

**В. Ю. Шишмарёв**

# **АВТОМАТИКА**

**УЧЕБНИК ДЛЯ СПО**

2-е издание, исправленное и дополненное

*Рекомендовано Учебно–методическим отделом  
среднего профессионального образования в качестве  
учебника для студентов образовательных учреждений  
среднего профессионального образования*

*Допущено Министерством образования Российской Федерации  
в качестве учебника для студентов образовательных учреждений  
среднего профессионального образования, обучающихся  
по группе специальностей «Электротехника»*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

**Москва ■ Юрайт ■ 2017**

УДК 681.5(075.32)

ББК 32.965я723

Ш65

**Автор:**

**Шишмарёв Владимир Юрьевич** — доктор технических наук, профессор, действительный член (академик) Академии безопасности, обороны и правопорядка, действительный член (академик) Московской академии естествознания, гранд-доктор философии Европейской академии информатизации, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, до 2016 г. профессор кафедры технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов Института аэрокосмических конструкций, технологий и систем управления Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Рецензенты:**

*Костюков В. М.* — доктор технических наук;

*Петрова С. А.* — кандидат технических наук.

**Шишмарёв, В. Ю.**

Ш65 Автоматика : учебник для СПО / В. Ю. Шишмарёв. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017. — 284 с. — (Серия : Профессиональное образование).

ISBN 978-5-534-05168-1

Учебник посвящен основным методам построения систем автоматического управления (САУ). В нем представлена классификация и общие характеристики элементов автоматизации и измерительных преобразователей, рассмотрены типовые звенья САУ, их соединение, синтез, а также анализ устойчивости и качества работы.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным требованиям.

*Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования.*

УДК 681.5(075.32)

ББК 32.965я723



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Шишмарёв В. Ю., 2005

© Шишмарёв В. Ю., 2017, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2017

ISBN 978-5-534-05168-1

## Оглавление

<b>Предисловие</b> .....	<b>6</b>
<b>Введение</b> .....	<b>8</b>
<b>Глава 1. Основные понятия, цели и принципы управления</b> .....	<b>10</b>
1.1. Основные понятия и определения .....	10
1.2. Примеры систем автоматического управления.....	11
1.3. Цели и принципы управления .....	18
1.4. Типовая функциональная схема САУ .....	19
1.5. Математические модели САУ .....	21
1.6. Классификация САУ .....	23
<b>Глава 2. Классификация и общие характеристики элементов автоматики</b> .....	<b>29</b>
2.1. Основные понятия .....	29
2.2. Классификация элементов автоматики.....	37
2.3. Общие характеристики элементов автоматики .....	42
2.4. Динамический режим работы элементов .....	45
<b>Глава 3. Классификация и основные характеристики измерительных преобразователей</b> .....	<b>47</b>
3.1. Общие сведения о преобразователях .....	47
3.2. Классификация измерительных преобразователей .....	50
3.3. Статические и динамические характеристики измерительных преобразователей .....	51
3.4. Структурные схемы измерительных преобразователей .....	55
3.5. Унификация и стандартизация измерительных преобразователей .....	58
<b>Глава 4. Измерительные элементы систем автоматики (датчики)</b> .....	<b>60</b>
4.1. Общие сведения .....	60
4.2. Датчики перемещений.....	60
4.3. Датчики скорости .....	67
4.4. Датчики температуры .....	68
4.5. Датчики давления .....	71
<b>Глава 5. Задающие устройства и устройства сравнения</b> .....	<b>73</b>
5.1. Задающие устройства .....	73
5.2. Устройства сравнения .....	76

<b>Глава 6. Усилители</b> .....	<b>79</b>
6.1. Общие сведения .....	79
6.2. Магнитные усилители .....	80
6.3. Электромашинные усилители .....	83
6.4. Полупроводниковые усилители .....	85
<b>Глава 7. Переключающие устройства (реле)</b> .....	<b>99</b>
7.1. Общие сведения и классификация реле .....	99
7.2. Нейтральные электромагнитные реле постоянного тока .....	100
7.3. Тяговые и механические характеристики электромагнитного реле .....	103
7.4. Электромагнитные реле переменного тока .....	106
7.5. Поляризованные электромагнитные реле .....	107
7.6. Контакты реле. Средства дуго- и искрогашения .....	110
7.7. Реле времени .....	113
7.8. Тепловые реле .....	115
<b>Глава 8. Исполнительные устройства</b> .....	<b>118</b>
8.1. Общие характеристики исполнительных устройств .....	118
8.2. Электрические серводвигатели .....	119
8.3. Гидравлические двигатели .....	124
8.4. Сервоприводы с электромагнитными муфтами .....	126
8.5. Шаговые сервоприводы .....	128
<b>Глава 9. Типовые звенья САУ</b> .....	<b>131</b>
9.1. Режимы работы объекта. Возмущающие воздействия .....	131
9.2. Аperiodическое (инерционное, статическое) звено .....	134
9.3. Астатическое (интегрирующее) звено .....	138
9.4. Колебательное (aperiodическое 2-го порядка) звено .....	140
9.5. Пропорциональное (усилительное, безынерционное) звено .....	142
9.6. Дифференцирующее звено .....	143
9.7. Запаздывающее звено .....	146
9.8. Логарифмические частотные характеристики динамических звеньев .....	149
<b>Глава 10. Соединение звеньев в САУ</b> .....	<b>156</b>
10.1. Типовые соединения звеньев .....	156
10.2. Сложные соединения звеньев .....	159
10.3. Аппроксимация сложных объектов совокупностью нескольких типовых звеньев .....	160
<b>Глава 11. Синтез САУ или выбор типа регулятора</b> .....	<b>163</b>
11.1. Структурные схемы САУ .....	163
11.2. Понятие обратной связи .....	164
11.3. Классификация регуляторов по реализуемому закону регулирования .....	165

<b>Глава 12. Анализ устойчивости и качества работы САУ.....</b>	<b>169</b>
12.1. Понятие устойчивости САУ .....	169
12.2. Показатели качества работы САУ .....	171
12.3. Оптимальные процессы регулирования .....	173
12.4. Анализ устойчивости замкнутой системы .....	174
12.5. Вывод характеристического уравнения замкнутой системы из передаточных функций объекта и регулятора .....	179
12.6. Критерии устойчивости САУ .....	182
12.7. Анализ качества работы замкнутой САУ .....	186
<b>Глава 13. Цифровые системы автоматического управления ...</b>	<b>189</b>
13.1. Включение ЭВМ в САУ .....	189
13.2. Логические устройства автоматики .....	192
13.3. Системы числового программного управления .....	203
13.4. Промышленные роботы .....	210
13.5. Управляющие микроЭВМ и микроконтроллеры .....	216
<b>Глава 14. Системы телемеханики .....</b>	<b>226</b>
14.1. Основные понятия .....	226
14.2. Принципы построения систем телемеханики .....	230
14.3. Линии связи .....	235
14.4. Методы преобразования сигналов .....	238
14.5. АСУ технологическими процессами и производством .....	243
<b>Приложение 1. Экспериментальное определение динамических характеристик объектов реагирования .....</b>	<b>253</b>
<b>Приложение 2. Выбор регуляторов .....</b>	<b>268</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>283</b>
<b>Новые издания по дисциплине «Автоматика» и смежным дисциплинам.....</b>	<b>284</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время важным направлением научно-технического прогресса является комплексная автоматизация, включающая в себя: переход от автоматизации станков, агрегатов, установок к автоматизации работы линий, участков, цехов и заводов в целом; создание автоматизированных систем управления предприятием (АСУП) и целыми отраслями (ОАСУ); расширение применения промышленных роботов и гибких автоматизированных производственных систем.

Для современной техники характерны значительное усложнение задач управления и рост объемов обрабатываемой и передаваемой информации, определяющие принципиальный качественный скачок автоматизации — широкое применение средств вычислительной техники.

Основной задачей данного учебника является ознакомление учащихся с основными методами построения систем автоматического управления и средствами, необходимыми для их реализации.

При написании учебника автор использовал многолетний опыт преподавания автоматики в МАТИ — РГГУ имени К. Э. Циолковского, а также практический опыт по созданию и внедрению в производство конкретных промышленных систем автоматики.

