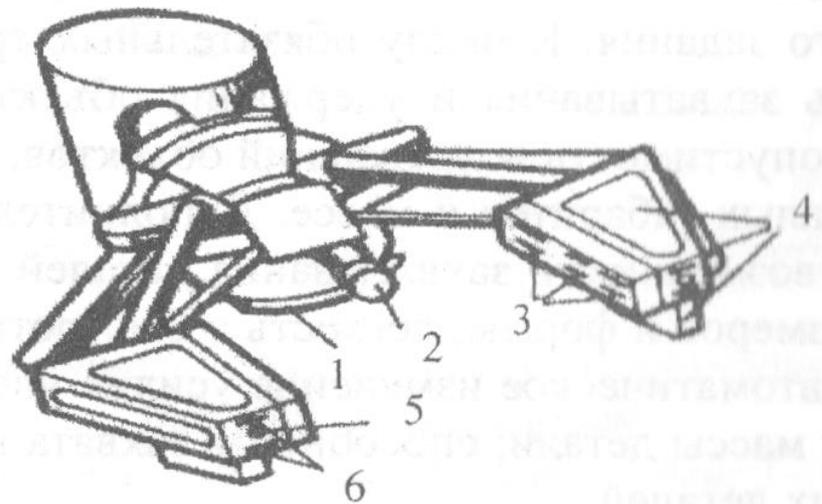


Рис. 2.11. Адаптивное хватное устройство с тактильными датчиками:
1 - рычаг; 2, 3, 6 - датчики давления; 4 - тактильные датчики; 5 - фотодиод

Соприкосновение с объектом фиксируется с помощью шести тактильных датчиков, установленных на наружных сторонах устройства и построенных на основе микропереключателей. Усилие удержания контролируется посредством

Управление техническими системами

потенциометрических датчиков давления, смонтированных на губках и на рычаге между ними, а локация производится фотодиодами.

На рис. 2.12, в приведено устройство для захватывания неориентированно расположенных деталей типа плоских дисков.

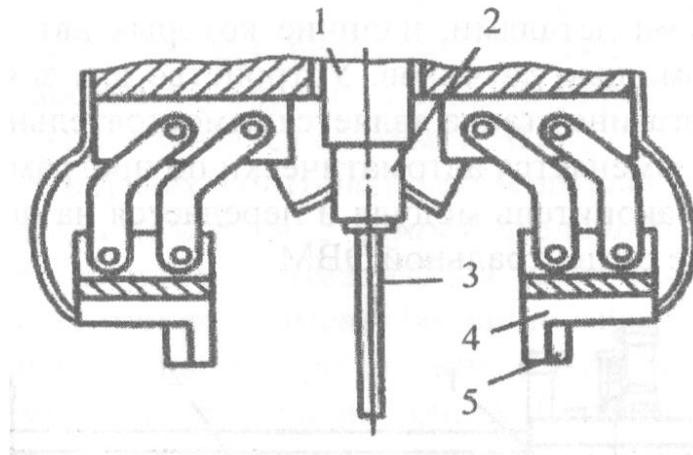


Рис. 2.12. Адаптивное захватное устройство с дальномерами:

1 - выдвижной элемент, 2 - силовой датчик, 3 - щуп, 4 - зажимные губки, 5 - фотодальноммеры

Выдвижной элемент с силовым датчиком соединен со щупом, а в торцах зажимных губок размещены фотодальноммеры. При раскрытых губках и выдвинутом щупе проводится сканирование поля расположения деталей. При соприкосновении щупа с деталью с помощью датчика определяется ее положение путем нахождения направления нормали к цилиндрической поверхности объекта. После этого захватное устройство выводится на центр диска и поворачивается вокруг продольной оси манипулятора ПР, а фотодальноммеры находят свободные участки наружной поверхности детали, которые могут быть использованы для ее захвата.

Различают два вида модулей ГАП - аппаратные и программные. *Аппаратные модули* реализуют различные технологические операции, а *программные модули* формируют программное обеспечение системы управления ГАП. Модульность обеспечивается широким применением стандартных средств аппаратурно-программного интерфейса. К аппаратным модулям относится *гибкий производственный модуль* - единица технологического оборудования для производства изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик. Модуль имеет программное управление, автономно

Управление техническими системами

функционирует, автоматически осуществляет все функции, связанные с изготовлением изделий, может встраиваться в гибкую производственную систему.

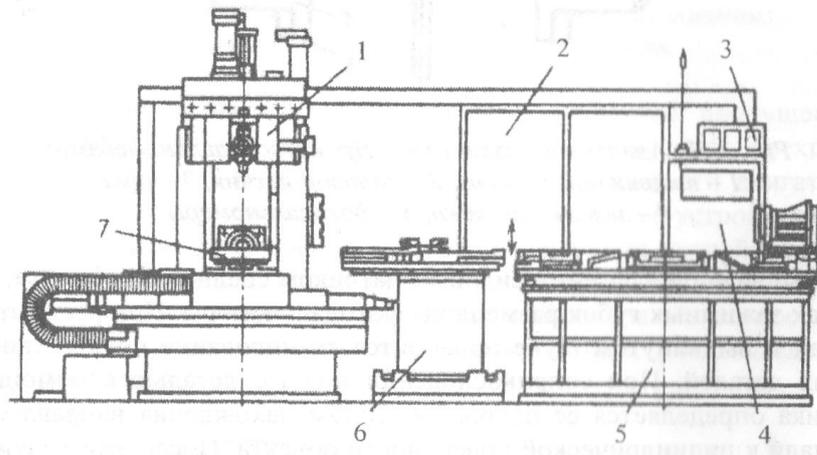


Рис. 2.13. Гибкий производственный модуль на базе многоцелевого сверлильно-фрезерно-расточного станка:

1 - станок, 2 - электрооборудование, 3 - система управления измерением, 4 - устройство ЧПУ, 5 - накопитель спутников, 6 устройство смены спутников, 7 — спутник

Примером гибкого производственного модуля служит модуль для изготовления корпусных деталей на базе обрабатывающего центра (рис. 2.13).

Составной частью модуля является накопитель столов-спутников с обрабатываемыми деталями, наличие которых автоматически контролируется с помощью датчиков. Устройство для замены режущего инструмента в магазине станка является самостоятельным узлом.

Инструмент заменяется автоматически по программе. Устройство доставляется на накопитель модуля и передается на поворотный стол станка по команде от центральной ЭВМ.

Стол с устройством перемещается, коническая оправка барабана вставляется в шпиндель станка и зажимается шариковым зажимом. После этого стол станка возвращается в первоначальное положение, а барабан с инструментом остается на шпинделе. Затем шпиндельная бабка с барабаном поднимается до зоны действия манипулятора смены инструмента, осуществляющего переустановки инструмент из барабана в магазин станка и обратно. При полной замене инструмент шпиндельная бабка с барабаном опускается в нижнее положение, барабан закрепляется в устройстве, передается в накопитель и затем снимается с него.

Управление техническими системами

Контрольно-измерительная система состоит из измерительной головки и блока обработки данных. Измерительная головка имеет аналоговую измерительную систему и преобразователь. Она находится в магазине станка и по команде программы вставляется в шпиндель вместо инструмента. Контроль осуществляется посредством контакта детали со щупом измерительной головки. Сигнал измерения передается в блок обработки данных, содержащий приемник, микропроцессор и устройство ввода для передачи коррекции в систему ЧПУ. Дальнейшая обработка измерений и выдача управляющих воздействий на коррекцию производится системой ЧПУ.

В некоторых случаях контрольно-измерительную систему целесообразно реализовывать в виде самостоятельного гибкого модуля. Примером может служить автоматизация контроля листового материала, заготовки из которого имеют большие габариты и массу, причем их геометрические параметры должны измеряться с высокой точностью одновременно в нескольких точках. Структура такого модуля приведена на рис. 2.14.

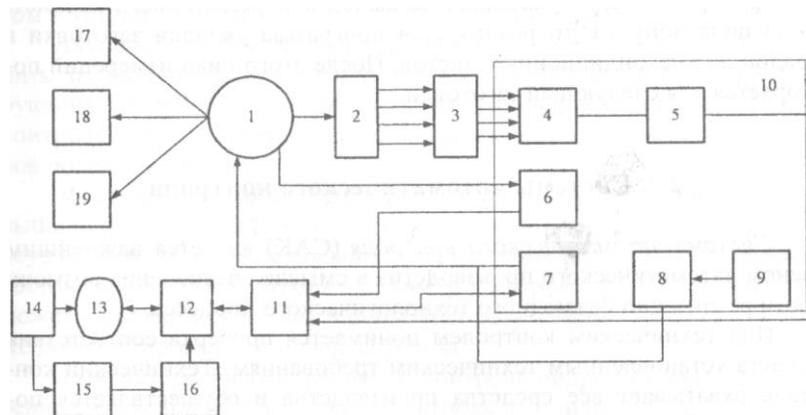


Рис. 2.14. Структура контрольно-измерительного модуля:

- 1 - робот-укладчик; 2 - контрольно-измерительный стол; 3—датчики-преобразователи; 4 - схема анализа ситуации;
 5, 6, 7— оптронные развязки; 8 - тиристорная схема; 9 - пульт ручного управления; 10 - стойка управления; 11- интерфейс; 12 - ЭВМ; 13-дисплей; 14 - оператор; 15 - фотосчитыватель; 16 - устройство управления; 17- задел заготовок; 18 — поддон кондиционных листов; 19 - поддон некондиционных листов

Целью контроля в данном случае является сортировка листового материала из задела заготовок, находящегося на входе модуля. На выходе модуля по результатам измерения производится укладка заготовок соответственно в поддоны кондиционных или некондиционных листов. Работа

Управление техническими системами

модуля осуществляется следующим образом. Робот- укладчик захватывает верхнюю заготовку из стопы, находящейся в заделе, и помещает ее на контрольно-измерительный стол в рабочую зону измерений. На столе находятся датчики-преобразователи, установленные в требуемых по технологии точках контроля. Каждый датчик снимает информацию о геометрических параметрах заготовки относительно поля допуска и выдает результирующий сигнал на схему анализа ситуации. Если все сигналы с датчиков показывают соответствие заданным требованиям, то схема анализа ситуации через интерфейсную плату ввода-вывода посылает в управляющую ЭВМ сообщение, после которого начнет действовать программа укладки роботом заготовки в поддон для кондиционных листов с позиции на контрольно-измерительном столе. Если хотя бы один сигнал с датчиков-преобразователей указывает на выход контролируемого параметра за поле допуска, то реализуется программа укладки заготовки в поддон для некондиционных листов. После этого цикл измерений повторяется для следующей заготовки.

Лекция № 17

по теме: Системы автоматического контроля.

1. Системы автоматического контроля

Система автоматического контроля (САК) является важнейшим звеном автоматического производства в смысле обеспечения возможности реализации безлюдного технологического процесса.

Под техническим контролем понимается проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям. Технический контроль охватывает все средства производства и осуществляется посредством САК. Эта система решает следующие задачи:

- получение и предоставление информации о свойствах, техническом состоянии и пространственном расположении контролируемых объектов, а также о состоянии технологической среды и производственных условий;
- сравнение фактических значений параметров с заданными;
- передача информации о расхождениях с параметрами моделей производственного процесса для принятия решений на различных уровнях управления производством;

Управление техническими системами

- получение и предоставление информации об исполнении заданных функций.

Система автоматического контроля должна обеспечивать автоматическую перенастройку средств контроля в пределах заданной номенклатуры контролируемых объектов, полноту и достоверность контроля, а также надежность средств контроля. Динамические характеристики САК должны соответствовать динамическим свойствам контролируемых объектов.

Целью контроля может быть, с одной стороны, поддержание требуемого уровня качества продукции с помощью контроля параметров материала, заготовок, инструмента, приспособлений; режима изготовления, измерения и испытания изделия; параметров технологических средств и изделия, а с другой - поддержание в работоспособном состоянии всего автоматического оборудования, вычислительной техники и программного обеспечения путем контроля и диагностирования.

По виду решаемой задачи контроль может быть приемочным, профилактическим и прогнозирующим, а по взаимодействию с объектом - активным и пассивным, параметрическим и функциональным.

Активный контроль, в отличие от пассивного, позволяет исключить появление брака за счет своевременного введения корректирующих воздействий по результатам измерений. Параметрический контроль осуществляется посредством измерения значений параметров объекта контроля.

Функциональный контроль определяет способность правильного выполнения функций, возлагаемых на контролируемый объект, и осуществляется путем сравнения с заданными значениями выходных состояний объекта контроля, например электронной схемы. При этом может выполняться анализ и обработка результатов сравнения, а также диагностирование и поиск дефектов.

По конструктивному решению контроль подразделяется на внутренний и внешний. *Внутренний контроль* в отличие от внешнего позволяет проводить самоконтроль за счет встроенных средств, например датчиков состояния. Применительно к электронной аппаратуре в этом смысле часто используется термин *самотестирование*, когда при контроле объект функционирует не на рабочих, а на тестовых воздействиях. Соответственно по реализации во времени контроль может быть непрерывным, когда он производится в процессе функционирования объекта, и периодическим, когда используются тестовые воздействия.

Управление техническими системами

В зависимости от условий производства осуществляется контроль, необходимый для обеспечения техники безопасности. Его основное назначение - профилактика или корректирование работы систем для обеспечения номинальных условий их эксплуатации. Например, пожаробезопасность обеспечивается своевременным обнаружением дыма или огня специальными датчиками. На технологическом оборудовании самоконтроль позволяет остановить систему в случае разрегулирования серводвигателя или зажимного патрона при наличии перегрузок или появлении постороннего предмета в зоне обработки.

Место САК в автоматическом производстве показано на рис. 2.15.

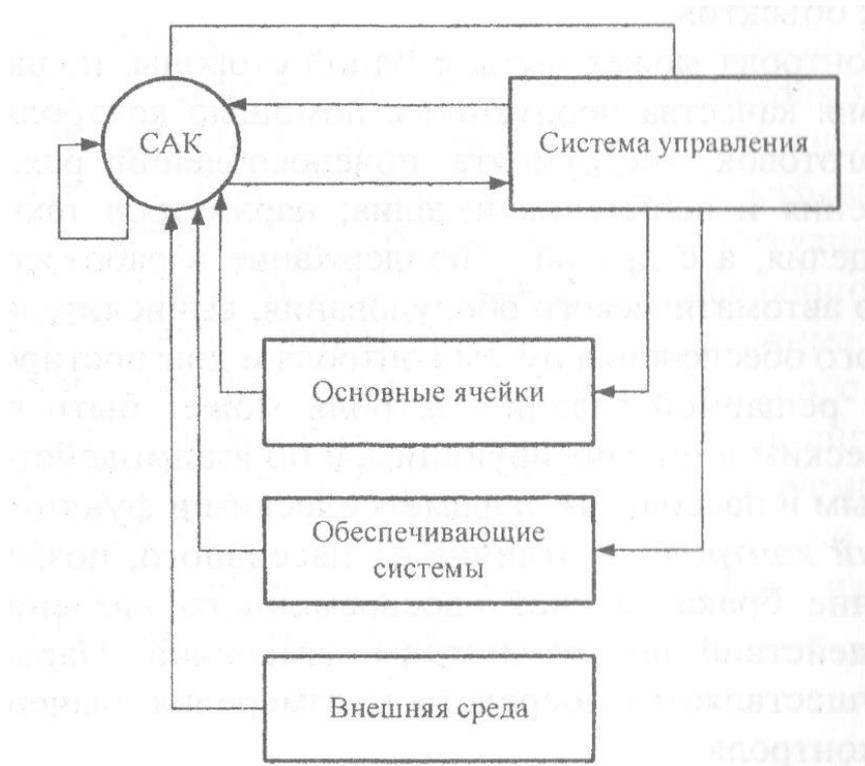


Рис. 2.15. Место САК в автоматическом производстве

Типовая структура САК включает три уровня (рис. 2.16).

Управление техническими системами



Рис. 2.16. Типовая структура САК

Верхний уровень обеспечивает общий контроль совокупности автоматических ячеек для координации их взаимодействия, перенастройки и ремонта; выдачу информации на пульт управления ГАП; решение задач по получению и обработке информации с автоматических ячеек, а также по самоконтролю.

Средний уровень гарантирует контроль автоматической ячейки и предоставление на верхний уровень обобщенной информации о свойствах, техническом состоянии и пространственном расположении контролируемых объектов и составных частей ячейки. При этом решаются задачи по получению и обработке информации о контролируемых параметрах объекта, технологической среды и автоматической ячейки, а также по самоконтролю.

Нижний уровень обеспечивает контроль объектов обработки, технического состояния и пространственного расположения составных частей элементарной автоматической системы, которой может быть станок с ЧПУ, ПР или другое автоматическое оборудование. На этом уровне САК решает задачи по получению и преобразованию информации о контролируемых параметрах и функциях объекта обработки и составных частей элементарной автоматической системы; контролю за исполнением технологических переходов; передаче информации на средний уровень, а также в систему технического обслуживания для прогнозирования постепенных отказов инструмента и оборудования.

Управление техническими системами

Контроль обеспечивающих систем может быть распределен по разным уровням в зависимости от конкретных условий производства.

Существует пять режимов функционирования САК: запуск, рабочий, наладочный, "плановый останов" и аварийный.

Режим запуска начинается с опроса всех элементов и систем ГАП. При этом проводится диагностика их технического состояния, дается команда на выход всех систем в начальное положение и контролируется ее исполнение, проверяются наличие и коды инструментов и заготовок. В процессе проверки система следит за устранением выявленных неисправностей. В режиме запуска задействованы все уровни контроля. На нижнем уровне системы определяются значения параметров и функции контролируемых компонентов элементарной автоматической системы и затем оценивается их соответствие заданным нормам. Информация о техническом состоянии и пространственном расположении компонентов элементарной автоматической системы передается в управляющую ЭВМ. Эта информация является основой для принятия решений о техническом состоянии средств обработки и объекта обработки. Техническое состояние самой управляющей ЭВМ контролируется ЭВМ высшего уровня.