В результате изучения курса студент должен освоить:

### *трудовые действия*

- владеть современными методиками для решения задач анализа САУ;
- методами синтеза САУ;
- методиками расчета и проектирования САУ;
- способами выбора и синтеза регуляторов САУ;
- методами определения характеристик объектов управления;
- навыками работы с учебной и научной литературой по системам автоматики;

### *необходимые умения*

- классифицировать САУ по различным признакам;
- строить временные, частотные и логарифмические частотные характеристики САУ;
- составлять операторные уравнения и передаточные функции САУ;
- выбирать необходимые типы регуляторов;

***необходимые знания***

- основные понятия и определения автоматики;
- принципы построения систем автоматического управления (САУ);
- функциональные схемы САУ;
- типовые звенья САУ, их свойства и характеристики;
- основные законы регулирования;
- структурные схемы САУ;
- временные и частотные характеристики САУ.

## ВВЕДЕНИЕ

Автоматика — это область науки и техники, охватывающая теорию и принципы построения систем управления, действующих без непосредственного участия человека.

Первые автоматы, т. е. машины, работающие без участия человека, были созданы еще греческим ученым Героном Александрийским, жившим в I в. н. э. Существуют описания около 100 автоматов, известных в те древние времена, которые использовались, как правило, в развлекательных и религиозных целях.

Первые автоматические устройства промышленного назначения были разработаны в связи с появлением паровых машин. В 1765 г. русским механиком И. И. Ползуновым был изобретен первый в мире промышленный регулятор, автоматически поддерживающий требуемый уровень воды в котле паровой машины. Предложенный им принцип регулирования по отклонению является одним из основных принципов построения различных автоматических систем.

Во второй половине XIX в. появились автоматические устройства, основанные на использовании электрической энергии. Одним из первых таких автоматов был электромагнитный регулятор скорости вращения паровой машины, разработанный русским ученым К. И. Константиновым.

Теоретические основы проектирования автоматических регуляторов были разработаны русским ученым И. А. Вышнеградским и английским ученым Дж. К. Максвеллом. Для создания и развития математического аппарата, используемого в исследовании автоматических систем, много сделали выдающиеся русские ученые А. М. Ляпунов, П. Л. Чебышев, Н. Е. Жуковский.

Первоначально работы по созданию автоматических систем в механике, электротехнике, теплотехнике и других научных отраслях велись независимо друг от друга. В начале 1940-х гг. автоматика стала формироваться как самостоятельная научная дисциплина, изучающая методы анализа и синтеза систем автоматического управления в технике независимо от их физической природы.

В настоящее время автоматические системы широко применяются во всех областях деятельности человека — в промышленности, на транспорте, в устройствах связи, при научных исследованиях и др.

Во многих отраслях техники и технологиях возможность автоматизации управления определяет дальнейшее их развитие. Так,



без автоматизации невозможно построение энергетических систем (в частности, атомных), современных химических и металлургических производств, пилотируемых, беспилотных и космических летательных аппаратов и др.

С экономической точки зрения автоматизация является одним из перспективных направлений развития всех отраслей науки и техники, так как она способствует повышению производительности труда, снижению материальных, энергетических и людских затрат, а следовательно, повышению эффективности любого производства.

В различных технологических и производственных процессах величины, характеризующие эти процессы, должны удовлетворять определенным условиям. Так, например, в энергосистемах должны поддерживаться на определенном уровне значения напряжения и частоты. В авиации, ракетной технике и космонавтике необходимо обеспечивать движение летательных аппаратов на заданной высоте, по заданному направлению (курсу) или траектории в пространстве. В производстве требуется обеспечивать работу отдельных станков, участков и цехов в автоматическом или автоматизированном режимах.

Создание условий, обеспечивающих требуемое протекание любого процесса, называется *управлением*.

Машина, аппарат, агрегат, комплекс машин или система, в которых протекает процесс, подлежащий управлению, называются *объектами управления*.

В данном учебнике рассматриваются основные принципы и методы построения автоматических и автоматизированных систем, приводятся основные способы повышения их устойчивости и качества, а также представлены типовые элементы, применяемые при построении автоматических систем: датчики, усилители, исполнительные элементы, устройства сравнения, логические элементы, образующие комплекс технических средств автоматики.

## Глава 1

# ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ЦЕЛИ И ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ

### 1.1. Основные понятия и определения

Еще в древности говорили, что прежде чем спорить, дискутировать, надо договориться о понятиях, т.е. о том, что понимать под тем или иным словом, определением.

Рассмотрим основные определения, принятые в управлении.

**Теория автоматического управления (ТАУ)** — это совокупность методов и специального математического аппарата, позволяющая спроектировать работоспособную промышленную систему автоматического управления (САУ), отвечающую заданным требованиям по качеству ее работы.

**Система автоматического управления** — это совокупность технических средств для управления регулируемым параметром, в которой вычислительные и логические операции осуществляются с помощью специальных технических устройств: автоматического регулятора, программируемого контроллера или управляющей вычислительной машины (УВМ).

Основной частью (узлом, элементом) САУ является объект управления.

**Объект управления** — это техническая установка или технологическая цепь установок, физико-химические процессы в которых управляются (регулируются) с помощью специальных технических средств.

**Технологические параметры** — это физико-химические величины, характеризующие состояние технологического процесса в объекте управления (например, температура, давление, скорость вращения и др.).

**Регулируемый параметр** — это технологический параметр, значением которого управляют с помощью специальных технических средств. Число регулируемых параметров, как правило, значительно меньше общего числа технологических параметров.

**Система ручного регулирования (СРР)** — это совокупность технических средств для управления регулируемым параметром, в которой вычислительные и логические операции осуществляются человеком-оператором. Принято считать, что такая система замкнута на человека, или в техническом смысле разомкнута.

Под **воздействиями** в ТАУ понимают факторы, изменяющие течение технологического процесса в объекте управления. Различают возмущающие и управляющие воздействия.

*Возмущающие* воздействия носят случайный, трудно предсказуемый характер. Например, изменение температуры наружного воздуха, колебания напряжения в электросети и др. *Управляющие* воздействия на объект управления организуются техническим устройством (в САУ) или человеком-оператором (в СРР) в целях компенсации влияния возмущающих воздействий.

Под **сигналами** в ТАУ понимают совокупность потоков энергии или вещества, поступающих в объект управления или выходящих из него, возмущающие и управляющие воздействия, а также регулируемые параметры.

По направлению различают *входные* и *выходные* сигналы объекта управления. Так, возмущающие и управляющие воздействия будут входными сигналами для объекта управления; регулируемый же параметр в ТАУ всегда принимают за выходной сигнал объекта управления, даже если он физически никуда за пределы объекта не выходит (например, температуру в топке котла, уровень вещества в бункере, напряжение на обмотках электродвигателя и др.).

## 1.2. Примеры систем автоматического управления

При реализации технологических процессов параметры, их характеризующие, должны изменяться по определенным законам (или быть постоянными). Необходимость изменения параметров в соответствии с заданным законом возникает в различных отраслях техники. На схемах (рис. 1.1) функциональные элементы САУ обозначают прямоугольником с надписью, а сигналы, поступающие на эти элементы, — стрелками.

Параметры физических процессов, определяющие сигналы, содержат информацию. Например, с помощью электрических сигналов в телефонной связи передаются звуки, а на телевидении — изображение. Параметры, содержащие информацию, называются *информационными*. Например, сигналом является электрическое напряжение, информационным параметром — амплитуда этого сигнала.

*Аналоговый* называется сигнал, информационные параметры которого могут принимать любые значения в заданном числовом интервале  $a \dots b$  (рис. 1.2).

*Дискретным* называется сигнал, информационные параметры которого принимают только дискретные значения.

Для примера рассмотрим конкретный технологический процесс — регулирование температуры в электропечи для закаливания металла. Для реализации этого процесса электропечь снабжа-



Рис. 1.1. Функциональный элемент САУ

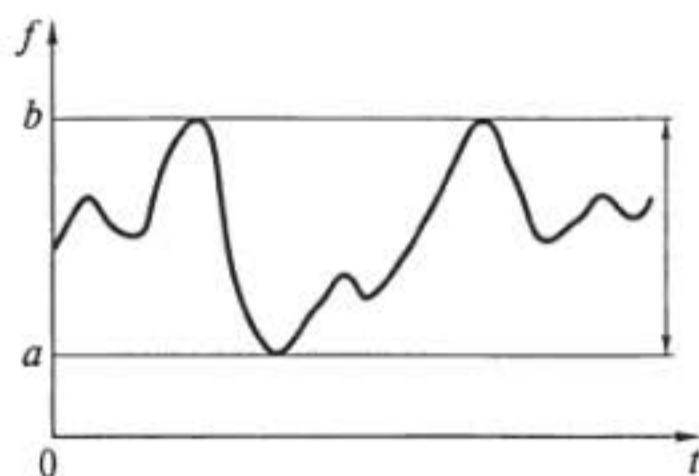


Рис. 1.2. Аналоговый сигнал  $f(t)$

ется управляющим (или регулирующим) органом, с помощью которого можно управлять процессом закаливания — изменять температуру в соответствии с заданным законом.

Создание условий, обеспечивающих требуемое протекание процесса закаливания, т. е. поддержание необходимого режима, называется управлением. Управление может быть ручным или автоматическим. При ручном управлении воздействие на управляющий орган осуществляет человек, наблюдающий за ходом процесса.

*Функциональной схемой* называется символическое изображение всех функциональных элементов технологического процесса и связей между ними, отражающее последовательность процессов в системе.

Представим с помощью функциональной схемы технологический процесс закаливания металла в электропечи (рис. 1.3).

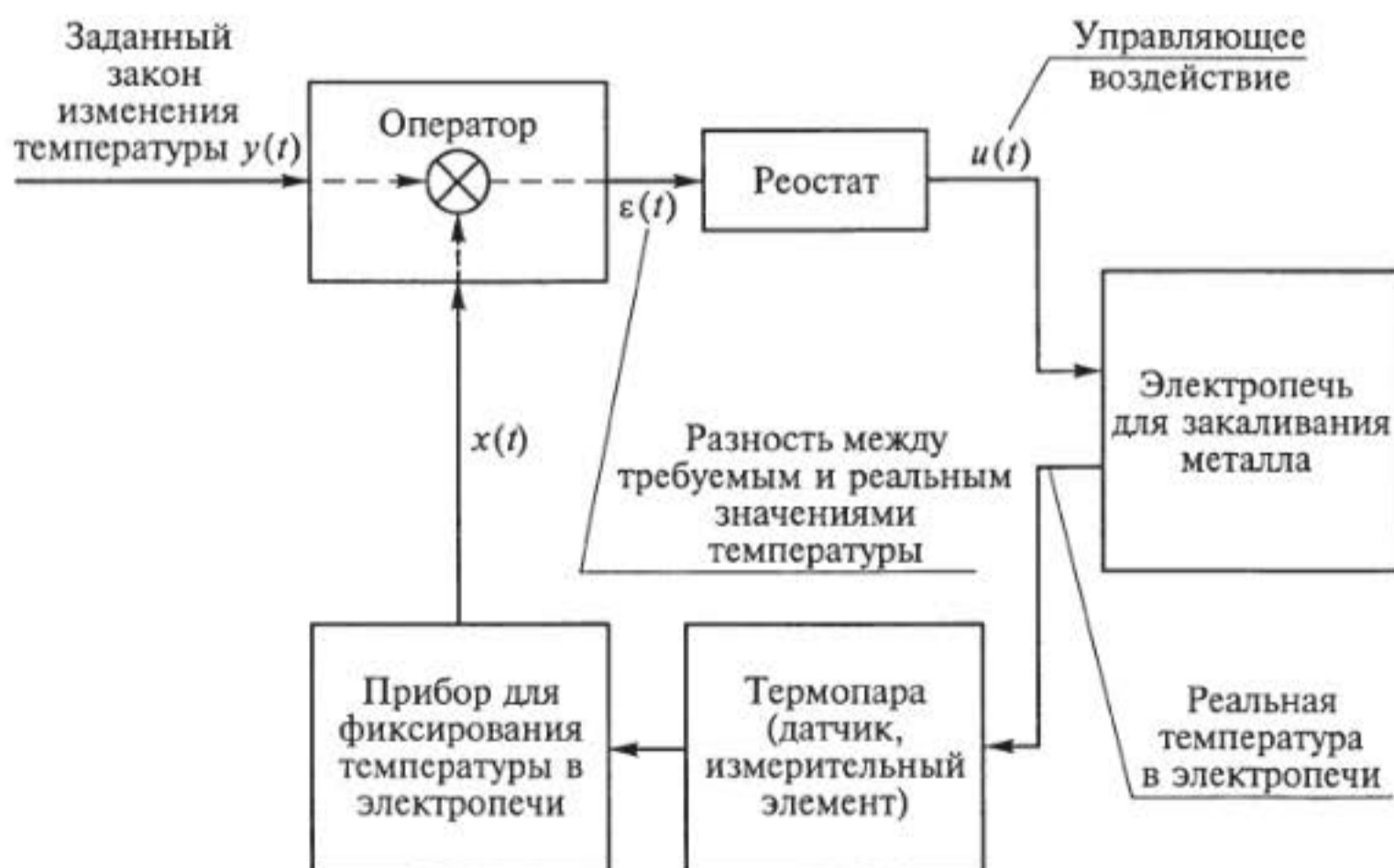


Рис. 1.3. Функциональная схема технологического процесса закаливания металла в электропечи с участием оператора

Данная система предназначена для поддержания необходимого режима, т. е. изменения температуры  $y(t)$  в электропечи по заданному закону. Для обеспечения требуемого процесса электропечь снабжается двумя элементами: термопарой, с выхода которой получают электрическое напряжение  $x(t)$ , пропорциональное температуре в электропечи, и реостатом, с помощью которого меняется сопротивление в цепи ее нагрева. При увеличении сопротивления ток в цепи нагрева уменьшается, а следовательно, уменьшается и температура в электропечи. При уменьшении сопротивления ток возрастает, и температура увеличивается.

Наблюдая за показаниями прибора, на котором фиксируется реальная температура в электропечи, и в зависимости от того, в какую сторону она отклонилась от заданного значения, оператор соответственно перемещает движок реостата. При этом отклонение реальной температуры в электропечи от заданной не должно превышать допустимого значения  $\varepsilon(t)$ . В системе имеет место так называемая обратная связь (ОС). Важнейшим звеном рассмотренного технологического процесса является *оператор*, следовательно, эта система является *ручной*.

При автоматическом управлении процессом воздействие на управляемый орган (реостат) осуществляет специальное управляющее устройство. Рассмотрим схему реализации приведенного технологического процесса без участия человека, в которой перемещение движка реостата в зависимости от наблюдаемого отклонения температуры осуществляется с помощью двигателя (привода). Поскольку с выхода термопары получают сигнал очень небольшой мощности (недостаточной для питания даже небольшого приводного двигателя), в схему вводят промежуточное звено — усилитель мощности. Схема реализации процесса закаливания металла в электропечи без участия человека представлена на рис. 1.4. Здесь сигнал  $y(t)$  (заданной температуры в печи) называют *управляющим*, сигнал  $x(t)$  (реальной температуры) — *управляемой переменной*, а систему, реализующую процесс закаливания, — *системой автоматического управления*.



Рис. 1.4. Функциональная схема автоматической системы, реализующей процесс закаливания металла в электропечи

Система автоматического управления представляет собой совокупность объекта управления (ОУ) и управляющего устройства, включающего в себя усилитель, реостат, измерительное устройство (датчик) и элемент сравнения. Объектом управления в данном случае является электропечь, а управляемой выходной переменной — температура. Под управляющим подразумевается устройство, обеспечивающее процесс управления, т.е. целенаправленное действие, приводящее к желаемому изменению управляемой переменной (температуры закаливания).

Для улучшения качества управления (например, уменьшения ошибки  $\varepsilon(t)$ , степени колебательности и т.д.) в систему вводят дополнительный очень важный элемент — регулятор. Тогда схема САУ, представленная на рис. 1.4, будет иметь вид, показанный на рис. 1.5.

При создании и функционировании САУ параметры элементов 4...8 остаются неизменными, поэтому часть системы, включающая в себя эти элементы носит название *неизменяемой*. На практике неизменяемую часть часто называют объектом управления, а к управляющему устройству относят лишь регулятор. Именно его параметры изменяются в процессе проектирования САУ.

Рассмотрим еще несколько примеров конкретных автоматических систем.

В энергетике используется много САУ, предназначенных для регулирования уровня жидкости, например автоматические регуляторы уровня в парогенераторах, конденсаторах, компенсаторах давления, барабанах-сепараторах и др.