Информация о техническом состоянии объектов обработки передается на ЭВМ для накопления и статистической обработки. Затем ЭВМ среднего уровня передает информацию о техническом состоянии автоматической ячейки и обобщенную информацию об объектах обработки на ЭВМ верхнего уровня. ЭВМ среднего уровня подвергается периодическому самоконтролю по сигналам с центральной ЭВМ и передает ей информацию о своем техническом состоянии. ЭВМ верхнего уровня подвергается периодическому самоконтролю и принимает решение о режиме функционирования САК по информации от автоматических ячеек.

В номинальном режиме САК обеспечивает контроль за качеством изготовления продукции; потоками изделий, инструментов, энергии, информации; функционированием вспомогательных систем (очистка от стружки, промывка, охлаждение, кондиционирование воздуха и др.); техническим состоянием всех элементов и систем ГАП.

В наладочном режиме управляющая информация поступает на ЭВМ верхнего уровня, которая принимает решения о реконфигурации системы контроля на среднем и нижнем уровнях. ЭВМ нижнего уровня устанавливает

совокупность контролируемых параметров и функций объектов обработки, а также нормы контроля.

Режим "планового останова" - специфический режим функционирования ГАП, предназначенный для обеспечения последующего запуска не с начального момента работы системы, а с момента ее останова. Обычно в данном режиме предусматриваются завершение операции обработки на станках, снятие и отправка деталей на накопители или склад, разгрузка и приведение роботов-автооператоров и штабелеров в необходимое для останова положение, запись состояния на носитель, отключение всех видов энергоносителей и всех пультов. Задача САК при этом состоит в контроле отработки сигналов управления. Кроме этого, поскольку реализация режима занимает некоторый промежуток времени, в течение которого элементы и системы ГАП последовательно прекращают функционирование, можно провести диагностику систем и выдать диспетчеру информацию для наладчиков и ремонтников.

Аварийный режим инициируется любым уровнем САК. На нижнем уровне он вызывается превышением допустимого брака, отклонением от нормы параметров либо элементарной автоматической системы, либо самих средств контроля. Сигнал об аварийном состоянии с каждого из уровней передается на более высокий уровень и отображается на пульте управления ГАП.

2. Технические средства контроля

Технические средства контроля включают в себя измерительные преобразователи, аналого-цифровые преобразователи, сенсорные подсистемы технического зрения, автоматические тестеры и координатные измерительные машины.

Измерительные преобразователи являются первичными носителями информации и составляют важнейший класс устройств контроля. Измерительный преобразователь - это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки или хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. К измерительным преобразователям относятся *датчики*. Датчик состоит из первичного и вторичного преобразователей. *Первичный преобразователь* преобразует измеряемую величину в электрический выходной сигнал. *Вторичный преобразователь* преобразует выходной сигнал первичного преобразователя в сигнал стандартного диапазона выхода датчика.

Управление техническими системами

В зависимости от конкретных условий эксплуатации к датчикам предъявляются самые различные требования, основными из которых являются следующие:

- однозначная зависимость выходной величины от входной;
- высокая чувствительность;
- стабильность характеристик во времени;
- соответствие динамических характеристик условиям измерений;
- помехоустойчивость и взрывобезопасность;
- технологичность конструкции;
- удобство монтажа и обслуживания.

Условная классификация датчиков приведена на рис. 2.17.



Рис. 2.17. Условная классификация датчиков

По способности восприятия информации на различных расстояниях от ее источника датчики делятся на бесконтактные и контактные.

Бесконтактные датчики позволяют определять в основном геометрические характеристики объектов с помощью технического зрения и локации.

Контактные датчики измеряют действующие силы и моменты, а также фиксируют координаты точек их приложения посредством силовомоментных и тактильных методов измерения.

Техническое зрение используется в промышленности на операциях распознавания и сортировки деталей, взятия деталей из навала, измерения координат движущихся деталей, определения ориентации деталей на сборочных и других участках производства, а также на операциях контроля качества деталей.

Локационные датчики используются для измерения в случае нецелесообразности или невозможности применения технического зрения. Например, эффективна установка локационных датчиков в захвате ПР для слежения сварочной головки за траекторией шва. Использование локационных

Управление техническими системами

датчиков в качестве датчиков безопасности позволяет предотвращать столкновение подвижных частей технологического оборудования с предметами и людьми, случайно оказавшимися в рабочей зоне. Многообразие типов локационных датчиков представлено на рис. 2.18

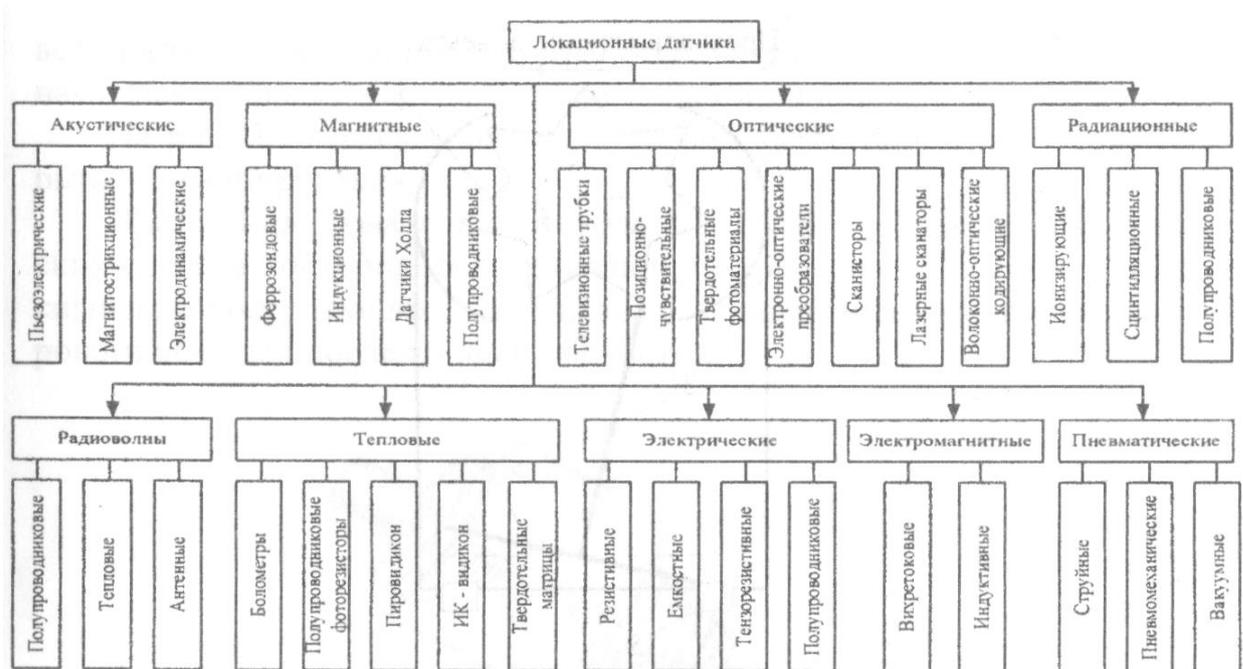


Рис. 2.18. Типы локационных датчиков

Силомоментные датчики применяются при выполнении механической сборки, абразивной зачистки и шлифовки изделий, где в процессе выполнения технологической операции необходимо измерять силы и моменты.

Тактильные датчики целесообразно использовать при поиске объектов, идентификации и определении их пространственного расположения; для обнаружения проскальзывания детали и при регулировании усилия захватывания детали, например, в захватном устройстве ПР.

Схема датчика определения направления и величины проскальзывания детали приведена на рис. 2.19.

Управление техническими системами

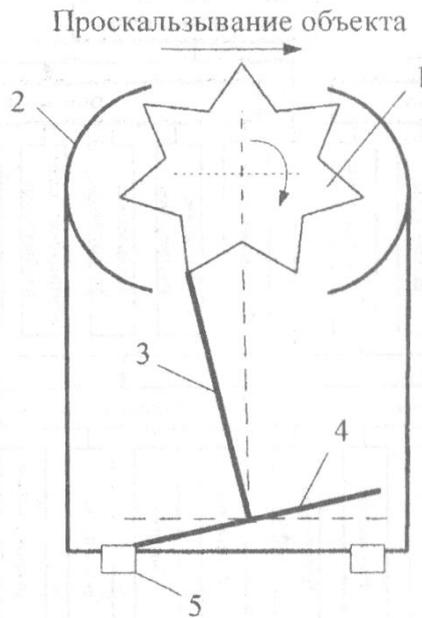


Рис.2.19. Схема датчика определения направления и величины проскальзывания:

1 – зубчатый шар, 2 – корпус, 3 – стержень, 4 – диск,
5 – электрические контакты

Схема включает свободно вращающийся зубчатый шар, который отклоняет тонкий стержень, установленный на оси проводящего диска. Под диском равномерно расположены электрические контакты. Вращение шара, вызванное проскальзыванием по нему объекта, приводит к вибрации стержня и диска с частотой, пропорциональной скорости вращения шара. От направления вращения зависит, какой контакт будет задействован вибрирующим диском. Усредненное направление проскальзывания определяется по импульсам в соответствующих выходных электрических контурах.

Если контактное усилие не вызывает смещений и деформаций контролируемого объекта, то применяются щуповые методы контроля размеров и формы изделий. *Измерительные щупы* могут быть выполнены в виде как одиночных щупов для контроля по одной координате, так и трехкоординатных измерительных головок или головок со сменными щупами для контроля сложнопрофильных изделий.

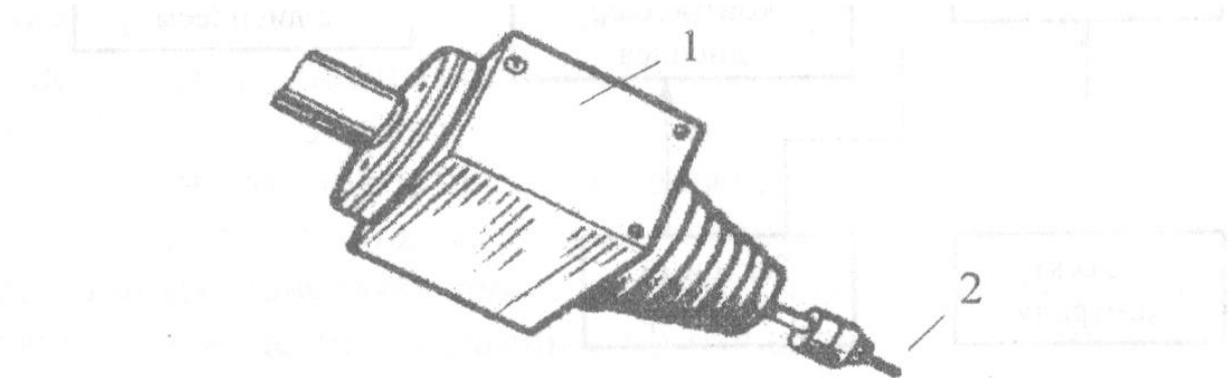
Точечные электронные щупы позволяют проводить измерение, не останавливая движение измерительной головки, причем многопозиционные точечные щупы с гнездами для сменяемых наконечников могут контролировать все грани детали без изменения направления щупа.

Электронные щупы для непрерывного сканирования осуществляют точное непрерывное измерение геометрических линий и поверхностей в трехмерном

Управление техническими системами

пространстве. Они позволяют повысить динамические характеристики измерительной машины.

На рис. 2.20 изображен внешний вид электронного щупа непрерывного сканирования.



*Рис. 2.20. Электронный щуп непрерывного сканирования:
1 – корпус с преобразователем, 2 – измерительный наконечник*

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) - это вид технических средств контроля, обеспечивающий преобразование аналоговых сигналов, поступающих с датчиков, в эквивалентные значения цифрового кода для последующей обработки.

К основным элементам аналоговой части АЦП относятся операционные усилители, компараторы напряжения, схемы выборки и хранения, а также аналоговые ключи и коммутаторы, которые используются для коммутации аналоговых сигналов между источником и нагрузкой. Цифровая часть, реализуемая на логических комбинационных схемах, сдвиговых регистрах, счетчиках и других элементах, выполняет функции кодирования, запоминания, сравнения, сдвига и сложения цифровой информации.

Аналого-цифровые преобразования делятся на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные. Способы преобразования в АЦП определяют достижимые значения их основных параметров, в частности таких, как время преобразования и число разрядов.

Сенсорные системы технического зрения представляют собой терминальные подсистемы предварительной обработки видеоинформации, которые могут взаимодействовать через стандартные линии связи с ЭВМ верхнего уровня. Они являются универсальным средством для решения широкого круга задач контроля качества, идентификации и обеспечения управления, в частности, сборочными операциями.

Управление техническими системами

Характерным примером структурной реализации системы технического зрения является схема, приведенная на рис. 2.21.



Рис. 2.21. Схема системы технического зрения

В качестве рецепторных блоков используются несколько видеокамер, каждая из которых управляется платой аналогового интерфейса путем сравнения с пороговым уровнем для преобразования изображения в цифровое отображение. После сжатия по критерию значимости информация анализируется центральным процессорным блоком.

Подсистемы технического зрения способны идентифицировать детали на движущемся конвейере, распознавать ориентацию деталей и выделять перекрывающиеся детали. В процессе распознавания процессор рассчитывает параметры объекта и сравнивает их с данными, сформированными на этапе обучения.

Автоматические тестеры (АТЕ) - это автоматические контрольно измерительные комплексы, в которых основной метод контроля заключается в подаче с помощью ЭВМ, являющейся внешней по отношению к контролируемому объекту, тестирующих воздействий с контролем путем сравнения с заранее заданным значением ответных реакций контролируемого объекта. В радиопромышленности, например, АТЕ используются для контроля интегральных схем и печатных узлов. Типовая секция формирования тестовых воздействий для

Управление техническими системами

АТЕ имеет в своем составе программируемые источники питания, генераторы и схемы коммутируемой подачи сигналов на тестируемый объект.

В состав измерительной части АТЕ обычно входят цифровые мультипликаторы, счетчики-таймеры и коммутируемые схемы приема выходных сигналов с тестируемого объекта. Как правило, все перечисленные устройства в блочном исполнении комплектуются ЭВМ. Конкретный состав блоков, их технические характеристики, возможности коммутации и перепрограммирования зависят от типа контролируемых объектов, а также от вида контроля. В составе АТЕ могут быть использованы внешние интерфейсы для включения АТЕ в локальную вычислительную сеть.

Координатные измерительные машины (КИМ) - это автоматическое средство высокоточных измерений, обладающее универсальной техникой программирования. Они могут не только измерять типовые поверхности, но и определять систему координат положения различных специальных поверхностей относительно базовых. Универсальные КИМ позволяют контролировать параметры корпусных деталей, валов, рычагов, втулок и других изделий, поверхности которых образуют плоскости, цилиндры, конусы, сферы, а также линии пересечения различных поверхностей. При этом результаты измерений представляются в виде отпечатанных протоколов аттестации или оперативных сообщений на средствах отображения буквенно-цифровой и графической информации. Одновременно эти данные могут накапливаться в ЭВМ для последующей статистической обработки.

Обобщенная схема КИМ дана на рис. 2.22.

Координаты точек детали, измеряемой с помощью прямолинейных перемещений измерительных головок осязывающей подсистемы, измеряются в декартовой системе координат. При этом начало координат выбирается свободно, а направления осей должны совпадать с направлениями перемещения подвижных узлов базовой части КИМ, несущих измерительные головки или измеряемую деталь.

Управление техническими системами



Рис. 2.22. Обобщенная схема КИМ

С помощью встраиваемых поворотных столов можно обеспечить увеличение числа координатных перемещений за счет поворота измеряемой детали относительно координатных осей. Перемещения реализуются обычно подсистемой электромеханических приводов, а автоматическое считывание значений перемещений - измерительными преобразователями индукционного и фотоэлектрического типов. Вся обработка результатов измерения осуществляется управляющим вычислительным комплексом, в состав которого кроме ЭВМ, стандартных периферийных устройств и блока управления электроприводами входят нормирующие и другие необходимые виды преобразователей. К основным задачам обработки измерений относятся определение координат центров измерительных наконечников, формирование системы координат измеряемой детали и сравнение обработанных результатов измерений с эталонными данными.

На базе универсальных измерительных машин и унифицированных измерительных систем отдельных параметров изделий создаются *контрольно-измерительные ячейки*. Их использование позволяет повысить технико-экономические показатели САК при выходном контроле сложных изделий, например, сверхбольших интегральных схем.

При выносном контроле, обеспечиваемом контрольно-измерительными ячейками, широкое распространение получили измерительные машины для контроля линейных размеров, формы и взаимного расположения плоскостей. В

Управление техническими системами

измерительных ячейках, осуществляющих послеоперационный контроль, целесообразно использовать *измерительные роботы*, предназначенные для встраивания в технологические линии. На рис. 2.23 изображен внешний вид измерительного робота.