Большинство из перечисленных САУ построены по схеме, показанной на рис. 1.6.

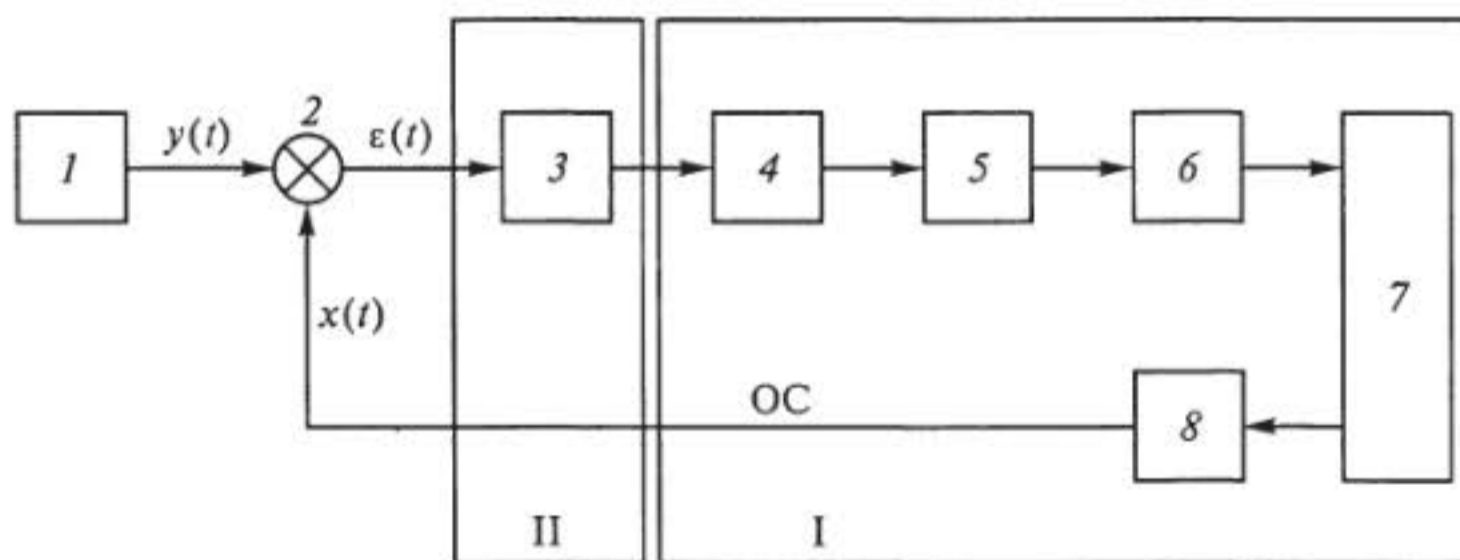


Рис. 1.5. Измененная функциональная схема системы автоматического управления процессом закаливания металла:

1 — задающее устройство; 2 — сравнивающее устройство; 3 — регулятор; 4 — усилитель мощности; 5 — привод (двигатель); 6 — реостат; 7 — электропечь; 8 — измерительное устройство (датчик); I — неизменяемая часть САУ; II — регулятор (изменяемая часть САУ)

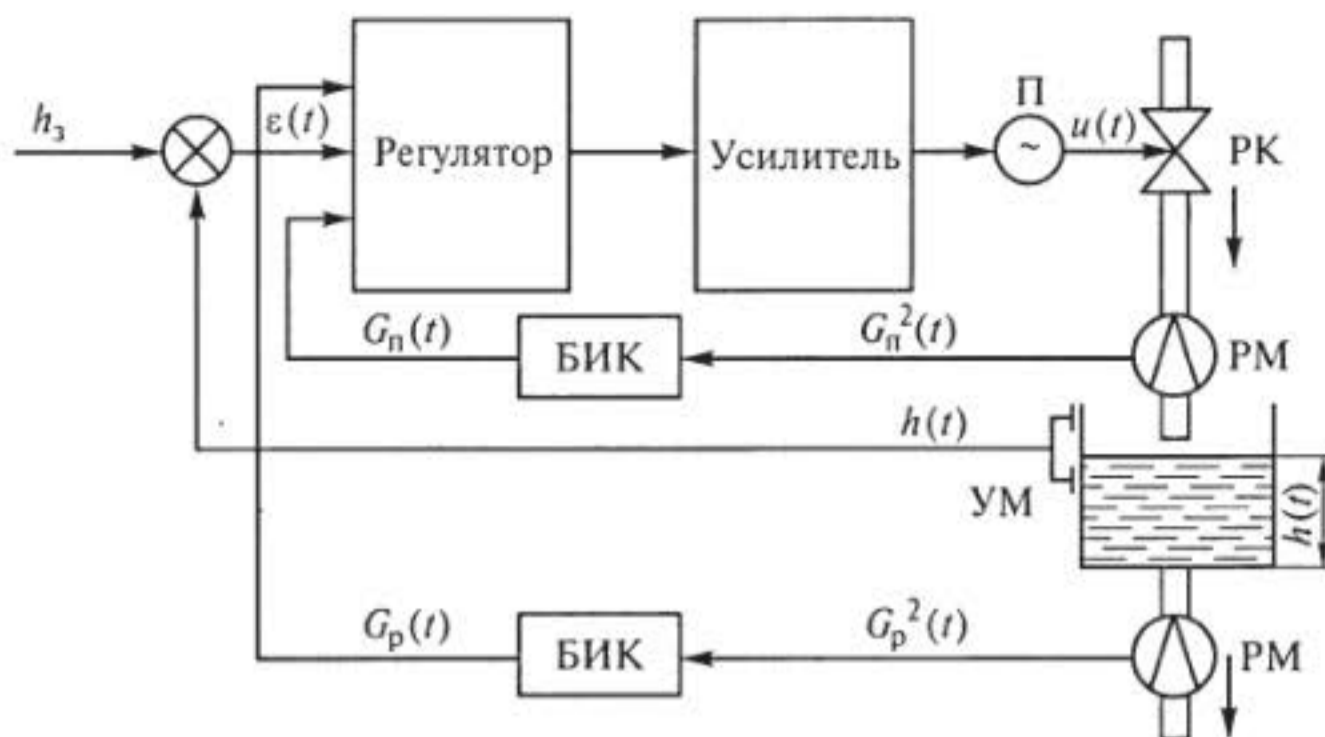


Рис. 1.6. Принципиальная схема системы автоматического регулирования уровня жидкости

Уровень жидкости  $h(t)$  зависит от разности двух величин — ее притока  $G_n$  и расхода  $G_p$ . Если  $G_n > G_p$ , уровень растет, и, наоборот, при  $G_n < G_p$  уровень уменьшается.

Приток  $G_n$  можно изменять посредством регулирующего клапана (РК), который управляется электроприводом (П).

Сигнал, соответствующий действительному уровню  $h(t)$ , измеряется уровнемером (УМ) и сравнивается с заданным уровнем  $h_3$ .

В зависимости от значения и знака сигнала рассогласования  $\epsilon(t)$  регулятор посредством электропривода увеличивает (при  $\epsilon > 0$ ) или уменьшает (при  $\epsilon < 0$ ) приток жидкости  $G_n$ , поддерживая равенство между  $G_n$  и  $G_p$  при заданном уровне  $h_3$ .

Изменение расхода  $G_p$  нарушает баланс в схеме, т.е.  $G_p$  является возмущающим сигналом.

Для повышения точности регулирования наряду с сигналом  $\epsilon(t)$  используется сигнал  $G_n$ , который обеспечивает местную обратную связь, или так называемое комбинированное регулирование.

Выходной сигнал некоторых расходомеров (РМ) пропорционален квадрату расхода жидкости, поэтому цепи измерения их расходов содержат блоки извлечения корня (БИК).

Воспользовавшись стандартными обозначениями можно записать:  $y(t) = h_3$  — сигнал на входе системы (заданное воздействие);  $x(t) = h(t)$  — сигнал на выходе системы (уровень жидкости);  $n(t) = G_p(t)$  — сигнал возмущения (расхода жидкости).

Функциональная схема САУ уровнем жидкости может быть представлена в виде, изображенном на рис. 1.7.

Мы рассмотрели замкнутые системы, в которых имеет место обратная связь, т.е. сравнение входного сигнала (эталона) с выходным (реальным значением регулируемой величины). Кроме того, существуют автоматические системы разомкнутого типа и

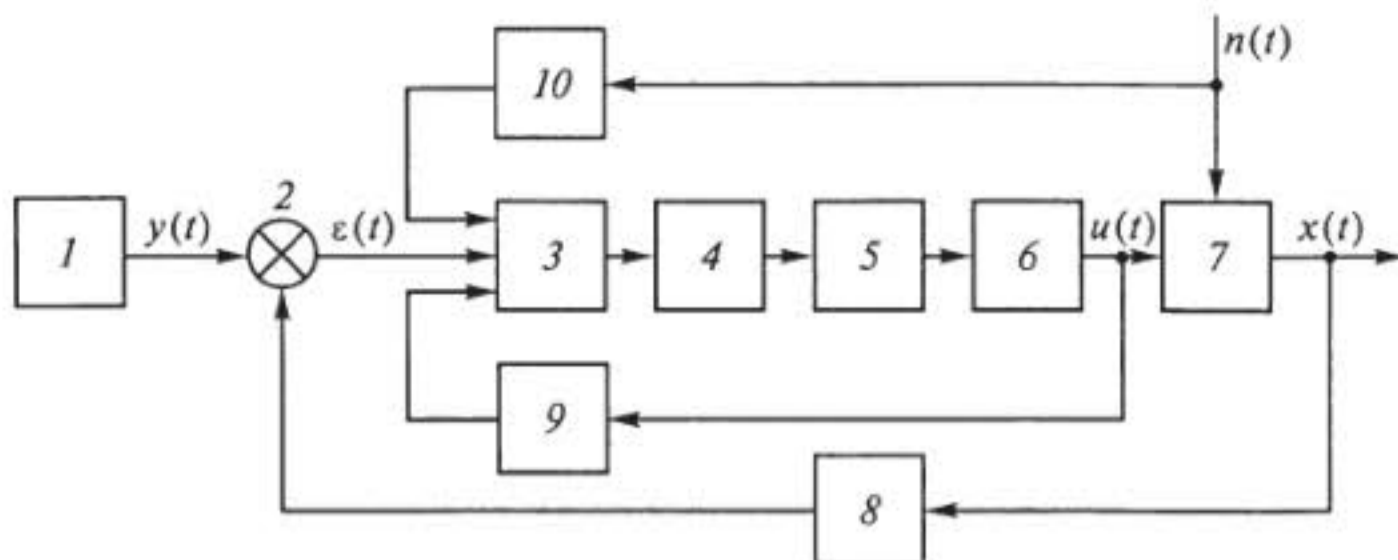


Рис. 1.7. Функциональная схема САУ уровнем жидкости:

1 — задающее устройство; 2 — сравнивающее устройство; 3 — регулятор; 4 — усилитель мощности; 5 — привод; 6 — регулирующий орган (клапан); 7 — объект управления; 8 — уровнеметр; 9, 10 — линейные расходомеры

комбинированные системы. В разомкнутых системах для выработки управляющего воздействия  $u(t)$  (сигнала с выхода регулятора) используется только информация о цели управления  $y(t)$ , а действительное значение выходной управляемой переменной  $x(t)$  не контролируется.

В качестве примера рассмотрим разомкнутую систему автоматического управления числом оборотов электродвигателя постоянного тока, функциональная схема которой представлена на рис. 1.8.

При ручном разомкнутом управлении нужное число оборотов двигателя, пропорциональное напряжению на входе усилителя, задается оператором путем перемещения движка потенциометра 1. С выхода потенциометра сигнал поступает на усилитель 2, вызывая изменение тока в якоре электродвигателя и соответственно его угловой скорости, которая измеряется тахогенератором 4 со стрелочным прибором, но не используется для замыкания системы.

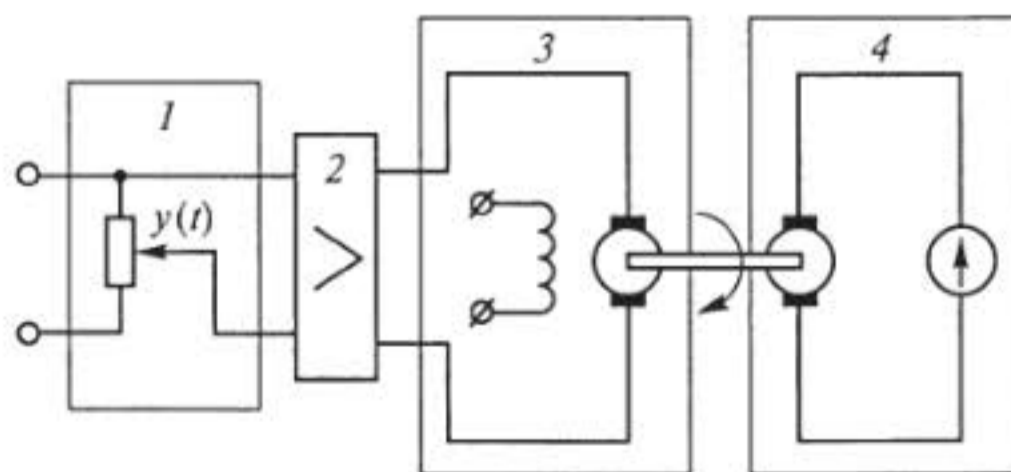


Рис. 1.8. Функциональная схема разомкнутой САУ числом оборотов электродвигателя:

1 — потенциометр; 2 — усилитель; 3 — электродвигатель; 4 — тахогенератор со стрелочным прибором



Вследствие старения, износа, неточности исполнения элементов и колебаний температуры градуировка системы (в которой каждому положению движка потенциометра должно соответствовать заданное число оборотов двигателя в установившемся режиме) нарушается, поэтому системы, работающие по разомкнутому циклу, часто не могут обеспечить высокое качество работы (высокую точность). Данную систему можно автоматизировать, при этом схема будет функционировать по замкнутому циклу, т. е. по принципу обратной связи и, следовательно, качество ее работы повысится. Функциональная схема такой замкнутой системы представлена на рис. 1.9.

В системе с замкнутым циклом в отличие от разомкнутой системы имеет место сравнение реального числа оборотов двигателя с требуемым. Сигнал рассогласования (ошибки)  $\varepsilon(t)$  поступает на регулятор 2 и усилитель 3, т. е. управляет системой. Выбор структуры и параметров регулятора 2 должен обеспечить высокую точность работы системы. Замкнутая система не требует точной градуировки: ее точность сохраняется и при «уходе» параметров от эталонных из-за старения элементов или по другим причинам.

Поясним и уточним некоторые проблемы автоматического управления, используя рассмотренные конкретные САУ.

В соответствии с определением кибернетики как науки об управлении, передаче и переработке информации САУ являются кибернетическими системами, т. е. для САУ характерны понятия, составляющие основу кибернетики: управление, информация, система. Элементы САУ связаны между собой информационными каналами и линиями управления.

Отметим важное свойство САУ: они обладают свойствами и выполняют функции, которые существенно отличаются от свойств и функций их отдельных элементов.

Отличительной чертой рассмотренных САУ является поступление на их входы так называемой *обратной информации*, необходи-

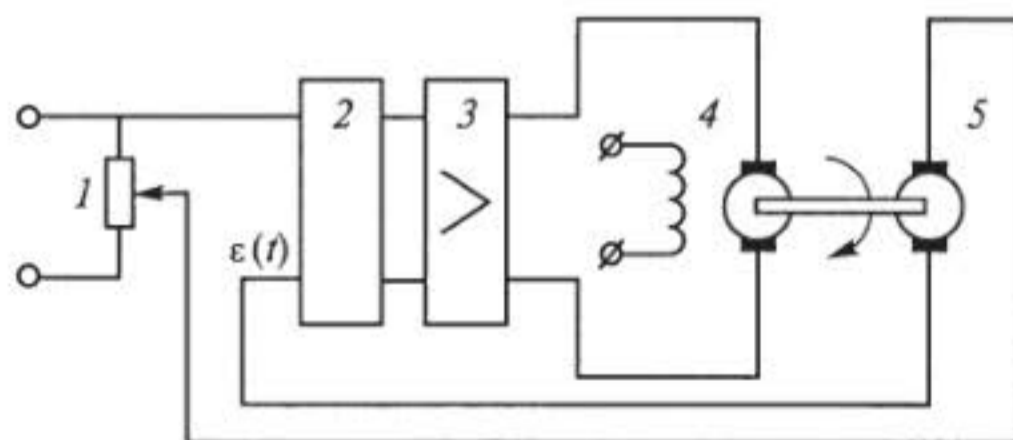


Рис. 1.9. Функциональная схема замкнутой САУ числом оборотов электродвигателя:

1 — потенциометр; 2 — регулятор; 3 — усилитель; 4 — электродвигатель; 5 — тахогенератор

мой для контроля (т. е. наличие обратной связи). Так как ОС замыкает канал управления, такое управление называют замкнутым.