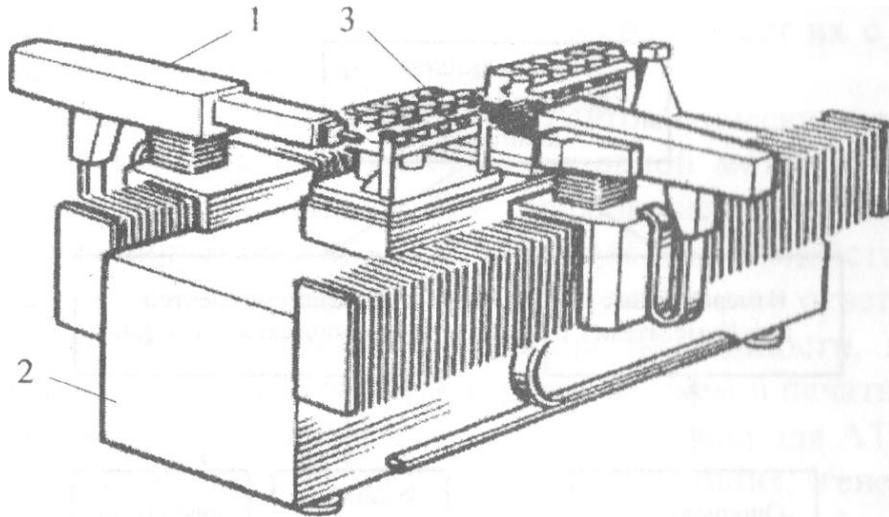


Рис. 2.23. Измерительный робот:

1 - манипулятор, 2 - станина, 3 - измеряемые детали

Такие роботы имеют манипуляторы, перемещающиеся относительно станины, и обладают высокими динамическими возможностями. Для повышения точности в них применяют компенсацию возможных ошибок программным способом по параметрам эталонной детали, записанным в памяти робота.

Лекция №18

по теме: Автоматические транспортные системы.

1. Автоматические транспортные системы

Автоматические транспортные системы вместе с автоматическими складами образуют единую *автоматическую транспортно-накопительную систему* (АТНС). Работа АТНС определяется качественными характеристиками производства и его функциональной направленностью.

Структура АТНС может быть подразделена на межцеховые, цеховые и локальные уровни (рис. 2.24).

Управление техническими системами

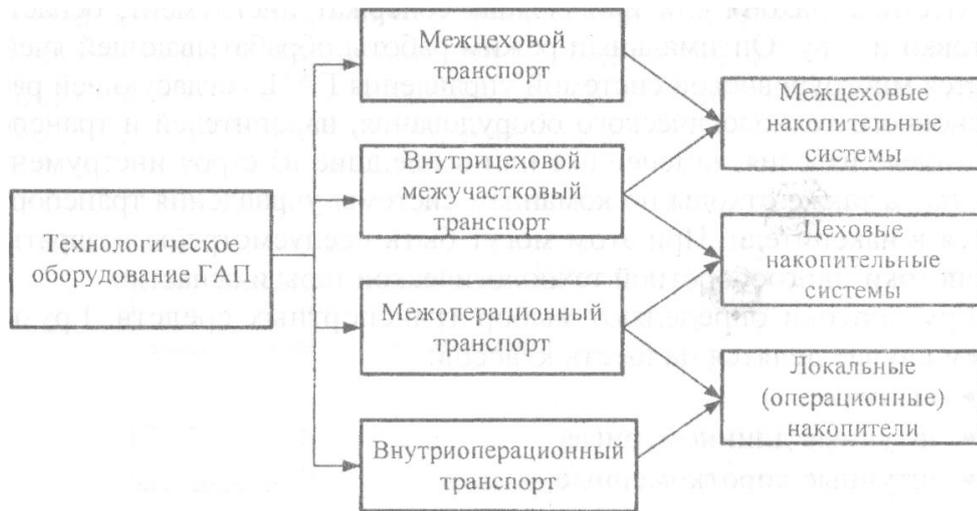


Рис. 2.24. Уровни транспортно-накопительной системы

Транспортные связи охватывают межцеховые, межучастковые и межоперационные грузопотоки, а также все элементы перемещений, включая ориентацию и установку заготовки, съем изделий и их кассетирование.

Автоматические склады, кладовые и операционные накопители выполняют функции буферных устройств, сглаживающих нарушение ритма работы технологического оборудования.

Грузопотоки промышленного предприятия имеют множество взаимно пересекающихся и разветвленных связей (рис. 2.25).

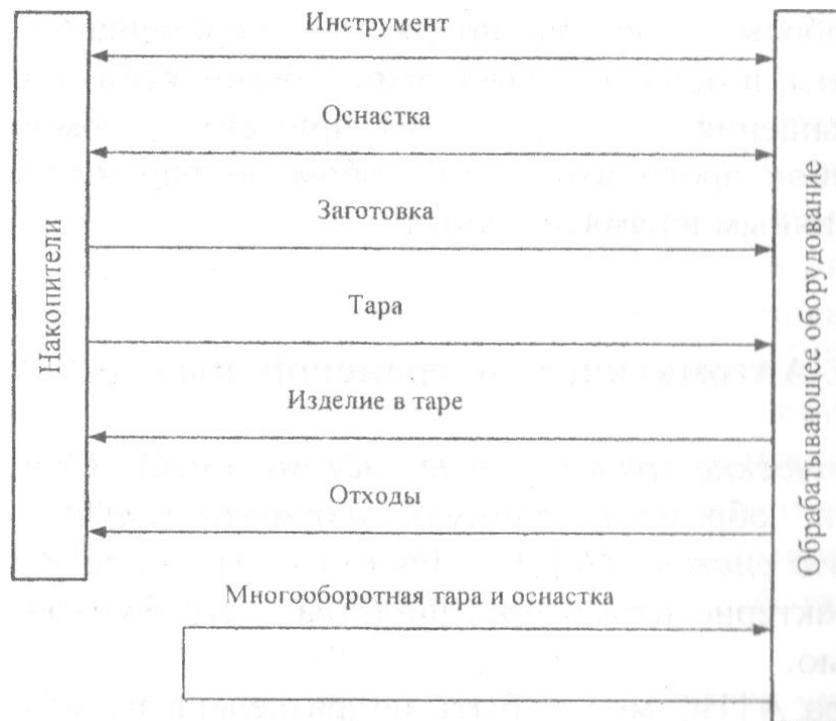


Рис. 2.25. Грузопотоки промышленного предприятия

Местные накопители или склады содержат инструмент, оснастку, заготовки и тару. Оптимальный режим работы обрабатывающей ячейки задается

Управление техническими системами

многоуровневой системой управления ГАП, согласующей работу основного технологического оборудования, накопителей и транспорта. Готовые изделия, замененные или вышедшие из строя инструмент и оснастка, а также отходы по командам системы управления транспортируются в накопители. При этом могут быть предусмотрены возвратные грузопотоки многооборотной технологической тары и оснастки.

Грузопотоки определяют выбор транспортных средств. Грузы в общем случае делятся на шесть классов:

- 1) сыпучие,
- 2) штучные длинномерные,
- 3) штучные короткомерные,
- 4) штучно-массовые,
- 5) газообразные,
- 6) наливные.

Исходя из транспортно-технологических характеристик грузы классифицируются по массе, размеру, форме, способу загрузки, виду и свойствам материала.

Классификация транспортируемых изделий по массе (кг) приведена ниже: миниатюрные (до 0,01 кг), легкие (до 0,5 кг), средние (до 16 кг), переходной массы (до 125 кг) и тяжелые (более 125 кг).

По способу загрузки грузы делятся на грузы в таре, без тары, ориентированные, кассетированные, в пакетах, на спутниках или транспортируемые навалом.

По форме грузы бывают: в виде тел вращения, корпусные, дискообразные, спицеобразные и т. д.

По виду материала грузы подразделяются на металлические (сталь, цветные металлы, сплавы) и неметаллические (керамика, пластмасса, стекло, дерево и т. д.).

По свойствам материала грузы делятся на твердые, хрупкие, пластичные и магнитные.

Грузопотоки подразделяются на *непрерывные* и *дискретные*, которые, в свою очередь, могут быть ответвленными, прямоочными, возвратными или обладающими теми и другими признаками.

На основе анализа грузопотоков выбирается соответствующая структура АТНС. При многорядном расположении оборудования наиболее целесообразна

Управление техническими системами

структура автоматической разгрузки с разветвлением трассы, позволяющая реализовать несколько функций одним транспортным средством (рис. 2.26).

С автоматического склада заготовки в маркированной таре с помощью автоматического штабелера подаются на перегрузочный стол, который служит приемной станцией тележки, снабженной устройством для загрузки и разгрузки. Это устройство передает заготовки на накопители, а готовые изделия забирает с них по мере необходимости и в соответствии с приоритетом в обслуживании.

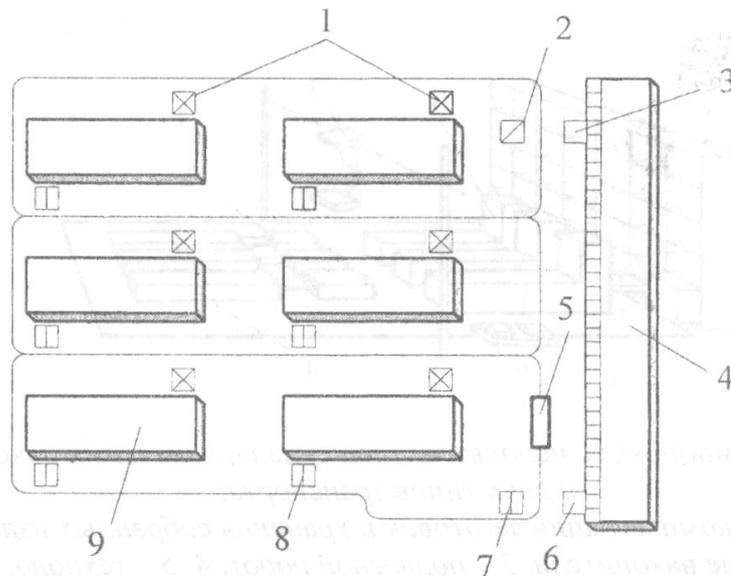


Рис. 2.26. АТНС с разветвленной трассой:

1 – накопители, 2 – система контроля размеров, 3 – перегрузочный стол, 4 – автоматический склад, 5 – тележка, 6 – приемный стол, 7 – стол для поддонов, 8 – поддоны для отходов, 9 – технологическое оборудование

Такая схема обеспечивает гибкость в управлении передачей заготовок с оборудования при наличии контроля их размеров. В тележке также перемещаются пустые поддоны для отходов. Для складирования поддонов предназначен специальный стол. Изделия в таре подаются на приемный стол, откуда автоматическим штабелером загружаются в свободные ячейки склада.

Число транспортных связей можно уменьшить путем рациональной компоновки накопителей в зоне расположения технологического оборудования. За счет отдельного применения складов заготовок и изделий упрощаются грузопотоки обрабатываемых деталей. Благодаря размещению инструментального склада и системы контроля вблизи технологического оборудования сокращается объем транспортировки инструмента и оснастки. Отходы передаются в централизованную систему удаления отходов, которая может быть независимой от транспортных средств.

Управление техническими системами

Для повышения надежности работы гибкого автоматизированного производства сборки АТНС могут включать несколько видов накопителей или складов и несколько типов транспорта. Так, на рис. 2.27 представлена компоновка ГАП сборки, имеющая склад комплектации заготовок и хранения собранных изделий, а также локальные накопители, приближенные к технологическому оборудованию или встроенные в него.

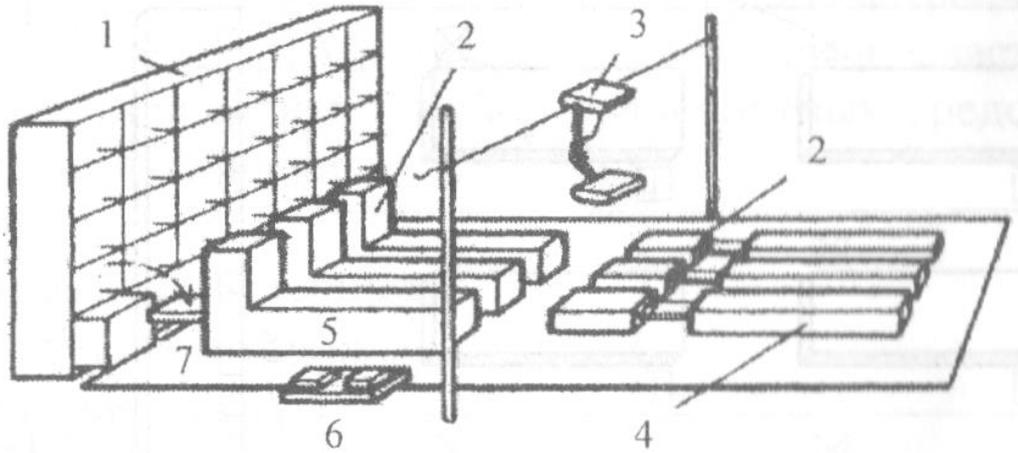


Рис. 2.27. Компоновка с использованием склада, локальных накопителей и двух типов транспорта:

- 1 - склад комплектации заготовок и хранения собранных изделий, 2 - локальные накопители, 3 - подвесной робот; 4, 5 - технологическое оборудование, 6 - автоматическая тележка; 7 заготовка

Накопители предназначены для создания страховых или технологических заделов и снабжены устройствами автоматической загрузки. Межоперационные перегрузки выполняются подвесным роботом, а связь между модулями сборки и складом комплектующих изделий осуществляется автоматической тележкой.

Экономия производственных площадей достигается при объемной компоновке ячеек ГАП. При кратковременном хранении миниатюрных и легких изделий радиопромышленности в спутниках с фиксацией экономичны подвесные накопители.

2. Технические средства АТНС

Состав технических средств АТНС включает основные и вспомогательные средства (рис. 2.28).

Управление техническими системами



Рис. 2.28. Состав технических средств АТНС

К основному оборудованию АТНС относятся конвейеры, транспортные роботы, устройства пневмо- и гидротранспорта, склады, стеллажи, штабелеры, ПР, а также ЭВМ, микропроцессоры, датчики и пульта управления.

К вспомогательному оборудованию АТНС относятся ориентаторы, адресователи, толкатели, сбрасыватели, накопители, подъемные и поворотные-координатные столы, подъемники, вибробункеры, перегрузочные тележки, питатели и тара.

Каждое из перечисленных технических средств АТНС подразделяется на различные типы в зависимости от назначения. Классификация основных типов конвейеров дана на рис. 2.29.



Рис. 2.29. Классификация основных типов конвейеров

Ленточные, пластинчатые и роликовые конвейеры обеспечивают высокую надежность транспортных связей. Они дешевы и просты в исполнении. Для

Управление техническими системами

транспортирования отходов используют скребковые, пластинчатые и винтовые конвейеры. Скребковые конвейеры позволяют повысить эффективность выполнения операции транспортировки за счет одновременного измельчения отходов неподвижными ножами, зубья которых направлены против хода тягового органа под углом. После этого отходы передвигаются скребками к концевому участку конвейера, где проваливаются в приемные конвейеры через множество различных отверстий, расположенных в шахматном порядке, что позволяет сортировать отходы по фракциям.

В АТНС применяются монорельсовые дороги (*монорельсы*), выполняемые в виде подвесных дорог и обслуживающие межцеховые и внутрицеховые грузопотоки. Их преимущества - высокая экономичность, большой диапазон скоростей, возможности сокращения производственных площадей, автоматического адресования и использования программного управления.

По сложности схемы дорог подразделяются на элементарные, простые и сложные. Элементарная схема не имеет ответвлений, простая схема имеет до пяти стрелочных переводов, а сложная схема может иметь множество стрелочных переводов, поворотных кругов и межэтажных подъемников. Максимальная грузоподъемность монорельсовых дорог достигает 20 т.

Монорельс можно крепить непосредственно к несущим частям производственных зданий, применяя промежуточные балки. Существуют гибкая и жесткая формы подвесных путей. Гибкая форма позволяет балке свободно поворачиваться и смещаться. Управление подвижным составом монорельса включает операции по переводу стрелок, изменению скорости движения, остановки и согласование с работой накопительных и передаточных устройств.

К недостаткам монорельсовых дорог, так же, как и конвейеров, можно отнести сложность изменения длины и направления трассы, перехода на большую грузоподъемность и достижения высокой точности позиционирования.

Важную роль в создании АТНС играют *транспортные роботы*. Они являются гибким средством реализации межучастковых и межоперационных связей. Преимущества транспортных роботов заключаются в малых габаритах, большом диапазоне регулирования производительности, автономности и возможности освобождения проездов после окончания работы для других видов транспорта.

На рис. 2.30 показана классификация транспортных роботов.

Управление техническими системами



Рис. 2.30. Классификация транспортных роботов

Все транспортные роботы делятся на напольные, вертикального перемещения и подвесные. Напольные транспортные роботы могут быть рельсовыми и безрельсовыми, а подвесные - монорельсовыми, консольно-крановыми и порталными. Роботы вертикального перемещения могут быть с дискретным и непрерывным движением.

В АТНС ГАП широко применяются напольные безрельсовые автоматические тележки, которые могут быть грузонесущими и тянущими. К последним относятся тягачи и буксиры с прицепами. Безрельсовые грузонесущие автоматические тележки имеют широкие возможности за счет простоты создания новых транспортных путей и оснащения их устройствами автоматизации погрузочно-разгрузочных операций, указанных в классификации. Транспортные роботы можно оборудовать подъемными, подъемно-поворотными столами и выдвигными штангами для подъема и фиксации на нужной высоте поддонов с грузами или кассет с заготовками.

В корпусе автоматической тележки монтируются электроприводы движения и поворота, питающиеся от аккумулятора, и устройство управления движением и подъемом на основе бортовой ЭВМ, устройство маршрутослежения, например оптоэлектронного типа, и датчики контроля за состоянием узлов. Для обеспечения безопасности эксплуатации применяется механическая система отключения привода от дуги безопасности, срабатывающая в случае прикосновения к препятствию. Отсчет пройденного пути производится с помощью датчика, работающего от колеса тележки. Информацию о маршруте движения тележка получает на

Управление техническими системами

станциях останова, размещенных у склада и технологического оборудования, посредством оптоэлектронной системы обмена информацией без электрического контакта. Маршрутослежение осуществляется по светоотражающей полосе, проведенной вдоль трассы движения. Тележка в автоматическом режиме может подходить к станции подзаряда аккумуляторов после окончания работы.

На рис. 2.31 приведена конструкция тележки с манипулятором, выполняющим погрузочные и разгрузочные операции.