При управлении с ОС значение управляющей переменной постоянно сопоставляется с ее заданным (эталонным) значением. Цель управления — сделать эти величины близкими, несмотря на различные помехи.

*Контур управления* — это система, состоящая из объекта управления и регулятора (управляющей системы, с помощью которой добиваются нужного качества управления).

К основным функциям контура управления относятся: измерение, сравнение и реагирование (выработка команды управления  $u(t)$  объектом), которые должны по возможности выполняться оптимально. В этом случае контур управления, несмотря на различные помехи, будет постоянно поддерживать управляемую переменную близкой к ее заданному значению.

### 1.3. Цели и принципы управления

Уже на основе рассмотренных примеров можно сформулировать задачу управления: изменять протекающие в объекте управления процессы посредством соответствующих команд для достижения поставленной цели.

В основе ТАУ, рассматривающей общие принципы проектирования систем автоматического управления, лежат математические модели, отражающие связь элементов САУ друг с другом и внешней средой.

Теперь можно расширить определение САУ: системой автоматического управления называется система, представляющая собой совокупность объекта управления и управляющего устройства, обеспечивающего процесс управления, т. е. целенаправленное воздействие, приводящее к желаемому изменению управляемых переменных.

Фундаментальными принципами управления, содержание которых становится ясным из рассмотренных примеров, являются:

- принцип разомкнутого управления;
- принцип компенсации — управления по возмущению (если возмущающие воздействия в системе велики, для повышения точности разомкнутой системы на основе измерения возмущений в алгоритм управления вводятся коррективы, компенсирующие влияние этих возмущений);
- принцип обратной связи.

Далее мы будем рассматривать системы, работающие по принципу обратной связи.

Для САУ этого класса характерны:

- наличие обратной связи;

- преобразование слабых управляющих сигналов на входе, идущих от измерительного устройства, в достаточно мощные воздействия на объект (ток в цепи нагрева);

- наличие ошибки  $\varepsilon(t)$ , являющейся движущим сигналом для системы, работающей на уменьшение этой ошибки;

- замкнутость системы через обратную связь, реализуемую с помощью измерительного устройства — термопары. Измерительный (чувствительный) элемент в этом случае служит не просто для регистрации температуры, а для формирования сигнала рассогласования  $\varepsilon(t)$ , являющегося входным для усилителя, сигнал с которого затем подается на вход системы.

Использование принципа ОС позволяет дать еще одно определение САУ с акцентом на особом значении этого принципа: САУ — это система, стремящаяся сохранить в допустимых пределах рассогласование (ошибку)  $\varepsilon(t)$  между требуемыми  $y(t)$  и действительными  $x(t)$  значениями управляемых переменных с помощью их сравнения на основе принципа ОС и использования получаемых при этом сигналов для управления.

#### 1.4. Типовая функциональная схема САУ

Приведенные примеры позволяют представить типовую функциональную схему САУ (рис. 1.10). Рассмотрим назначение каждого из элементов этой схемы.

Задающее устройство  $1$  преобразует воздействие  $y_3(t)$  в сигнал  $y(t)$ , а сравнивающее устройство  $2$  в результате сравнения сигнала  $y(t)$  и регулируемой величины  $x(t)$  (предполагается, что элементы  $10$  и  $11$  не искажают сигнал  $x(t)$ ) вырабатывает сигнал ошибки  $\varepsilon(t)$ . Сравнивающее устройство также называют датчиком ошибки, отклонения, рассогласования.

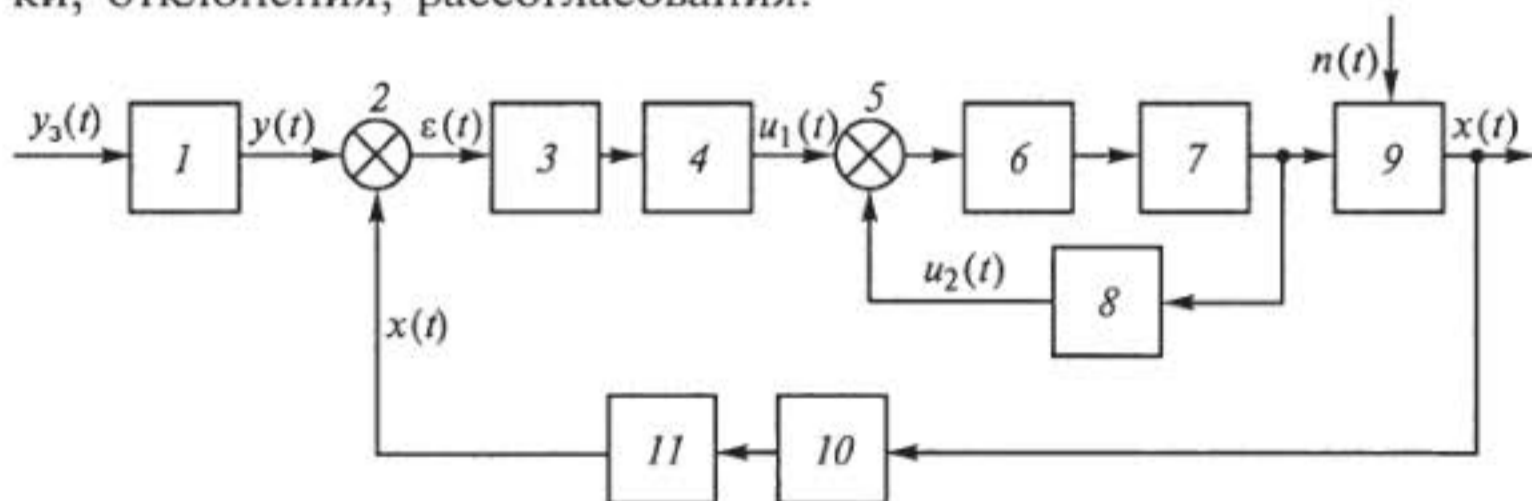


Рис. 1.10. Типовая функциональная схема САУ:

$1$  — задающее устройство;  $2, 5$  — сравнивающие устройства;  $3$  — преобразующее устройство;  $4, 8$  — корректирующие устройства (регуляторы);  $6$  — усилительное устройство;  $7$  — исполнительное устройство;  $9$  — объект управления;  $10$  — чувствительный (измерительный) элемент;  $11$  — элемент главной обратной связи;  $n(t)$  — помеха

Преобразующее устройство 3 служит для преобразования одной физической величины в другую, более удобную для использования в процессе управления (во многих системах преобразующее устройство отсутствует).

Регуляторы 4, 8 служат для обеспечения заданных динамических свойств замкнутой системы. С их помощью обеспечивается высокая точность ее работы в установившемся режиме, а также демпфируются сильные колебательные процессы (например, летательных аппаратов). Более того, введение в систему регулятора позволяет устранить незатухающие или возрастающие колебания управляемой величины. Иногда регуляторы вырабатывают управляющие сигналы (команды) в зависимости от возмущающих воздействий, что существенно повышает качество работы систем, увеличивая их точность.

Из приведенной схемы САУ видно, что в хорошо спроектированной системе ошибка  $\varepsilon(t)$  очень мала, в то время как на управляемый объект должны поступать воздействия с мощностью, достаточной для питания двигателя. В связи с этим важным элементом САУ является усилительное устройство 6, предназначенное для усиления мощности сигнала ошибки  $\varepsilon(t)$ , т.е. управления энергией, поступающей от постороннего источника. На практике широко используются электронные, магнитные, гидравлические и пневматические усилители.

Следующим важным элементом САУ является исполнительное устройство 7, предназначенное для воздействия на управляющий орган. Исполнительные устройства могут быть пневматические, гидравлические и электрические, которые подразделяются, в свою очередь, на электромоторные и электромагнитные.