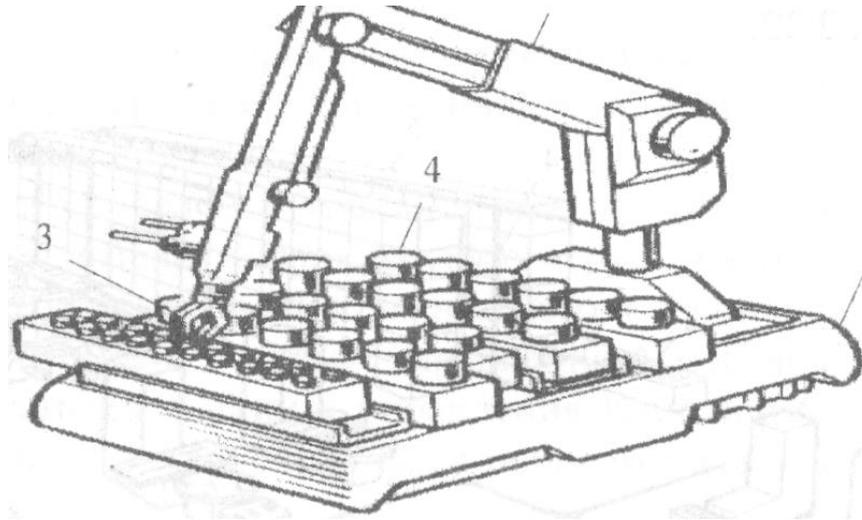


Рис. 2.31. Вариант исполнения тележки с манипулятором:

1 - мобильная платформа, 2 - манипулятор, 3 - захватное устройство, 4 - детали

Робот имеет устройство, предназначенное для захвата спутников с деталями и установки их на приемные столы. Управление тележками производится от бортовой ЭВМ. Оптоэлектронная система маршрутослежения может состоять из световых маяков, расположенных в требуемой последовательности на потолке производственного помещения, и датчиков на приборах с зарядовой связью, установленных на роботе. Тележка во время движения ориентируется на световые маяки или на специальные метки на технологическом оборудовании, предназначенные для точного позиционирования тележки относительно него. Модульность конструкций тележки и робота позволяет компоновать различные модификации их сочетаний.

Безрельсовый автоматический транспорт может использоваться в технологических поточных линиях сборки, когда заготовка на тележке по ходу движения оснащается узлами и деталями вплоть до выхода готового изделия. В производстве миниатюрных и легких изделий радиопромышленности несколько автоматических тележек с автоматическим адресованием могут обслуживать подвесную транспортную систему. При этом пространственная компоновка трассы

Управление техническими системами

включает в себя горизонтальные и вертикальные участки, а также площадки стрелочных переходов. В пределах каждого этапа трасса образует замкнутую кольцевую линию, движение по которой осуществляется в одном направлении. На каждом этаже межэтажных участков трассы имеются поворотные устройства для замыкания внутриэтажного контура трассы и подвода тележек на вертикальные треки в зависимости от адреса.

Фрагмент компоновки АТНС с тремя транспортными роботами показан на рис. 2.32.

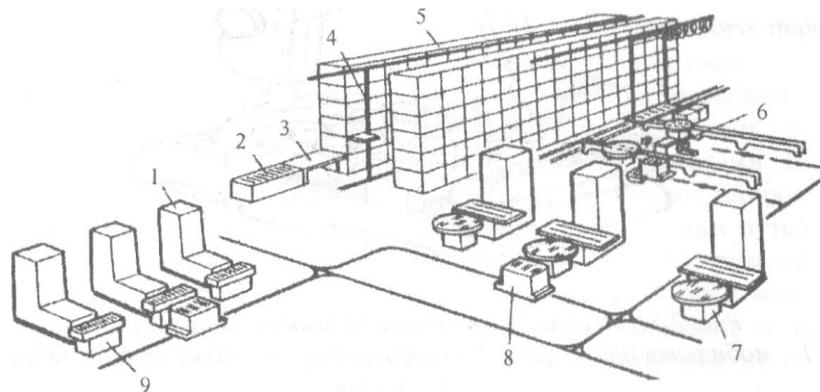


Рис. 2.32. Фрагмент компоновки АТНС с тремя транспортными роботами:

- 1 - обрабатывающие центры, 2 - транспортер, 3 - приемный стол, 4 - штабелер, 5 - автоматический склад, 6 - участок контроля, 7 - поворотные столы, 8 - транспортные роботы,
- 9 - загрузочные транспортеры

С автоматического склада штабелер передает заготовки на приемный стол, где они крепятся на унифицированных палетах. По мере необходимости с помощью транспортера палеты загружаются на один из трех автоматических транспортных напольных роботов, обслуживающих загрузочные транспортеры обрабатывающих центров, и загрузочные поворотные столы других многоцелевых станков с ЧПУ. Готовые изделия передаются транспортным роботом на участок контроля или на следующий участок - участок производства. Для маршрутослежения используется индукционная система. В ней информация о направлении движения, поворотах и остановках передается от управляющей ЭВМ по индукционному кабелю, вдоль которого движется транспортное средство.

Для межоперационного транспортирования изделий можно применять монорельсовые транспортные роботы. Они состоят, как правило, из электротележки, перемещающейся по монорельсу, и установленного на ней ПР.

Управление техническими системами

Такие транспортные роботы отличаются от монорельсовых подвесных дорог с тележками автоматического адресования тем, что имеют устройство для манипулирования изделиями и тарой. Это позволяет выполнять различные элементы технологических операций, такие, как ориентация, укладка, перенос и перестановка изделий и тары по программируемой траектории, загрузка и разгрузка подвесок грузонесущих конвейеров, а также загрузка технологического оборудования.

Системы управления транспортно-накопительными системами в общем случае имеют иерархическую структуру обработки информационных потоков, состоящую из нижнего и верхнего уровней.

Нижний уровень системы управления АТНС включает локальные устройства автоматизации и управления транспортным оборудованием, штабелерами и транспортными роботами. На этом уровне обеспечивается:

- управление приводами транспортных систем;
- точное позиционирование транспорта у рабочего места;
- останов транспорта при аварийных ситуациях;
- загрузка и разгрузка накопителей;
- выработка и передача сигнала для контроля и диагностики.

Верхний уровень системы управления АТНС осуществляет:

- 1) задание маршрутов движения транспорта (адресование);
- 2) контроль и диагностику неисправностей;
- 3) учет движения груза.

К устройствам управления и автоматизации нижнего уровня предъявляются требования полной автоматизации транспортного процесса, сопряжения с системой управления верхнего уровня, адаптируемости к изменению транспортных потоков, модульности построения, высокой надежности устройств автоматики (наработка на отказ не менее 5000 ч), наличия на выходе унифицированного сигнала, контроля правильности работы.

В комплекс технических средств системы управления нижнего уровня обычно входят датчики, предназначенные для определения наличия или отсутствия груза, а также датчики положения транспорта, уровней для накопительных систем, усилий, безопасности и другие измерительные приборы.

Использование ЭВМ позволяет реализовать логические функции управления (адресование, блокировку, переключение режимов работы приводов, управление приводами) не аппаратным, а программным путем. ЭВМ

Управление техническими системами

обеспечивает связь с верхним уровнем управления и придает системе гибкость и модульность. Связь ЭВМ с датчиками и исполнительными механизмами осуществляется с помощью устройства ввода-вывода.

Система автоматического контроля и диагностики работы АТНС предназначена для обеспечения бесперебойного функционирования оборудования грузопереработки и его эксплуатационной надежности путем оперативного обнаружения критических и аварийных ситуаций. Система контроля и диагностики осуществляет сбор информации о состоянии наиболее ответственных узлов АТНС и элементов системы управления, обрабатывает эту информацию по заданному алгоритму, принимает решения о возможности дальнейшего функционирования составляющих элементов АТНС и выводит информацию о неисправностях на пульт управления и индикации. Система функционирует в режимах диагностирования начального состояния АТНС и систем управления, тестовой диагностики и диагностирования текущего состояния оборудования АТНС.

В режиме диагностирования начального состояния оборудования АТНС и систем управления определяется готовность всего комплекса оборудования к началу работы. В этом режиме производится контроль цепей электропитания и управления, исходного состояния отдельных узлов АТНС, правильности исходных сигналов от датчиков положения и адресации. Диагностирование проводится в начале каждого рабочего дня перед пуском транспортно-накопительного комплекса.

Задачами режима *тестовой диагностики* являются проверка работоспособности основных составляющих АТНС при воздействии на них тестовых программ, а также профилактическое выявление неисправных узлов системы, параметры которых близки к отказу. Программа включает контроль за прохождением технологических команд на элементы АТНС с измерением уровня ответных сигналов и проверкой последовательности и времени их получения. В результате отработки тестовой программы на пульте оператора высвечиваются номера узлов подсистем, режимы которых не соответствуют задаваемым значениям по критериям работоспособности и прогнозирования. Данная проверка проводится перед началом работы комплекса после диагностики его состояния.

В режиме диагностирования текущего состояния оборудования АТНС контролируется правильность выполнения управляющих программ в наиболее информативных узловых точках. В память диагностического устройства вводится

программа, содержащая информацию о заданных состояниях оборудования системы и элементах системы управления, соответствующих каждому шагу управления. В момент перехода к следующему шагу происходит сравнение текущих и заданных параметров с одновременным измерением времени отработки данного шага.

Лекция №19

по теме: Автоматические складские системы

1. Автоматические складские системы

Автоматизированная складская система предназначена для приема, хранения, выдачи в производство и учета исходного сырья, основных материалов и заготовок, вспомогательных материалов, порожней тары, инструмента и приспособлений, сменных захватных устройств и запасных частей для станков и ПР, а также для накопления и временного хранения готовых изделий и отходов производства с целью обеспечения эффективного производственного процесса.

Автоматические склады осуществляют взаимодействие производства с внешними по отношению к нему системами промышленного предприятия, например с другими производственными подразделениями и внутризаводским транспортом.

Автоматический склад может включать в себя различные сочетания технологических участков:

- зоны хранения груза;
- участков приема и выдачи грузов на внутризаводской транспорт;
- участков укладки деталей или изделий в транспортно-складскую тару;
- участков приема и выдачи грузов из зоны хранения;
- участков приема и выдачи грузов на внутрисистемный транспорт.

Через склады проходят все материальные грузопотоки. Автоматические склады подразделяются на стеллажные и конвейерные.

Схема стеллажного склада с автоматическим *стеллажным краном-штабелером* и двумя стеллажами приведена на рис. 2.33.

Управление техническими системами

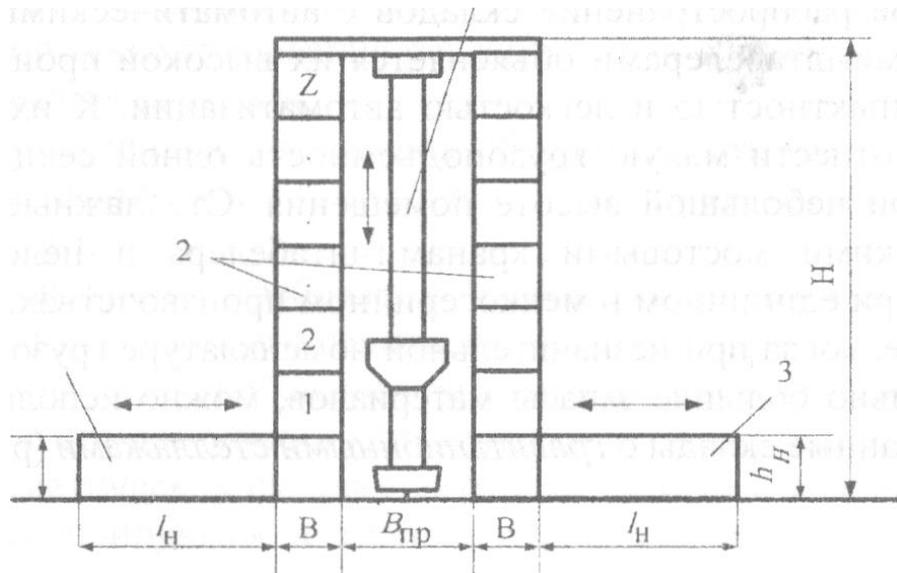


Рис. 2.33. Схема стеллажного склада с автоматическим стеллажным краном-штабелером и двумя стеллажами:

1 - автоматический стеллажный кран-штабелер, 2 — стеллажи, 3 - накопители

Основными параметрами склада являются ширина стеллажа B , ширина прохода для крана-штабелера $B_{пр}$, длина накопителя $l_н$, высота склада H и высота накопителя $h_н$.

Схема стеллажного склада с автоматическим мостовым краном-штабелером и тремя стеллажами приведена на рис. 2.34

Управление техническими системами

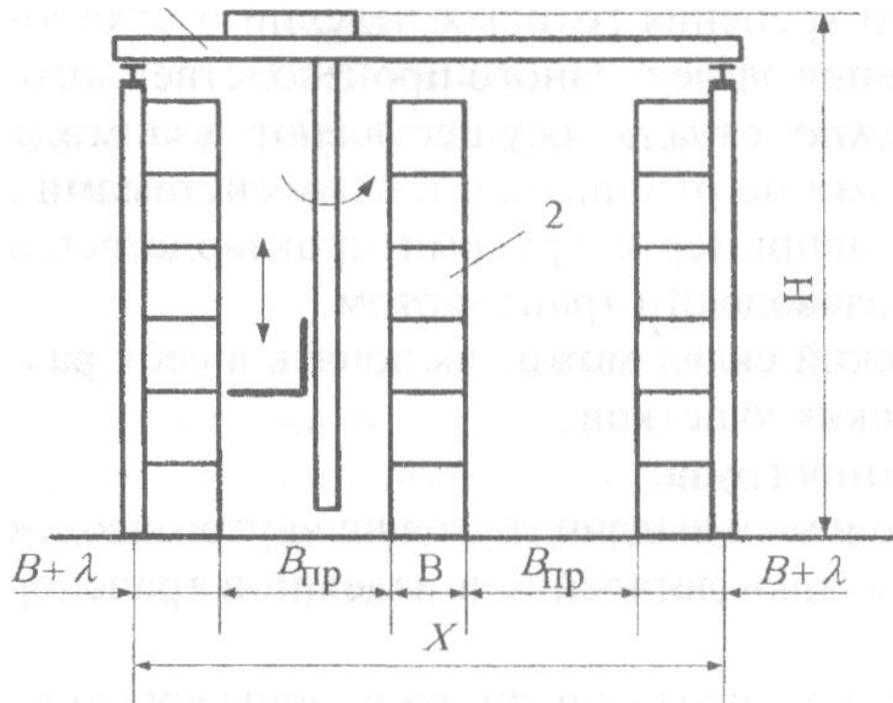


Рис. 2.34. Схема стеллажного склада с автоматическим мостовым краном-штабелером и тремя стеллажами:

1 - мостовой кран-штабелер, 2 - стеллаж

Дополнительными параметрами этого склада являются ширина склада X и зазор между грузом и стеллажом λ .

Широкое распространение складов с автоматическими стеллажными кранами-штабелерами объясняется их высокой производительностью, компактностью и легкостью автоматизации. К их недостаткам можно отнести малую грузоподъемность одной секции склада, особенно при небольшой высоте помещения. Стеллажные склады с автоматическими мостовыми кранами-штабелерами целесообразно применять при единичном и мелкосерийном производствах.

В случае, когда при незначительной номенклатуре грузов требуются сравнительно большие запасы материалов, можно использовать автоматизированные склады с *гравитационными стеллажами* (рис. 2.35).

Управление техническими системами

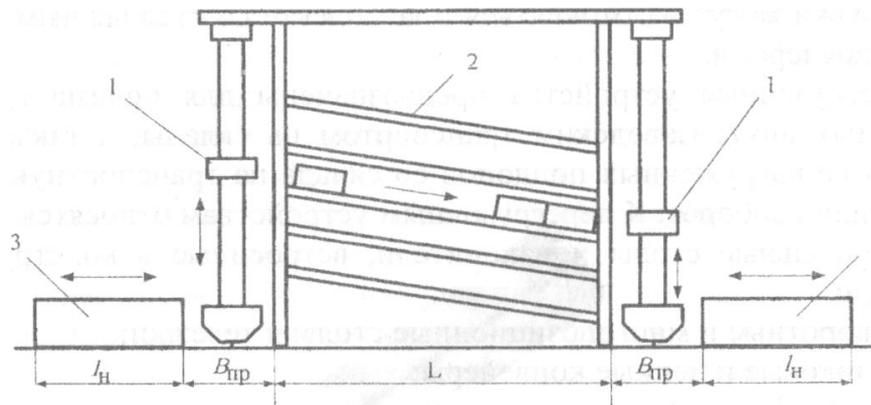


Рис. 2.35. Автоматизированный склад с гравитационными стеллажами:

1 - автоматические каретки-операторы, 2 - гравитационные стеллажи, 3 - перегрузочные устройства

К оборудованию автоматических складов относятся складская тара, стеллажи, краны-штабелеры, перегрузочные устройства, а также системы автоматического управления складами.

2. Требования к АСС

Требования к складскому оборудованию делятся на технические, экономические, эксплуатационные, организационные и эргономические.

Технические требования подразделяются на требования к геометрическим и скоростным характеристикам оборудования. Например, геометрические характеристики кранов-штабелеров должны обеспечивать наиболее полное использование объема зоны хранения, а скоростные характеристики - требуемую производительность.

Экономические требования регламентируют наиболее полное использование объема склада.

Эксплуатационные требования обуславливают такую характеристику оборудования, как точность его позиционирования относительно ячеек склада.

Организационные требования обеспечивают условия безопасности труда обслуживающего персонала.

Эргономические требования гарантируют удобство работы с оборудованием и его доступность для очистки и дезинфекции.