Пневматические исполнительные устройства имеют сравнительно малые габариты и массу, но требуют большого расхода сжатого газа. Гидравлические исполнительные устройства способны преодолевать большие нагрузки и практически безынерционны. Их недостаток — большая масса. Электрические исполнительные устройства достаточно универсальны и отличаются удобством подведения к ним энергии. Вместе с тем их использование требует наличия достаточно мощного источника тока. В некоторых САУ исполнительный механизм как таковой отсутствует, и воздействие на объект осуществляется изменением состояния управляющей величины (тока, напряжения) без помощи механических устройств.

Чувствительный (измерительный) элемент — датчик 10 необходим в САУ для преобразования управляемых переменных в сигналы управления (например, угла в напряжение).

Элемент, который подвергается управлению, является объектом управления. При проектировании объектом управления считают всю неизменяемую часть САУ (т.е. все элементы, кроме регулятора). Это могут быть электрическая печь для закаливания

металла, самолет, ракета, космический аппарат, двигатель, ядерный реактор, станок для обработки металла и т. д. В связи с большим разнообразием объектов управления разными могут быть и управляемые переменные: напряжение, число оборотов, угловое положение, курс, мощность и т. д.

Из анализа рис. 1.10 можно сделать вывод о том, что САУ представляет собой замкнутую систему, обладающую свойством однонаправленности и реагирующую на сигнал ошибки  $\varepsilon(t)$ .

Определим сигналы, представленные на рис. 1.10.

Сигнал  $y(t)$  является преобразованным задающим воздействием (т. е. входным сигналом).

Сигнал  $x(t)$  — управляемая переменная (т. е. выходная величина системы, реакция).

Сигнал  $\varepsilon(t)$  — сигнал ошибки (рассогласования).

Сигналы  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  — команды управления.

Дадим несколько определений.

Система, в которой сигнал  $y(t)$  — известная функция (детерминированный сигнал) на всем промежутке управления, называется *системой программного управления*.

Система, в которой задающее воздействие  $y(t) = \text{const}$ , называется *системой стабилизации*.

Система, в которой задающее воздействие  $y(t)$  — случайная функция, называется *следящей системой*.

Таким образом, одномерные системы могут быть системами программного управления, системами стабилизации и следящими системами.

Кроме того, на практике используются:

- системы с поиском экстремума показателя качества;
- системы оптимального управления;
- адаптивные системы.

## 1.5. Математические модели САУ

На первом этапе расчета и проектирования систем автоматического управления ограничиваются их качественным описанием на основе анализа функциональных схем. Такое описание называют содержательным, или неформальным. *Неформальным* описанием называется вся имеющаяся совокупность сведений о САУ, достаточная для построения фактического алгоритма ее работы. Неформальное описание содержит информацию, достаточную для построения функциональной схемы САУ, служащей основой для разработки ее *формального* (математического) описания.

Недостаток содержательного (неформального) описания САУ состоит в том, что в этом случае не оперируют количественными характеристиками и, таким образом, наука, в основе которой

лежит неформальное описание, не является точной наукой. Для исследования же и проектирования САУ необходимо оперировать количественными характеристиками, определяющими качество ее работы. В связи с этим центральным понятием в ТАУ является математическая модель или оператор системы.

Под математической моделью САУ понимают количественную формализацию абстрактных представлений об изучаемой системе. *Математическая модель* — это формальное описание системы с помощью математических средств: дифференциальных, интегральных, разностных, алгебраических уравнений, а также неравенств, множеств и т. д.

Используя понятие системного оператора, можно на единой основе рассмотреть понятие математической модели САУ.

Пусть  $U$  и  $X$  — множества входных и выходных сигналов САУ. Если каждому элементу  $y \in U$  ставится в соответствие определенный элемент  $x \in X$ , то говорят, что задан системный оператор  $A$ .

Посредством системного оператора  $A$  задается связь между входом и выходом САУ:

$$Ax = y; x = A^{-1}y = By.$$

Операторное уравнение (или уравнение с оператором  $A$ )  $Ax = y$  следует считать математической моделью САУ, поскольку оно устанавливает количественную связь между ее входным  $y(t)$  и выходным  $x(t)$  сигналами.

Принципиально важным является ответ на вопрос: как построить оператор системы  $A$ ?

В подавляющем большинстве случаев операторные уравнения систем принадлежат к классу дифференциальных уравнений или эквивалентных им интегральных уравнений. Для получения дифференциального уравнения системы в целом обычно описывают отдельные ее элементы, т. е. составляют дифференциальные уравнения для каждого входящего в систему элемента. Например, для САУ, приведенной на рис. 1.4, составляют дифференциальные уравнения усилителя, привода, реостата, электрической печи, термопары и элемента сравнения.

Совокупность уравнений всех элементов и дает уравнение системы в целом.

Уравнение системы определяет ее математическую модель, которая к тому же для одной и той же системы в зависимости от цели исследования может быть разной.

Полезно при решении одной и той же задачи управления на разных этапах строить разные математические модели, т. е. начать исследование можно с простой модели, а затем ее постепенно усложнять с тем, чтобы учесть дополнительные физические явления и связи, которые на начальном этапе не учитывались (как несуществующие).

Задать оператор системы — это значит задать правило определения ее выходного сигнала по входному сигналу.

## 1.6. Классификация САУ

Системы автоматического управления можно классифицировать по различным признакам.

Классификация САУ по классам дифференциальных уравнений, которыми они описываются, приведена на рис. 1.11.

*Линейными* называют системы, описываемые линейными операторными уравнениями (например, линейными дифференциальными уравнениями или системами этих уравнений); в противном случае система входит в класс *нелинейных*.

Линейные и нелинейные *дискретные* системы описываются соответственно линейными и нелинейными разностными уравнениями или системами разностных уравнений.

Линейные и нелинейные *стационарные* системы описываются дифференциальными уравнениями или системами уравнений с постоянными коэффициентами.