На автоматических складах заготовки, детали и изделия перегружаются и складываются в транспортно-складскую тару, представляющую собой ящичные, стоечные или плоские поддоны, или в специальную технологическую тару в виде кассет или спутников.

Управление техническими системами

Грузы в таре складываются на стеллажах, которые могут быть односторонними и двусторонними. Они состоят из рам, полок, винтовых растяжек и фундаментальных болтов. Для автоматических складов стеллажи могут изготавливаться в комплекте со стеллажными кранами-штабелерами.

Перегрузочные устройства предназначены для приема грузов, подвозимых внутризаводским транспортом на склады, а также для выдачи уже нагруженных поддонов со склада на транспортную подсистему или наоборот. К перегрузочным устройствам относятся:

- консольные столы и накопители, встроенные в конструкции стеллажей;
- поворотные и многопозиционные столы и тележки;
- роликовые и цепные конвейеры;
- опускные и подъемные секции;
- толкатели.

Характеристики некоторых из этих устройств приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Перегрузочные устройства грузоподъемностью 500 кг для тары размерами 600 x 800 мм

Устройство	Скорость перемещения груза, м/мин	Мощность привода, кВт	Масса, кг	Назначение
/	2	3	4	5
Конвейер роликовый	7,5	0,75	340	Подача тары в зону действия стеллажного крана-штабелера с поворотным столом
Стол поворотный	7,5	1,5	450	Передача тары с роликового конвейера на такой же конвейер, расположенный под углом 90° к нему в плане
Конвейер роликовый	15	0,55	350	Подача тары в зону действия крана-штабелера с опускной секцией и цепным конвейером
Секция роликовая опускная	15	0,55	680	Перегрузка тары с роликового конвейера на цепной конвейер

Управление техническими системами

Конвейер цепной	15	1,1	470	Подача тары в зону действия крана-штабелера с опускной секцией и роликовым конвейером
-----------------	----	-----	-----	---

Перегрузочные устройства автоматических с кранов ГАП можно оснащать аппаратурой для автоматического контроля массы и габаритов грузов, а также приспособлениями для укладки деталей в тару, их ориентирования, подсчета числа деталей, изделий и тары.

Системы автоматического управления складами составляют часть общей системы управления производством. Основными их функциями являются:

- 1) автоматизация перемещения грузов на складе;
- 2) учет наличия, прибытия и отправления грузов;
- 3) прием и обработка управляющей информации;
- 4) выдача информации о работе склада;
- 5) общее управление и планирование работы склада.

Системы автоматизации склада на нижнем уровне включают в себя приводы исполнительных механизмов, пускорегулирующую аппаратуру, устройства автоматического позиционирования и логического управления и устройства ввода-вывода информации.

Компоновка складских систем ГАП зависит от типа производства, производственной программы, типа внутрицехового транспорта, характеристик конструкции производственного корпуса, а также типа и оборудования самих складов.

Наиболее рациональной является такая компоновка складов, когда они максимально приближены к технологическому оборудованию. В этом случае автоматический кран-штабелер или транспортно-складской робот не только выполняет функции складирования, но и распределяет материалы, заготовки и готовые изделия по рабочим местам. При этом обеспечивается экономия производственных площадей, непосредственная стыковка склада с транспортом и роботизированными технологическими комплексами, повышение надежности всей транспортно-складской системы, происходит общий рост производительности труда и уменьшение затрат на выполнение операций перемещения.

Рационально скомпоновать транспортно-складские системы возможно при использовании в качестве транспортно-складских роботов автоматических стеллажных кранов-штабелеров и при расположении одного или нескольких

Управление техническими системами

стеллажей вдоль производственного участка, рядом с робототехнологическими комплексами.

На рис. 2.36 показана схема типовой секции транспортно-накопительной системы с одним стеллажом.

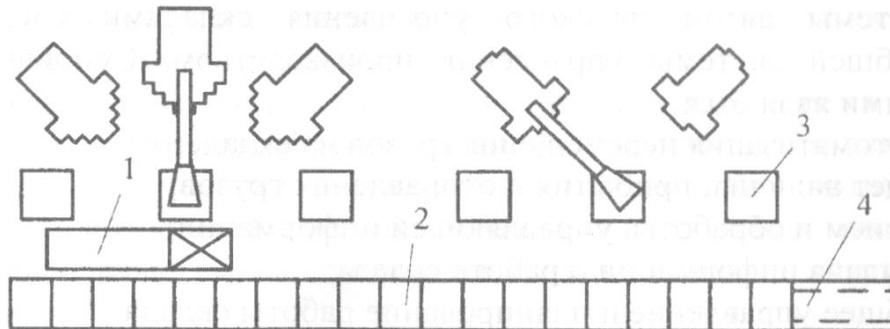


Рис. 2.36. Типовая секция транспортно-накопительной системы:

- 1 - автоматический стеллажный кран-штабелер, 2 - стеллаж, 3 - перегрузочные устройства робототехнологических комплексов, 4 - цепной конвейер-накопитель для приема и выдачи грузов

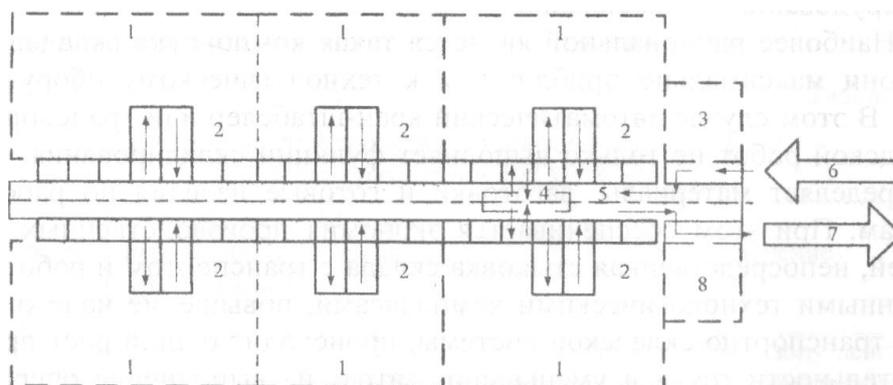


Рис. 2.37. Центральная компоновка склада ГАП с автоматическим стеллажным краном-штабелером:

- 1 - производственный участок с робототехнологическими комплексами, 2 - перегрузочные устройства и накопители, 3 - участок входного контроля, 4 - автоматический стеллажный кран-штабелер, 5 - объединенный склад материалов, заготовок, инструмента, пустой тары и готовых изделий, 6 - поступление материалов, заготовок, пустой тары и инструмента; 7 - выход готовых и бракованных изделий; 8-участок технического контроля

Единый многофункциональный склад с клеточными стеллажами и автоматическим стеллажным краном-штабелером используют при небольших грузопотоках, незначительных сроках и объемах хранения заготовок и готовых

Управление техническими системами

изделий. При линейных компоновках склады располагаются в торцах производственного участка и оснащаются стеллажными или мостовыми автоматическими кранами-штабелерами.

Центральная компоновка склада с автоматическим стеллажным краном-штабелером приведена на рис. 2.37.

При сравнительно небольших грузопотоках автоматические краны-штабелеры можно применять в качестве транспортно-складских роботов, предназначенных не только для обслуживания стеллажного склада или транспортных операций в пределах длины стеллажей, но и для подачи заготовок и материалов непосредственно на перегрузочные устройства робототехнических комплексов, выходящих за пределы стеллажей.

Компоновочные схемы со стеллажными кранами-штабелерами применяют при больших грузопотоках и незначительных объемах хранения грузов, а с мостовыми кранами-штабелерами - при меньших грузопотоках и больших объемах хранения. При больших грузопотоках и объемах хранения грузов рекомендуется создавать отдельные склады для заготовок и готовых изделий. При этом транспортные операции осуществляются или транспортно-складскими роботами, обслуживающими одновременно стеллажные склады, или самостоятельной транспортной подсистемой.

Лекция № 20

по теме: Примеры автоматизации технологических процессов

1. Автоматизация ТП изготовления корпусных деталей ЭВМ по корпусно-технологическим уровням

При автоматизации технологического процесса *изготовления корпусных деталей ЭВМ* учитывается, что современные ЭВМ имеют несколько *конструктивно-технологических уровней* (КТУ) элементов и сборочных единиц. При этом простые сборочные единицы, представляющие более низкий КТУ, входят в состав сложных сборочных единиц, находящихся на более высоком КТУ. Таким образом, изделия различных КТУ имеют иерархическую структуру,

Управление техническими системами

обеспечивающую последовательную компоновку ЭВМ, начиная от простейших до наиболее сложных в конструктивном отношении сборочных единиц.

В структуре ЭВМ различают шесть КТУ. К изделиям нулевого КТУ относятся покупные элементы, в первую очередь интегральные микросхемы (ИМС). Сборочные единицы первого КТУ представляют собой ячейки ЭВМ в виде плат с печатным или проводным монтажом. Второй КТУ составляют сборные блоки, субблоки и панели, а третий - приборные шкафы и стойки. К четвертому КТУ относятся сборочные единицы типа больших ЭВМ, а к пятому - ЭВМ со сложными периферийными связями. Деление конструкций ЭВМ на несколько

КТУ обеспечивает возможность автоматизации конструирования, изготовления и контроля сборочных единиц, в частности корпусных деталей ЭВМ.

Для изготовления корпусных деталей ЭВМ целесообразно использовать автоматические линии. Автоматическая линия для комплексной обработки корпусных деталей, управляемая ЭВМ и обслуживаемая роботами, позволяет производить обработку большой номенклатуры корпусных деталей, выпускаемых мелкими сериями. Общий вид такой линии показан на рис. 2.38.

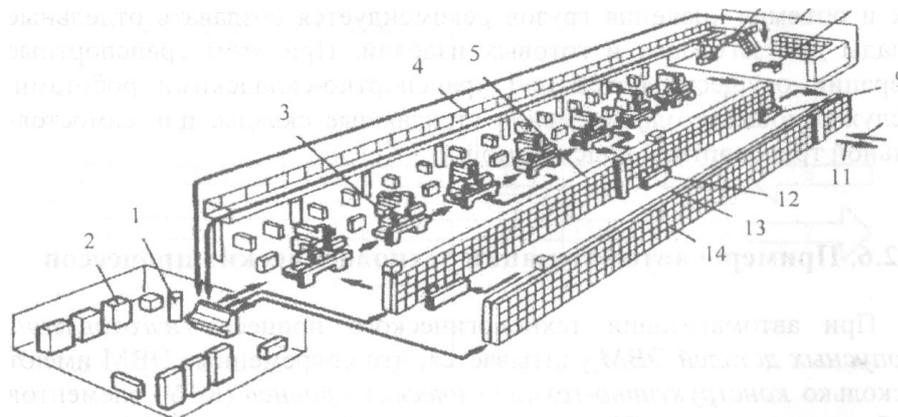


Рис. 2.38. Автоматическая линия для комплексной обработки корпусных деталей:

- 1 - дисплей, 2 - управляющая ЭВМ, 3 - станки номенклатурной линии,
- 4 - центральный инструментальный магазин, 5 - стеллаж для спутников с деталями,
- 6 - установка инструмента в кассеты, 7- инструментальное отделение, 8 - наладка инструмента, 9 - объем готовых деталей, 10 - заготовки, 11- детали, 12 - выборочный контроль деталей,
- 13 - склад заготовок, 14 - склад готовых изделий

Управление линией осуществляется от централизованной ЭВМ, что позволяет обрабатывать корпусные детали по гибко изменяющейся технологии, т. е. в соответствии с требованиями оптимальности загрузки оборудования возможно частичное изменение технологического маршрута обработки.

Управление техническими системами

Запуск и выпуск готовых деталей планируются ЭВМ, производящей необходимые плановые, диспетчерские и инженерные расчеты - расчет режимов резания, нормирования и разработка управляющих программ. Кроме того, ЭВМ комплектует, контролирует и организует смену сотен единиц инструмента, а также управляет всем межоперационным транспортом и процессом производства, включая оперативный контроль каждого рабочего места.

В состав линии включены многоинструментальные станки с ЧПУ типа "обрабатывающий центр", позволяющие в требуемой последовательности выполнять комплекс операций металлообработки - расточку, сверление, нарезание резьб, зенкерование, фрезерование по контуру. Обычно для обработки деталей применяются особые приспособления - *спутники*. В линии имеются моечные посты для струйного удаления стружки с деталей и со спутников.

В линии используются ПР с ЧПУ, в том числе роботы-штабелеры для транспортирования заготовок и деталей со спутниками, а в линии с отдельным складом заготовок и готовых изделий дополнительно применяют два автоматических штабелера.

Линию обслуживают шесть человек: оператор ЭВМ, контролер, два наладчика инструмента и два рабочих для установки и снятия деталей со спутников. Связь между каждым из операторов, а также между любым оператором и ЭВМ производится с помощью дисплеев.

В состав линии входят также два полностью автоматизированных склада, управляемых ЭВМ, один из которых предназначен для подачи инструмента, а второй - для деталей, заготовок и спутников.

В роботизированных линиях обычно возникает необходимость изменения пространственной ориентации заготовок. Для этого можно использовать механизмы поворота, подъема и смещения обрабатываемых деталей, располагающихся в пределах рабочей зоны робота.

2. Автоматизация процессов пайки печатных плат

В производстве современной электронно-вычислительной и радиоэлектронной аппаратуры процессы подготовки электрорадиоэлементов к монтажу и пайке занимают значительное место в технологическом процессе. Усложнение аппаратуры и микроминиатюризация ее сборочных единиц повышают требования к надежности соединений и к оборудованию для монтажа электрорадиоэлементов.

Управление техническими системами

Автоматизация процессов пайки печатных плат должна обеспечивать непрерывную обработку паяемых изделий. Наиболее приемлемыми для этого являются способы групповой пайки излучением, газом, волной или струей припоя, при которых достаточно осуществить поступательное движение печатной платы только в одной плоскости с требуемой по технологии скоростью.

Подготовительные операции групповой пайки печатных плат включают в себя определение способа нанесения защитного покрытия контактных площадок платы для обеспечения их паяемости и очистку поверхностей от окисных пленок, жировых и прочих загрязнений.

Для очистки применяются станки, оснащенные мягкими абразивными кругами, в которых абразивный порошок находится в массе резины или другого эластичного материала. Их использование позволяет получить хорошее качество зачистки поверхностей плат при высокой производительности автоматического оборудования. Защитное покрытие может наноситься с помощью автомата, осуществляющего последовательный прием плат из подающей кассеты на ленту транспортера. Транспортер перемещает платы под распылителем, наносящим покрытие, и складывает их в выходную кассету.

При создании автоматизированных агрегатов пайки предусматривается защита участков платы, не подлежащих пайке, от расплавленного припоя. Для этого используются защитные маски из клеевой бумаги, предназначенные для разового применения. После запайки печатных блоков маски удаляются промыванием в горячей воде.

Процесс подготовки выводов элементов к пайке во многих случаях совмещают с технологическими операциями их формовки и обрезки в соответствии с требованиями конструкции печатного монтажа. Для этого можно использовать автомат, схема которого показана на рис. 2.39.

Вспомогательные операции групповой пайки включают операции нанесения и подсушки флюса, предварительного нагрева платы и деталей, очистки и сушки печатных плат. Их выполнение связано во времени с операцией пайки, следовательно, работа оборудования для выполнения этих операций связана с работой оборудования для пайки.

Основными требованиями, предъявляемыми к оборудованию для нанесения флюсующего состава, являются обеспечение регулируемой подачи необходимого количества флюса и равномерность его поступления в заданном интервале времени.

Управление техническими системами

Для предварительного нагрева и сушки печатных плат можно использовать трубчатые инфракрасные излучатели, а для очистки плат после пайки - установки для их очистки в парах растворителя, например фреона, и установки, применяющие ультразвук.

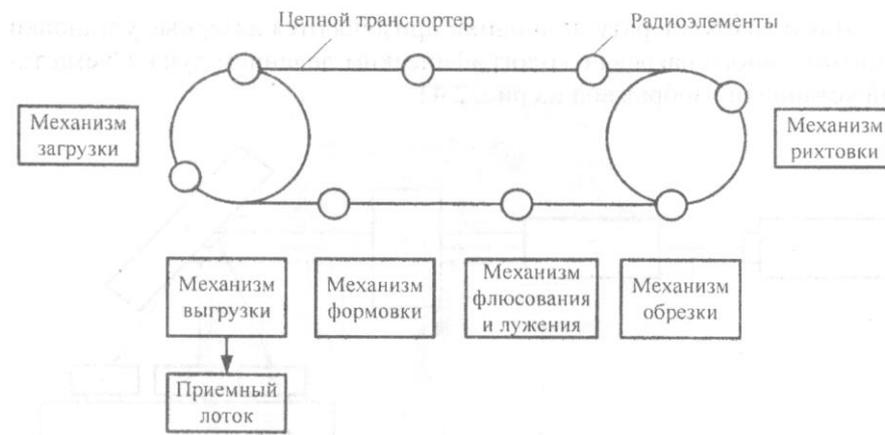


Рис. 2.39. Схема автомата подготовки элементов к пайке

Компоновка линии пайки приведена на рис. 2.40.

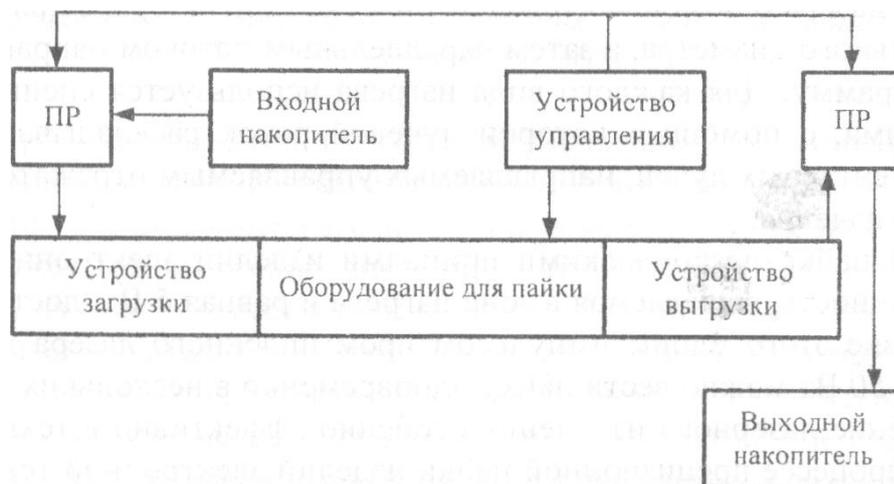


Рис. 2.40. Компоновка линии пайки

Промышленный робот осуществляет подачу печатных плат из входного накопителя на устройство загрузки оборудования для пайки. После окончания пайки печатные платы с устройства выгрузки с помощью ПР складываются в выходной накопитель. Работа всех блоков модуля синхронизируется устройством управления на базе ЭВМ. Наличие ЭВМ обеспечивает гибкое программное управление в условиях многономенклатурного производства и частого изменения технологии изготовления.

Управление техническими системами

Для низкотемпературной пайки применяются лазерные установки многоточечного нагрева с голографическим делением луча. Схема такой установки изображена на рис. 2.41.

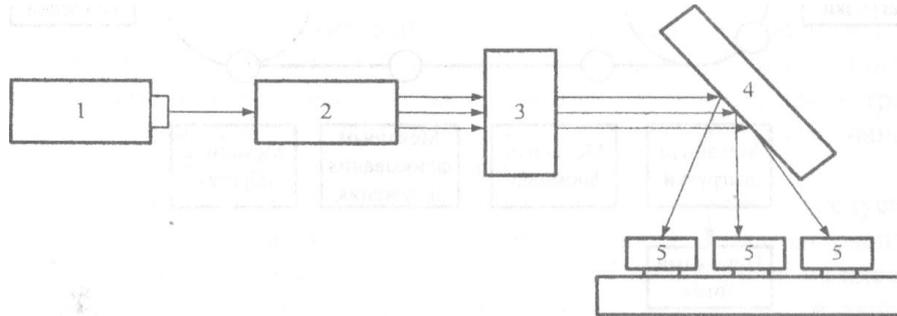


Рис. 2.41. Схема лазерной установки с голографическим делением луча:

1 - лазер, 2 - телецентрическая оптика, 3 - голограмма, 4 - отражатель, 5 - изделия

Луч лазера с помощью телецентрической оптики расширяется до значительного диаметра, а затем параллельным потоком направляется на голограмму. Для каждого вида нагрева используется специальная голограмма, с помощью которой лучевой поток раскладывается на ряд элементарных лучей, направляемых управляемым отражателем на паяемые изделия.

Для пайки легкоплавкими припоями изделий электронной техники мощность, выделяемая в зоне нагрева и равная 5 Вт, достаточна. Вследствие этого одним импульсом промышленного лазера мощностью 20-50 Вт можно вести пайку одновременно в нескольких точках. Применение лазерного излучения особенно эффективно в технологическом процессе прецизионной пайки изделий электронной техники в микроминиатюрном исполнении.

Для осуществления сборки микроэлектронных приборов используются гибкие автоматические модули монтажа кристаллов в корпусе и гибкие автоматические модули прецизионной микросварки. Гибкий автоматический модуль монтажа кристаллов показан на рис. 2.42.

Управление техническими системами

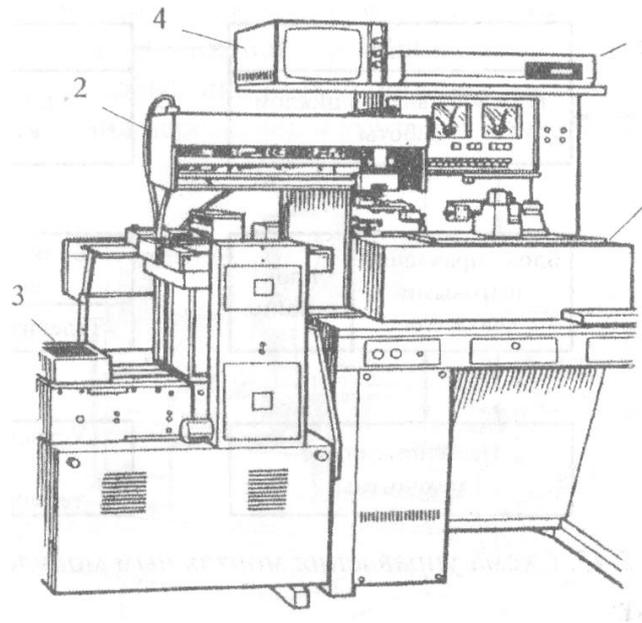


Рис. 2.42. Гибкий автоматический модуль монтажа кристаллов:

1 - рабочая зона, 2 - механизм перемещения, 3 - кассета с кристаллами, 4 - дисплей, 5 - ЭВМ

Он работает следующим образом. Основания для монтажа подаются манипулятором из кассеты в механизм их перемещения и продвигаются шагами в держателях по нагревателям до позиции монтажа. На поворотном основании координатного стола устанавливается штабель из десяти кассет с кристаллами. Механизм выборки кристалла забирает кристалл и передает его в ориентатор, из которого с помощью захватного устройства вакуумного механизма монтажа он переносится на основание, расположенное на механизме перемещения. После монтажа основание с кристаллом перемещается далее в держателях по направляющим и передается манипулятором в автоматический склад. Параметры процесса отображаются на дисплее.

Управление модулем включает в себя несколько самостоятельных по выполняемым функциям систем (рис. 2.43).

Управление техническими системами

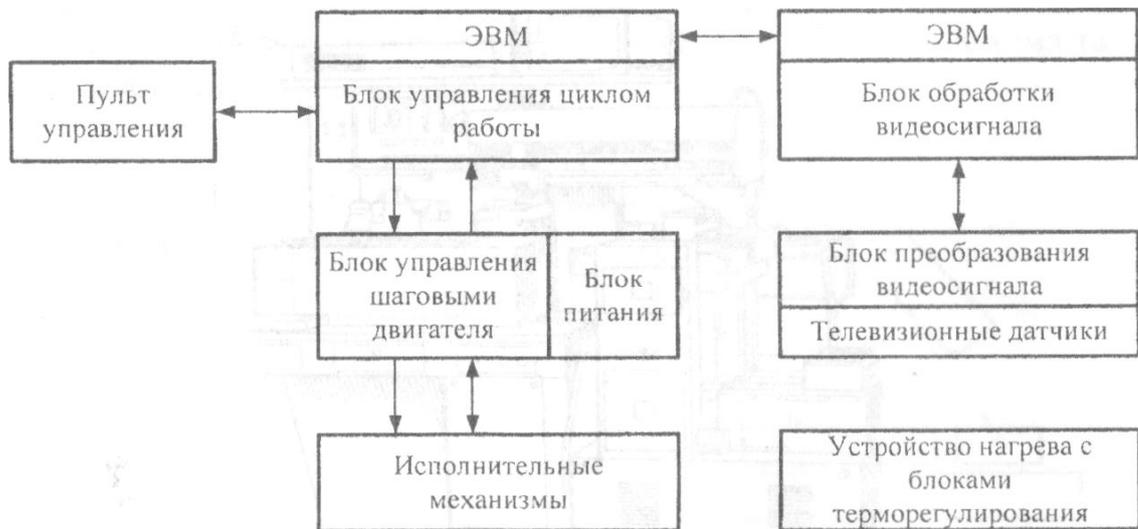


Рис. 2.43. Схема управления монтажным модулем

Управление работой исполнительных механизмов по программе, хранящейся в памяти первой ЭВМ, в соответствии с циклограммой работы установки осуществляет система управления.

Системы машинного зрения и контроля качества совмещают кристалл с колодцем корпуса схемы и оценивают качество эвтектики после присоединения кристалла к корпусу.

Нагрев корпусов схем осуществляют два нагревателя и система установки и поддержания с определенной точностью заданной температуры.

Блок управления циклом работы выполняет две функции:

- прием сигналов с установки и передачу их на ЭВМ, а также прием управляющих сигналов, поступающих с ЭВМ, на блок управления шаговыми двигателями для управления работой исполнительных механизмов в соответствии с циклограммой;
- совмещение кристаллов с корпусом схемы, контроль качества эвтектики после присоединения кристалла к корпусу.

Пульт управления предназначен для введения в ЭВМ данных, связанных с коррекцией положения координатного стола и механизма монтажа, изменением технологических параметров и режимов работы отдельных узлов по времени отладки и выводом из ЭВМ данных о причинах сбоя установки, ее режимах и параметрах. Ввод и вывод информации производятся в закодированном виде.

Блок преобразования видеосигнала обеспечивает выдачу управляющих напряжений для телевизионных датчиков, а также усиление и преобразование видеосигнала, поступающего с телевизионных датчиков.

Управление техническими системами

Модуль микросварки предназначен для автоматического присоединения выводов из алюминиевой проволоки к элементам интегральных микросхем и полупроводниковых приборов методом ультразвуковой сварки, формирования перемычек и контроля качества монтажа рис. 2.44.

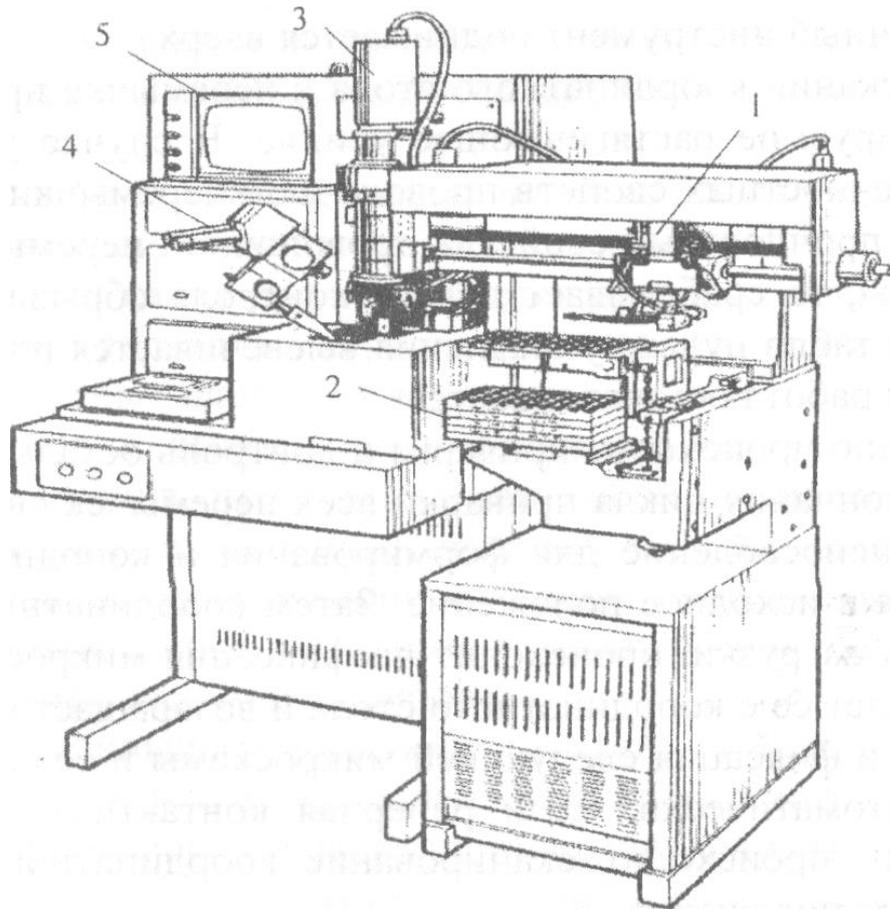


Рис. 2.44. Общий вид гибкого автоматического модуля микросварки:

1 - манипулятор, 2 - кассеты с микросхемами, 3 - сварочный инструмент, 4 - блок распознавания, 5 -дисплей

Модуль работает следующим образом. Микросхема из кассеты автоматически подается манипулятором в устройство микросварки и фиксируется на координатном столе, который затем смещается в зону распознавания. Оператор на пульте управления набирает номер режима. Автоматически происходит распознавание реперных точек корпуса и кристалла. Величины перемещений фиксируются в памяти блока управления, после чего им производится перерасчет траектории движения. Координатный стол подводит первую контактную площадку корпуса микросхемы под сварочный инструмент стриктора, опускающегося вниз, производит первую сварку и поднимается в зону формирования перемычки. Инструмент механизма формирования перемычек

Управление техническими системами

подводится под проволоку в верхнюю точку перемычки. При этом координатный стол и привод перемещения механизма микросварки подводят под сварочный инструмент первую контактную площадку кристалла. Сварочный инструмент опускается вниз и производит вторую сварку. В момент опускания сварочного инструмента осуществляется перегиб проволоки через специальное приспособление. После обрыва проволоки с помощью губок механизма подачи и обрыва сварочный инструмент поднимается вверх.

При опускании координатного стола к перемычке прикладывается программируемое растягивающее усилие. В случае удовлетворительности прочностных свойств проволочной перемычки усилие снимается. Если прочностные свойства проволочной перемычки неудовлетворительны, то срабатывает датчик контроля обрыва перемычки. На цифровом табло пульта управления высвечивается показание усилия обрыва, и работа останавливается.

Аналогично происходит приварка и контроль остальных перемычек. После окончания цикла приварки всех перемычек сварочный инструмент, приспособление для формирования и координатный стол возвращаются в исходное положение. Затем координатный стол смещается в зону загрузки, происходит расфиксация микросхемы, манипулятор снимает ее с координатного стола и возвращает в ячейку кассеты. Подача и фиксация следующей микросхемы и ее сварка осуществляются автоматически. Если реперная контактная площадка не распознана, то происходит сканирование координатного стола для определения ее положения.

Схема электрической части модуля микросварки приведена на рис. 2.45.

Основными элементами схемы являются: блок управления циклом работы, блок управления шаговыми двигателями, ультразвуковой генератор, телевизионные датчики, блок обработки видеосигнала, блок преобразования видеосигнала, блок контроля качества и пульт управления.

Блоки управления предназначены для хранения и обработки информации, поступающей из внешних устройств; хранения управляющей программы; управления работой шаговых двигателей; контроля работы модуля.

Управление техническими системами



Рис. 2.45. Структурная схема системы управления гибким автоматизированным модулем микросварки

Телевизионные датчики входят в состав блока технического зрения, оптическая схема которого представляет собой двухканальную систему. Первый канал предназначается для определения координатных площадок кристалла микросхем, а второй - для нахождения координат контактных площадок корпуса.

Для контроля выполняемых операций используются системы технического зрения, представляющие собой комплекс технических, вычислительных и программных средств и включающие:

- телевизионную передающую камеру, производящую фотоэлектрическую регистрацию оптического изображения исследуемой поверхности контролируемого прибора;
- телевизионный графический дисплей, отображающий регистрируемое изображение и служебную символную информацию;
- видеопроцессор, управляющий перечисленными устройствами, а также преобразующий и запоминающий видеосигнал обрабатываемого изображения;
- ЭВМ, принимающую запомненное изображение от видеопроцессора и осуществляющую анализ представленной информации, выделение ее ключевых признаков, сравнение с заданными характеристиками эталона, оценку показателей расхождения и принятие решения о качестве выполняемой операции;
- комплект программ по общему управлению системой контроля и обработке изображений контролируемого прибора.

В системе может быть организован речевой диалог человек - ЭВМ, включающий как синтез речевых сообщений, так и анализ устных команд для ЭВМ.

Управление техническими системами

Реализация этой системы позволяет обеспечить удобство, естественность и простоту общения; сократить сроки обучения обслуживающего персонала; разгрузить зрительный канал при вводе-выводе информации; резко уменьшить число ручных манипуляций с центрального поста управления.

Контроль качества паяных соединений предусматривает способы оценки по:

- внешнему виду с использованием эталона паяного соединения;
- прочности на отрыв;
- структуре припоя и характеру диффузионной зоны;
- переходному сопротивлению контакта;
- интенсивности отказов в течение заданного срока испытаний.

Критериями оценки прочности паяных соединений являются величина усилия отрыва, устойчивость при воздействии знакопеременных нагрузок и вибропрочность.

Дефекты в паяных соединениях можно обнаружить с помощью ультразвукового контроля. Универсальные ультразвуковые дефектоскопы позволяют обнаруживать раковины, поры, расслоения и другие дефекты пайки, отражающие ультразвуковые колебания и изменяющие структуру акустического поля частотой 0,5-25 МГц.

Повышение качества контроля паяных соединений достигается путем применения лазерной системы контроля дефектов (рис. 2.46).

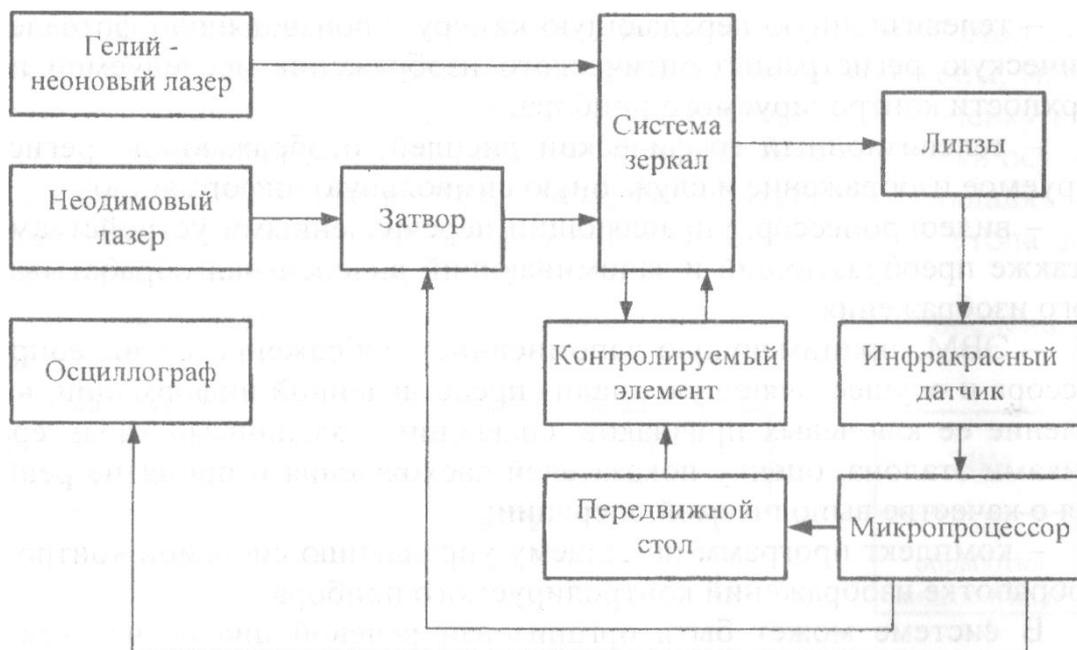


Рис. 2.46. Схема лазерной системы контроля паяных соединений

С помощью гелий-неонового лазера устанавливается точное местоположение контролируемого элемента в системе координат передвижного стола, на котором установлен контролируемый элемент. Контрольные лучи излучает мощный неодимовый лазер, работающий в инфракрасной области с длительностью излучения, которую задает микропроцессор, связанный с затвором. Луч, управляемый системой зеркал, падает на место пайки на контролируемом элементе, причем большая часть света отражается от блестящей и однородной поверхности пайки. Если структура пайки зернистая, то она начинает поглощать энергию луча, нагревается и дает вторичное инфракрасное излучение. Отраженное в системе зеркал и собранное в линзах излучение воспринимается инфракрасным датчиком, сигнал с которого анализируется с помощью микропроцессора и подается на осциллограф в виде термограммы.

Лазерным контролем обнаруживаются такие дефекты соединения, как раковины и внутренние включения, поскольку они имеют меньшую массу, и поэтому нагреваются быстрее, чем сплошные паяные соединения. Разогревание паяного соединения с помощью неодимового лазера выходной мощностью 60 Вт происходит за 50 мс. В итоге можно контролировать в секунду около десяти паяных соединений, расположенных на расстоянии 1,25 мм друг от друга.

При необходимости лазерный контроль дополняется ультразвуковым контролем. Автоматизация такой комбинированной системы осуществляется на базе специальной программы для управляющего микропроцессора.

3. Автоматизация операций визуального контроля, производства изделий микроэлектроники с применением ПР

Для автоматизации операций визуального контроля в производстве электронных узлов применяются средства технического зрения. Контроль заключается в определении местоположения и ориентации интегральной схемы на теплопроводящей подложке, а также в оценке качества кристалла после его распознавания. Поле контроля дискретизируется на 16 уровней яркости. С помощью градиентного детектора контуров формируется гистограмма всех направлений контуров поля контроля, при этом ее пик указывает приблизительную ориентацию кристалла. Далее решается задача определения местоположения углов кристалла путем сопоставления с эталонными образцами, причем если один из углов не найден, то кристалл бракуется. Треснувшие и

Управление техническими системами

разбитые кристаллы определяются с помощью операции установления порогового контраста.

Специфика производства изделий микроэлектроники заключается в постоянном совершенствовании технологии изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, что затрудняет автоматизацию производства традиционными методами. Решению этой проблемы способствует применение ПР, которые, являясь автономными устройствами, позволяют в короткие сроки разрабатывать автоматизированные комплексы и создавать на их базе достаточно гибкие системы, наиболее полно учитывающие специфику и особенности отдельных производств.

Расширение технологических возможностей оборудования для создания микроэлектронных изделий обеспечивается использованием адаптивных ПР, повышающих гибкость выполнения отдельных операций за счет автоматического учета специфики взаимодействия составляющих технологического процесса. Адаптацию можно применять для эффективного решения задач по автоматизации загрузки- выгрузки подложек, манипулирования пластинами во время сборочных операций и извлечения из навала сборочных единиц.

Производство печатных плат в силу особенностей технологии выдвигает свои условия к применению ПР. Здесь использование ПР эффективнее всего на транспортно-складских операциях и вспомогательных операциях загрузки-разгрузки технологического оборудования. В производстве печатных плат ПР манипулируют плоскими заготовками, отличающимися друг от друга только геометрическими параметрами. При этом на всех операциях, кроме сверления на станках с ЧПУ, не нужна высокая точность ориентации и фиксации заготовок в рабочей зоне технологического оборудования. Для установки заготовок на станках с ЧПУ от ПР требуется повышенная точность позиционирования, обусловленная необходимостью фиксации пакета заготовок печатных плат в рабочей зоне станка по базовым отверстиям. Особенности операций, на которых целесообразно применение ПР, сводят переналадку робототехнических комплексов к замене захватных устройств.

Для осуществления прецизионной сборки используются репрограммируемые и адаптивные автоматы. Основными функциями систем управления *репрограммируемыми автоматами* (рис. 2.47) являются управление прецизионным шаговым электроприводом и оперативный контроль качества микросварки.

Управление техническими системами

Эти системы управляют всеми исполнительными механизмами, включая автоматическую загрузку-выгрузку корпусов, а также совмещение инструмента с контактными площадками приборов. Функции операторов сводятся к первоначальному занесению эталонной программы позиционирования и однократному выполнению операции коррекции реперных точек в случае неточной посадки кристалла в данном корпусе. На остальных точках совмещение осуществляется автоматически. Производительность одного оператора зависит от числа соединений в приборе и достигает 20 тыс. сварок в час. Качество соединений практически не зависит от субъективных факторов, так как специальная программа обеспечивает автоматическое индивидуальное формирование каждой проволочной перемычки.

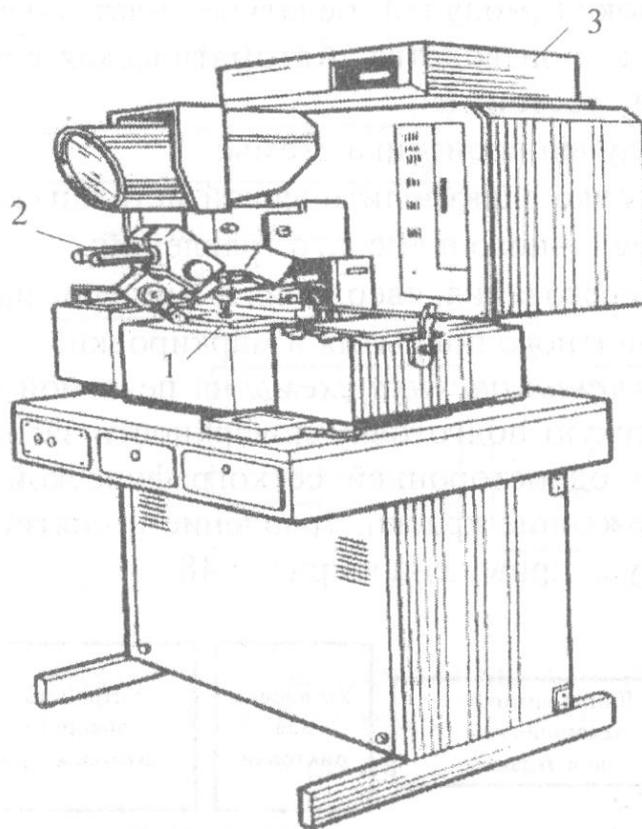


Рис. 2.47. Репрограммируемый автомат:

1 - рабочая зона, 2 - блок контроля, 3 - ЭВМ

К основным функциям систем управления адаптивными автоматами можно добавить еще функции пространственной адаптации на основе технического зрения и адаптации технологических режимов микросварки. Техническое зрение состоит из ЭВМ, связанной с оптической системой и оптоэлектронной твердотельной схемой. Оно распознает образ кристалла и корпуса собираемого

Управление техническими системами

прибора, их реальное абсолютное и относительное пространственное расположение, а также производит автоматическую коррекцию массива координат эталонной программы позиционирования для топологии данного типа прибора.

Система технологической адаптации обеспечивает реакцию робота на изменение технологических параметров исходных материалов и одновременно производит неразрушающий контроль всех соединений по электрическим, механическим и визуальным характеристикам.

При выборе технологии изготовления печатных плат обычно ориентируются на возможность использования имеющегося оборудования, требования к плотности монтажа и стоимость изготовления.

Создание гибких модулей печатных плат позволяет повысить эффективность их производства. Автоматическая система изготовления печатных плат состоит из:

- 1) модуля получения рисунка схемы;
- 2) модуля химико-электролитической металлизации;
- 3) модулей щелочного и кислого травлений;
- 4) модулей прессования, сверления и фрезерования;
- 5) модуля защитного покрытия и маркировки.

Модуль получения рисунка схемы на печатной плате выполняет химико-механическую подготовку поверхности заготовок, нанесение рисунка методом односторонней сеткографической печати, ультрафиолетовое отверждение краски, травление и снятие краски. Компонировка такого модуля приведена на рис. 2.48.



Рис. 2.48. Компонировка модуля получения рисунка схемы на печатной плате

Модуль химико-электролитической металлизации осуществляет химическое и электролитическое меднение и нанесение защитного покрытия "олово-свинец" на печатные платы. Его компоновка изображена на рис. 2.49.

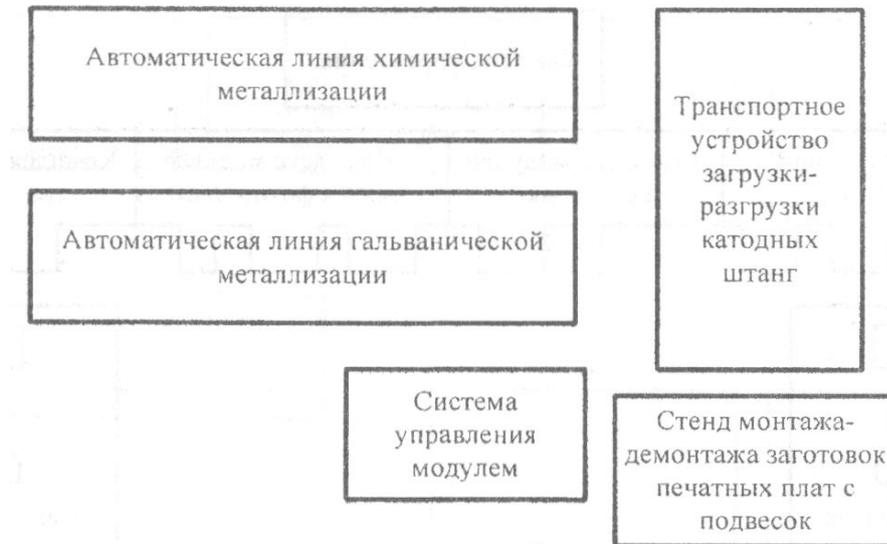


Рис. 2.49. Компоновка модуля химико-электролитической металлизации

Модуль щелочного травления, показанный на рис. 2.50, производит травление рисунка печатной платы с защитным покрытием "олово-свинец", оплавление этого покрытия и отмывку.



Рис. 2.50. Компоновка модуля щелочного травления

Модуль кислого травления (рис. 2.51) предназначен для травления схемы слоев печатных плат с защитным покрытием, снятия покрытия и подготовки слоев к прессованию на модуле прессования (2.52).

Управление техническими системами



Рис. 2.51. Компоновка модуля кислотного травления



Рис. 2.52. Компоновка модуля прессования

Модули прессования, сверления и фрезерования выполняют механическую обработку печатных плат и могут включать в свой состав оборудование с ЧПУ.

Модуль защитного покрытия и маркировки осуществляет завершающие операции по обработке печатных плат. Он наносит защитное покрытие и производит маркировку печатных плат (рис. 2.53).

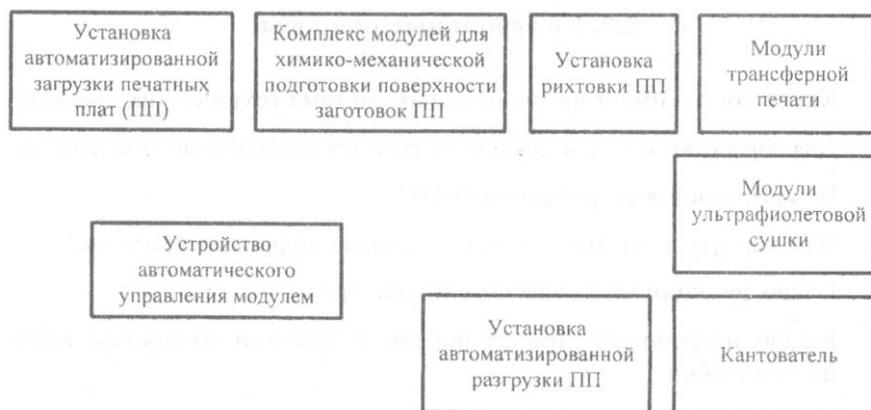


Рис. 2. 53. Компоновка модуля защитного покрытия и маркировки

Функционирование всех гибких модулей должно быть синхронизировано между собой и с соответствующими транспортно-складскими работами. Эта задача решается системой управления.

Лекция №21

по теме: Концепция компьютеризированного интегрированного производства (КИП) и автоматизация технологической подготовки производства в заготовительно-штамповочном производстве

1. Концепция компьютеризированного интегрированного производства (КИП)

Технические средства автоматизации позволяют создать на своей базе системы, выполняющие в автоматическом режиме как технологические производственные операции, так и работы, проводимые в экстремальных условиях и опасные для человека. К последним относятся, например, работы на атомных станциях в условиях радиоактивности, тушение пожаров, работы на высотных конструкциях, на больших глубинах и разминирование.

Технические средства автоматизации производств включают в себя станки и системы ЧПУ, промышленные роботы, системы автоматического контроля, автоматические транспортные системы и автоматизированные складские системы.

Современное производство стремительно развивается в направлении автоматизации с широким использованием компьютерных технологий и робототехнических систем, позволяющих быстро перестраивать технологические процессы на изготовление новых изделий.

Начиная с 80-х годов одним из направлений повышения эффективности производства стало широкое применение информационных технологий. Важным этапом их развития стало появление *гибкой производственной системы* (ГПС) как, управляемой средствами вычислительной техники, совокупности элементов технологического оборудования, включающей гибкие производственные модули в разных сочетаниях, автоматизированную систему технологической подготовки производства и системы обеспечения функционирования, обладающие свойством автоматизированной переналадки при изменении программы производства изделий. Использование гибких технологических модулей позволяет изготавливать детали в любом порядке и варьировать их выпуск в зависимости от производственной программы, сокращает затраты и время на подготовку

Управление техническими системами

производства, повышает коэффициент использования оборудования. С другой стороны, это изменяет характер работы персонала, повышая удельный вес творческого и высококвалифицированного труда.

Принципиальной особенностью ГПС являлось наличие новой компоненты - компьютерной системы управления, обеспечивающей возможность увязки отдельных процессов, функций и задач в единую систему.

Дальнейшее развитие работ в данном направлении в конце 80-х годов привело к формированию *компьютеризированного интегрированного производства* (КИП). Концепция КИП подразумевает новый подход к организации и управлению производством, особенность которого заключалась не только в применении компьютерных технологий для автоматизации технологических процессов и операций, но в создании интегрированной информационной системы предприятия. Информационная интеграция процессов производства достигалась путем использования общих баз данных, позволяющих более эффективно решать вопросы разработки и проектирования изделий, подготовки производства, планирования и управления производством, материально-технического обеспечения, охватывая все процессы предприятия.

В концепции КИП роль *интегрированной автоматизированной системы управления* (ИАСУ) стала еще более значительной. На ИАСУ выполняют не только функции автоматизации процессов проектирования и производства изделий, но и совершенно новые задачи, связанные с обеспечением информационной интеграции процессов. Эта интеграция должна была осуществляться за счет совместного использования одной и той же информации в электронном виде для решения разных задач.

Практика показала, что из всех задач ИАСУ наиболее типизируемыми оказались задачи автоматизации проектирования и подготовки производства, а также задачи уровня управления предприятием (АСУП). В начале 90-х годов на рынке появились самостоятельные программно-технические решения, пригодные для использования на предприятиях с различным уровнем автоматизации, в том числе и вне КИП в его классическом понимании. Возникли новые устойчивые понятия: CAD/CAM/CAE и MRP (MRP II).

Первое понятие - CAD (Computer Aided Design)/ CAM (Computer Aided Manufacturing) /CAE (Computer Aided Engineering) - обозначает комплекс программных средств компьютерного проектирования, подготовки производства и инженерных расчетов. Второе понятие — MRP (Materials Requirement Planning -

Управление техническими системами

планирование потребностей в материалах), а позднее *MRP II* (Manufacturing Resource Planning - управление производственными ресурсами). Оно стало общепринятым обозначением комплекса задач управления деятельностью предприятия: планирования производства, материально-технического снабжения, управления финансовыми ресурсами и других.

К середине 90-х годов появилась необходимость создания интегрированной информационной системы, поддерживающей весь жизненный цикл изделия. По определению стандарта ISO 9004-1 *жизненный цикл (ЖЦ)* продукции - это совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации продукции.

Анализ развития информационных технологий в производственных задачах показывает, что одним из направлений движения является все более полный охват стадий жизненного цикла продукции. Гибкие производственные системы решали задачи, касающиеся исключительно производства изделий. В компьютеризированном интегрированном производстве круг задач значительно расширился и включил в себя разработку, проектирование и изготовление, материально-техническое обеспечение и другие задачи предприятия.

Система автоматизированного проектирования (САПР) рассматривалась как единый комплекс аппаратно-программных, информационных и математических средств, обеспечивающих повышение качества и уменьшение сроков проектирования. К 90-м годам была осуществлена достаточно полная компьютеризация отдельных этапов процесса проектирования и производства изделий промышленности.

Задача разработки САПР к началу нынешнего столетия трансформировалась в задачу создания *CALS* (Continuous Acquisition and Life Cycle Support) - технологии обеспечения непрерывности поставок и жизненного цикла изделия. Русскоязычное наименование этой концепции и стратегии - *Информационная Поддержка жизненного цикла Изделий (ИПИ)*.

Важнейшей особенностью *CALS*-технологий является не локальная, а интегрированная компьютеризация, обеспеченная единой информационной средой, основанной на электронном документообороте. *CALS*-технологии активно применяются, прежде всего, при разработке и производстве сложной наукоемкой продукции.

Управление техническими системами

Реализацию методов вычислительной механики в целях решения прикладных задач при разработке технических изделий на основе использования высокопроизводительной вычислительной техники обеспечивают компьютерные технологии инженерного анализа, которые являются частью единой информационной системы, реализующей CALS-технологии.

Новый класс систем управления производством - это системы класса MES (*Manufacturing Execution System*) или производственные исполнительные системы. Развернутым смысловым определением MES-систем, соответствующим отечественной практике, можно считать системы оперативного планирования, оптимизации и управления производственными процессами.

Технические средства автоматизации работ, опасных для человека, включают в первую очередь мобильные робототехнические системы с встроенными компьютерами и бортовым технологическим оборудованием. Эти системы, как правило, должны обладать искусственным интеллектом для самостоятельного принятия решений в зависимости от изменяющейся внешней ситуации и состояния их внутренних функциональных составляющих.

2. Автоматизация технологической подготовки производства в заготовительно-штамповочном производстве

ВВЕДЕНИЕ

В своем историческом развитии САПР технологических процессов (ТП) постепенно расширяли арсенал своих средств. На первом этапе эти системы часто представляли собой специализированные текстовые редакторы, некоторые из которых были документо-ориентированными. С появлением баз данных появилась возможность поддерживать процесс ручного формирования ТП в таких редакторах в части поиска необходимых средств технологического оснащения. Однако подавляющее большинство САПР ТП не способны поддерживать автоматизацию принятия решений в процессе проектирования на основе технологических знаний. Существует два подхода к компьютеризации знаний: алгоритмический и применяющий методы искусственного интеллекта. История развития САПР ТП показала бесперспективность алгоритмического подхода, так как необходимо, чтобы накопленный положительный опыт находил отражение в базе знаний системы и был доступен для всех, в том числе и для новых сотрудников. Для достижения этой цели нужно предоставить непрограммирующим

носителям технологического опыта возможность сохранять его в системе, которую могут обеспечить методы искусственного интеллекта [1].

Цели и принципы автоматизации проектирования технологических процессов и средства их достижения

При автоматизированном проектировании технологических процессов изготовления деталей возникает необходимость преобразования исходной информации, заданной в различных формах в единообразную, упорядоченную, удобную для использования в компьютере. Сущность преобразования исходной информации заключается в том, что разнообразные сведения, необходимые для решения задачи и возникающие в процессе ее решения, представляются в виде расположенных в определенном порядке групп слов и цифр в выбранной системе счисления. Разработаны таблицы с постоянной информацией: характеристикой применяемых материалов, граничными условиями по выбору оборудования, кодовым описанием вида поставки и цены материалов, применяемых на предприятии, и т.п.

Система классификации и кодирования технологических операций создает основы для разработки бестекстовой технологии выполнения работ, а также автоматизированной разработки технологических процессов. В действующие технологические классификаторы входят перспективные технологические операции, что позволяет сократить сроки проектирования технологических процессов и стандартизировать технологические операции. Наличие кодов технологических операций позволяет создать основы технологического машинного языка.

Классификатор позволяет группировать детали по видам соединений и технологическому подобию; специализировать производственные участки; выбирать технологическое оборудование и технологические режимы; привязывать типовые детали, узлы к ранее разработанным типовым технологическим операциям; рационально выбирать производственную структуру участка, цеха; упорядочить текстовую часть технологических процессов благодаря применению стандартных терминов; применять средства вычислительной техники при проектировании технологических процессов, состоящих из взаимосвязанных типовых технологических операций.

Система классификации призвана обеспечить единый для всех предприятий системный подход к выбору и применению методов и средств ТПП;

Управление техническими системами

организацию производства высокой степени гибкости, допускающей непрерывное его совершенствование и быструю переналадку на выпуск новых изделий; рациональную организацию механизированного и автоматизированного выполнения комплекса инженерно-технических и управленческих работ; взаимосвязи ТПП и системы управления ею с другими системами управления.

Кроме того, необходима постоянная информация о технологических операциях, вариантах оснащения оборудованием, инструментом и оснасткой, а также математические зависимости по расчету трудоемкости работ. Математические зависимости обычно представляются степенной функцией.

На ряде предприятий внедрены методы автоматизированного проектирования и нормирования технологических процессов обработки деталей класса «тела вращения», плоских и несложных корпусных деталей. Для разработки этих методов потребовалось:

- формализовать технологический язык, чтобы всю исходную и справочно-нормативную информацию можно было записать в удобном для ввода в ЭВМ виде;

- разработать универсальный метод моделирования и алгоритмизации процессов проектирования технологии обработки деталей различных классов;

- на основе принятого формализованного языка создать алгоритмы проектирования технологических процессов;

- создать комплекс технических средств, сочленяемых с ЭВМ и предназначенных для механизации кодирования и подготовки исходной информации к вводу в ЭВМ, отображения хода проектирования на экранах и оперативной связи технолога с ЭВМ, а также устройства для выдачи результатов проектирования на чертежные автоматы.

Сложность внедрения перечисленных задач на предприятиях отрасли заключается в том, что методы типизации, технологические правила и характер работы технологов разные. Поэтому, как правило, алгоритмы и программы, построенные на базе методов автоматизации, проектирования и нормирования, носят частный характер. Они пригодны лишь для одного предприятия и не могут без значительной переделки применяться на других предприятиях с другим оборудованием и оснасткой и с другой организационной структурой технических служб.

Главным в решении задачи проектирования технологических процессов изготовления деталей с помощью ЭВМ является создание математической

Управление техническими системами

модели и алгоритма. В основу алгоритмов проектирования технологических процессов изготовления детали положена система кодирования геометрической и качественной информации о деталях, таблицы с постоянной информацией, а также логические зависимости, определяющие структуру и параметры технологического процесса с учетом граничных условий применяемости.

Цели автоматизации:

1. Основная цель создания САПР ТП заключается в экономии труда технологов.

Для достижения этой цели необходимо располагать:

- средствами автоматизации оформления технической документации;
- средствами информационной поддержки проектирования;
- средствами автоматизации принятия решений.

2. Подавляющее большинство САПР ТП, в том числе и ныне существующих, не способны поддерживать автоматизацию принятия решений в процессе проектирования на основе технологических знаний.

Технологи, проработавшие много лет на одном предприятии, получив чертеж детали, быстро находят в памяти компьютера описание процесса на аналогичную деталь и могут отредактировать его, получив новый. Возникает вопрос о том, что будет, если работать с этой САПР придется специалистам, которые не обладают подобным опытом.

Немаловажное значение среди целей внедрения САПР имеет повышение качества проектных решений. Необходимо, чтобы накопленный положительный опыт находил отражение в базе знаний системы и был доступен для всех, в том числе и для новых сотрудников. Для достижения этой цели нужно предоставить непрограммирующим носителям технологического опыта возможность сохранять его в системе. Такую возможность и обеспечивают методы искусственного интеллекта [1].

3. К числу вспомогательных целей автоматизации проектирования относятся: уменьшение трудоемкости разработки программных средств, адаптации их к условиям эксплуатации при внедрении, а также их сопровождения, т.е. модификации, обусловленной необходимостью устранения выявленных ошибок и (или) изменения функциональных возможностей.

Сокращение трудоемкости разработки программных средств:

- использование инструментальной среды;
- мобильность инструментальной среды.

Управление техническими системами

Сокращение трудоемкости адаптации программных средств к условиям эксплуатации:

- ✚ использование баз данных и баз знаний, ориентированных на пользователя.

Сокращение трудоемкости сопровождения программных средств:

- ❖ модульность баз данных и баз знаний;
- ❖ открытость баз данных и баз знаний;
- ❖ модернизируемость баз данных и баз знаний.

Анализ уровня автоматизации ТПП в заготовительно-штамповочном производстве на авиационных предприятиях Украины

За последние годы в промышленности кроме методов автоматизированного проектирования и нормирования технологических процессов обработки деталей класса «тел вращения», плоских и несложных деталей внедрены другие системы. Так, автоматизировано проектирование технологических процессов изготовления деталей (плоских, гнутых) холодной штамповкой. Если о системах автоматизированного проектирования процессов обработки деталей класса «тела вращения» в механообработке, плоских и несложных деталей имеется достаточное число научных трудов, то в разработке систем автоматизированного проектирования процессов холодной штамповки сделаны первые шаги, в то время как объем этих работ в промышленности составляет 15 ... 18% [2,3].

Одной из актуальных проблем ТПП является применение компьютерных технологий в авиационной промышленности, характеризующейся частой сменяемостью сложных объектов производства. Эти объекты состоят из десятков тысяч деталей самой различной конфигурации. При начале производства изделий важнейшим требованием является сокращение до минимума сроков ТПП, которое при существующих способах «ручного» проектирования ТП трудно выполнимо, даже если увеличивается число работников технологических служб. Сложность проблемы обуславливается большим объемом исходных данных, многообразием вариантов изготовления деталей, каждый из которых может быть разработан только в результате решения комплекса логических и вычислительных задач [4].

В большей степени эта проблема не решена в заготовительно-штамповочном производстве (ЗШП). В настоящее время на авиационных предприятиях Украины не используются специализированные программы САПР ТП в ЗШП, так как их стоимость высока и разработаны они под общие требования технологической подготовки производства. Как правило, на заводах стоят

Управление техническими системами

самостоятельно написанные модули редактирования технологических процессов, поддерживающие БД.

Например, на одном предприятии в цехе сборки трубопроводов используют программу, которая была разработана в конце 80-х годов совместно с НИАТом и Горьковским авиационным заводом (СОКОЛ). Эта автоматизированная система технологической подготовки производства трубопроводов, а также деталей и конструкций из труб, предназначена для комплексной автоматизации решения задач подготовки и организации производства и представляет собой комплекс подсистем, объединенных единым математическим и информационным обеспечением:

- ❖ автоматизированный анализ технологических и конструктивных параметров;
- ❖ автоматизированный расчет вспомогательных материалов;
- ❖ автоматизированное проектирование технологических процессов;
- ❖ информационно-поисковая система нормативно-технической документации и др.

Фундаментом АСТПП является банк данных для хранения исходной информации. Для его функционирования была создана система управления, обеспечивающая работу с базами данных и связь между ними.

Характерная особенность параметров трубопроводов заключается в том, что многие из них можно классифицировать по тем или иным признакам. Поэтому большинство таблиц в базах данных основаны на конструкторских и технологических классификаторах, что позволяет упорядочить информацию о параметре, обеспечить единство терминов и определений и т.д.

Программа рассчитана на компьютер IBM 286 и в связи с этим имеет много недостатков. Программа не дорабатывалась под новые требования производства и компьютерную технику. Так, например, программа имеет сложный интерфейс, отсутствует возможность работы с графическими файлами и электронными чертежами, что в настоящее время является обязательным условием. Также имеются ограничения по использованию памяти компьютера.

Для проектирования технологических процессов изготовления деталей из листа и профилей специальных программ нет. На большинстве предприятий в этих целях используют обычный текстовый редактор Word или редактор Excel. Создается файл типового технологического процесса, а при написании нового технолог в ручную копирует необходимые операции.

Управление техническими системами

Подобное ведение технологической подготовки производства в современных рыночных условиях не может быть конкурентно способным. Система САПР ТП должна быть частью мощного комплекса автоматизированных систем PLM/CAD/CAM/CAE, призванного интегрировать разрозненные рабочие места в единую систему подготовки производства. Используя комплекс систем, конструкторы, технологи, специалисты и руководители плановых отделов организуют коллективную работу над проектами, что позволяет значительно сократить сроки подготовки производства.

Такой комплекс систем должен иметь в своем составе следующие компоненты:

1) ядро - система управления инженерными данными (PDM - Product Data Management), содержащая всю информацию об изделиях, обеспечивающая прозрачный информационный обмен документацией;

2) набор единых баз данных (справочников), к которым обращаются остальные компоненты комплекса;

3) системы автоматизации конструкторской подготовки производства (CAD - Computer Aided Design);

4) системы автоматизации технологической подготовки производства, инженерные расчетные пакеты, системы подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ и т.д. (CAM/CAE - Computer Aided Manufacturing/Engineering).

В настоящее время производители систем автоматизации ТПП стараются предоставить пользователю готовый комплекс программ.

Путем построения такого комплекса идут более мощные и богатые предприятия. Ядром информационного пространства могут использоваться Лощман PLM, Winchill и т.д., конструкторская система - CADS5, Catia, КОМПАС.

Выбор технологической системы стоит в основном между программным обеспечением фирмы ИНТЕРМЕХ (Минск, Белоруссия) - TechCard и АСКОН (Москва, Россия). Подобные программы универсальны для разных типов производств, имеют удобный интерфейс, богатую справочную систему.

Универсальность систем является одновременно и их недостатком. Недостаток заключается в том, что разные производства (авиационное, машиностроительное, приборостроительное и т.д.) имеют свою специфику в технологической подготовке производства и предусмотреть все специфические требования очень сложно.

Управление техническими системами

Одной из особенностей авиационного производства является частая сменяемость объектов производства. Это влечет за собой частую повторяемость работ по ТПП, доля которых в полном цикле создания, освоения и серийного производства самолетов непрерывно возрастает [2]. В связи с этим встает вопрос об унификации ТП. Как раз он и слабо отражен в крупных автоматизированных системах ТПП.

Технологическая унификация — одно из основных направлений, позволяющих в значительной мере сократить сроки ТПП и выполнить ее на высоком организационно-техническом уровне при меньших затратах труда, времени, материалов и денежных средств.

Основными направлениями технологической унификации, нашедшими широкое применение, являются типизация технологических процессов и групповой метод обработки. Технологическая унификация - основа рациональной организации производства. Она обеспечивает резкое сокращение различного рода вспомогательных работ, связанных с оформлением технологической, плановой, учетной и других видов документации, необходимой для подготовки производственного процесса и управления им. Она открывает широкие возможности в использовании вычислительной техники как для решения технологических задач (классификация деталей, выбор оптимальной конструкции оснастки, оптимального варианта технологического процесса и др.), так и задач в области нормирования, учета плановых и других работ, а также позволяет создать стандартные технологические процессы [2].

Заключение

Опыт развития автоматизированных систем показывает, что экономичной может быть только комплексная автоматизация. Частичная автоматизация может быть лишь этапом. Более того, всякая частичная автоматизация на предприятии должна вписываться в концепцию комплексной автоматизации.

Автоматизация ТПП осуществляется путем создания автоматизированных информационно-поисковых систем, механизации и автоматизации оформления документов, автоматизации логических и расчетных задач, а также путем создания автоматизированных информационно-справочных систем для решения задач регулирования процесса подготовки производства.

Для получения максимального эффекта от автоматизации процессов подготовки производства вначале должны быть выполнены работы по стандартизации ее элементов. Практика показывает, что автоматизация без

Управление техническими системами

предварительной подготовки объекта, выявления типичности и повторяемости тех или иных задач приводит к тому, что в условиях современного динамичного производства от автоматизации часто не получают того эффекта, которого ожидали. Поэтому, чтобы алгоритмы автоматизации ТПП имели универсальный характер, они должны быть построены на основе применения принципов стандартизации и типизации используемой при решении задач информации, а также стандартизации методов ее обработки.

Применение автоматизированных методов проектирования технологических процессов позволяет практически решить проблему их оптимизации [5].

На основании всего вышесказанного можно сделать вывод, что разработанная в 70-80-х годах Единая Система Технологической Подготовки Производства не удовлетворяет современным требованиям к ТПП. Поэтому существует проблема по созданию новой интегрированной системы технологической подготовки ЗШП, представляющей собой соединение разных компонентов (оборудование, технология, организационные условия производства, работники разной профессии и квалификации).

Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи:

- провести анализ существующей информации по автоматизации ЗШП;
- исследовать факторы, обеспечивающие снижение сроков ТП ЗШП и возможности существующих систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП);
- особое внимание следует уделить вопросам типизации элементов ТПП ЗШП и алгоритмов представления технологических процессов в электронном виде;
- по результатам анализа разработать более современные алгоритмы представления ТП в электронном виде и алгоритмы поиска ТП с целью снижения сроков ТПП.

Литература

1. Евгеньев Г., Кузьмин Б., Лебедев С., Тагиев Д. Проектирование технологических процессов // САПР и графика. - 2000. - № 4. - С. 22-27.
2. Крысин В.Н. Технологическая подготовка авиационного производства. - М.: Машиностроение, 1984. - 200 с.

Управление техническими системами

3. Шпур Г., Ф.-Л. Краузе. Автоматизированное проектирование в машиностроении / Пер. с нем. Г.Д. Волковой и др. Под ред. Ю.М. Соломенцева и В.П. Диденко. - М.: Машиностроение, 1988. - 648 с.

4. Грошиков А.И., Малафеев В.А. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении. - М.: Машиностроение, 1976. - 440 с.

5. Компьютерные интегрированные технологии авиационного производства.
Ч. 6. Автоматизированные системы технологической подготовки производства: Учеб, пособие / В.С. Кривцов, Ю.В. Дьяченко, В.Е. Зайцев, В.В. Коллеров, А.А. Павленко. - Х.: Нац. аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2003. - 92 с.