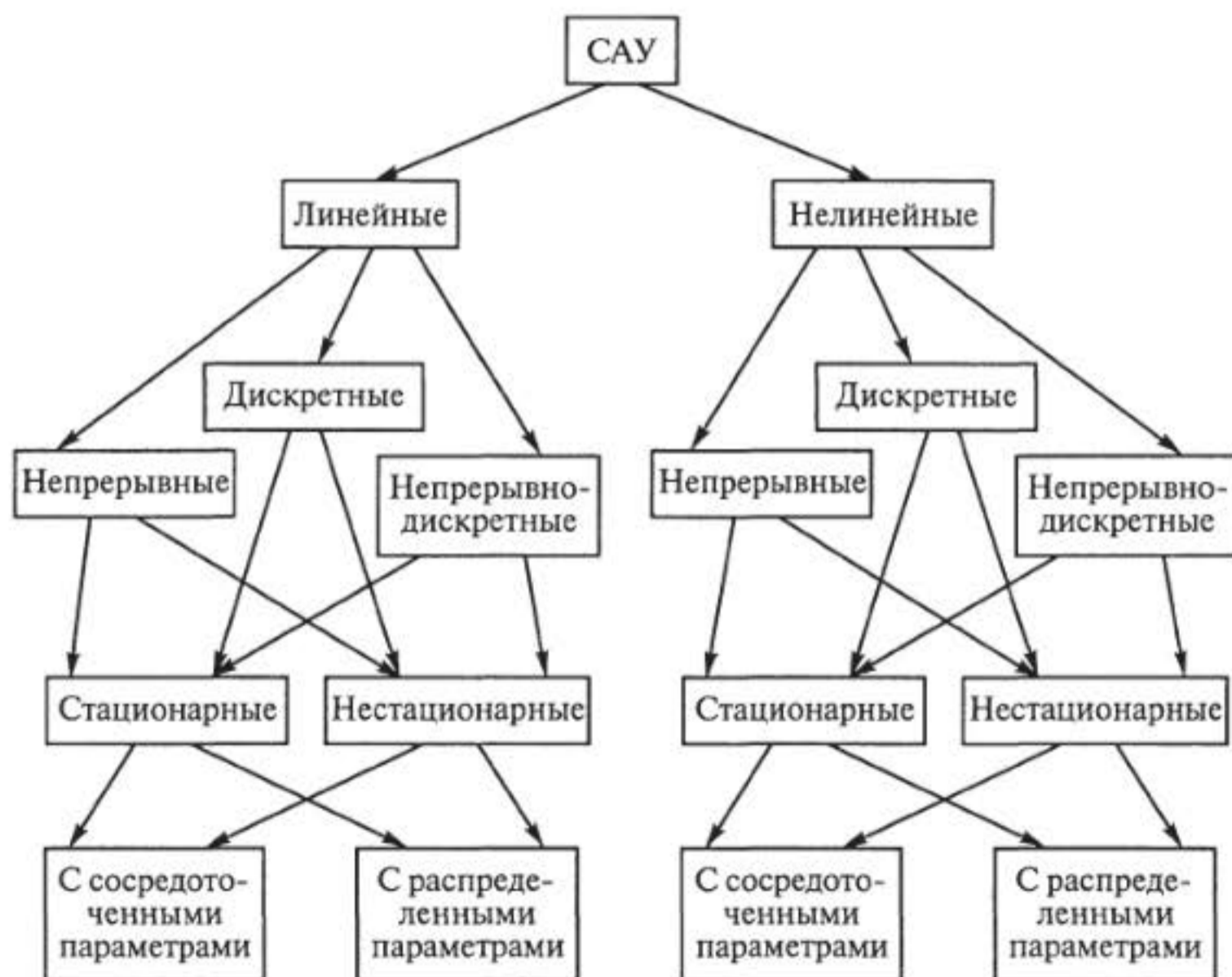


Рис. 1.11. Укрупненная классификация САУ по классам дифференциальных уравнений

Линейные и нелинейные *нестационарные* системы описываются дифференциальными уравнениями или системами уравнений с переменными коэффициентами.

*Сосредоточенные* системы, или системы с сосредоточенными параметрами, описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями.

*Распределенные* системы, или системы с распределенными параметрами, описываются дифференциальными уравнениями в частных производных.

**По принципу действия** различают:

САУ по отклонению — принцип И. И. Ползунова (первая система управления уровнем воды в баке паровой машины была создана им в 1765 г.);

САУ по возмущению — принцип Ж. Понселе (первая система управления по нагрузке на валу паровой машины была предложена им в 1830 г.);

комбинированные САУ, объединяющие принципы И. И. Ползунова и Ж. Понселе.

Рассмотрим структурные схемы этих типов САУ.

Структурная схема САУ по отклонению представлена на рис. 1.12. Легко заметить, что эта схема аналогична схеме типовой промышленной САУ.

Решая конкретную задачу управления работой паровой машины, Иван Иванович Ползунов и не предполагал, что его схемное решение будет использоваться через 200 лет в 80...90 % промышленных САУ.

Достоинством САУ по отклонению является то, что она компенсирует влияние любого возмущающего воздействия, которое вызвало отклонение значения ее выходного сигнала ( $\pm\Delta X_{\text{вых}}$ ), изменением через цепь отрицательной обратной связи значения входного сигнала ( $\pm\Delta X_{\text{вх}}$ ) с помощью сигнала  $\mu$ , поступающего с регулятора.

Недостаток САУ по отклонению состоит в том, что отклонение выходного сигнала (например, вследствие нарушения технологического режима) должно сначала появиться, и только после



Рис. 1.12. Структурная схема САУ по отклонению





Рис. 1.13. Структурная схема САУ по возмущению

этого регулятор должен не только компенсировать возмущающее воздействие, но и свести к нулю отклонение от заданного значения регулируемого параметра  $X_{\text{вых}}$ . При использовании высокочувствительного датчика это отклонение может быть минимальным, но в принципе оно будет иметь место.

Структурная схема системы автоматического управления по возмущению представлена на рис. 1.13.

Иногда возмущающее воздействие (например, изменение температуры наружного воздуха) можно измерить, т.е. если  $\lambda$  единственное возмущающее воздействие на объект (например, сигнал поверхностного теплообменника, установленного на открытой площадке), его измеряют и подают на регулятор для сравнения с заданным значением и выработки управляющего сигнала  $\mu$ , изменяющего значение входного сигнала.

При таком принципе управления изменение возмущающего воздействия компенсируется регулятором до того, как оно нарушит технологический режим работы объекта, что является главным достоинством этого типа САУ. Однако существенный недостаток таких систем — это неспособность компенсировать влияние других возмущающих воздействий на объект, которых в современных сложных установках бывает несколько и которые иногда невозможно измерить. Поэтому в промышленности САУ по возмущению используются редко.

Следует обратить внимание на то, что в САУ по возмущению выходной сигнал объекта или системы жестко (через цепь элементов) не связан с входным сигналом. Следовательно, САУ по возмущению является разомкнутой, т.е. системой без обратной связи по выходному сигналу.

**Комбинированные САУ** (рис. 1.14) лишены многих недостатков предыдущих рассмотренных схем.

Оператор-технолог обычно знает откуда ждать наибольшее возмущающее воздействие и, если его можно измерить, для компенсации устанавливается регулятор 1. Для компенсации влияния остальных возмущающих воздействий в цепь отрицательной обратной связи подключается регулятор 2. Таким образом, в комбинированных САУ используются и принцип И. И. Ползунова, и принцип Ж. Понселе.



Рис. 1.14. Структурная схема комбинированной САУ

По закону изменения во времени выходного сигнала задатчика различают САУ автоматической стабилизации, программные и следящие.

Отличительным признаком САУ автоматической стабилизации является постоянное во времени значение выходного сигнала их задатчика, т. е.

$$X_{\text{вых.зад}} = \text{const.}$$

Современные технологии — это в большинстве случаев технологии непрерывных производств, в которых заданный технологический режим не меняется сутками и месяцами. Объекты таких технологий, обладающих высокими технико-экономическими показателями (ТЭП), обычно управляются САУ автоматической стабилизации.

Отличительный признак программных САУ — это изменение выходного сигнала задатчика по заранее известной функции времени, т. е. по программе

$$X_{\text{вых.зад}} = f(\tau).$$

Программные САУ используются для управления периодическими процессами (металлообработкой, термообработкой изделий и др.). При этом способ задания программы может быть самый различный: от применения механического вращающегося кулачка до программы, записанной в микропроцессор.

В следящих САУ выходной сигнал задатчика заранее неизвестен, т. е. он может быть случайной величиной:

$$X_{\text{вых.зад}} = \text{var.}$$

Такая ситуация возникает, когда следящая система является вторичной и отслеживает параметр, значение которого заранее неизвестно. Например, при необходимости подачи воздуха в оп-

ределенном соотношении с расходом газа в топку котла. В этом случае расход газа меняется случайным образом под влиянием возмущающих воздействий, но система управления расходом воздуха должна выдерживать определенное их соотношение, т. е. должна следить за изменением расхода газа, который является для нее заданием.

По закону изменения во времени выходного сигнала регулятора различают САУ *дискретные* (двух-, трехпозиционные) и *непрерывные* (аналоговые).

Выходной сигнал регулятора в двухпозиционных САУ может принимать два резко отличающихся друг от друга значения: 0 — 1; включено — отключено; замкнут — разомкнут.

Примером двухпозиционной системы является бытовой холодильник с термореле.

На рис. 1.15 приведен временной график работы такой САУ. При отключенном циркуляционном насосе хладагента температура в камере холодильника постепенно повышается и, достигнув определенного значения ( $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), замыкает термореле, через контакт которого затем включается насос. При циркуляции хладагента температура в холодильнике снижается до  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , термореле размыкает контакт цепи насоса, и цикл повторяется.

Двухпозиционные САУ надежны, дешевы, но точность регулирования параметра в них мала.

Реже применяются трехпозиционные САУ, в которых выходной сигнал регулятора может принимать три значения:  $-1$ ;  $0$ ;  $+1$  или больше — норма — меньше. Качество работы трехпозиционных САУ выше, но надежность ниже.

В аналоговых САУ выходной сигнал регулятора непрерывно изменяется во времени, иногда по сложному закону в определенном диапазоне. В Государственной системе приборов (ГСП) эти диапазоны стандартизированы.

Диапазон выходных сигналов пневматических регуляторов составляет  $0,02 \dots 0,1$  МПа.

Электрические регуляторы имеют несколько стандартных диапазонов:  $0 \dots 5$ ,  $0 \dots 20$ ,  $4 \dots 20$  мА;  $0 \dots 10$  В и др.

В дальнейшем мы будем рассматривать методику исследования и математический аппарат, используемый при разработке САУ непрерывного действия, действующих по принципу И. И. Ползунова, так как таких систем в промышленности большинство.

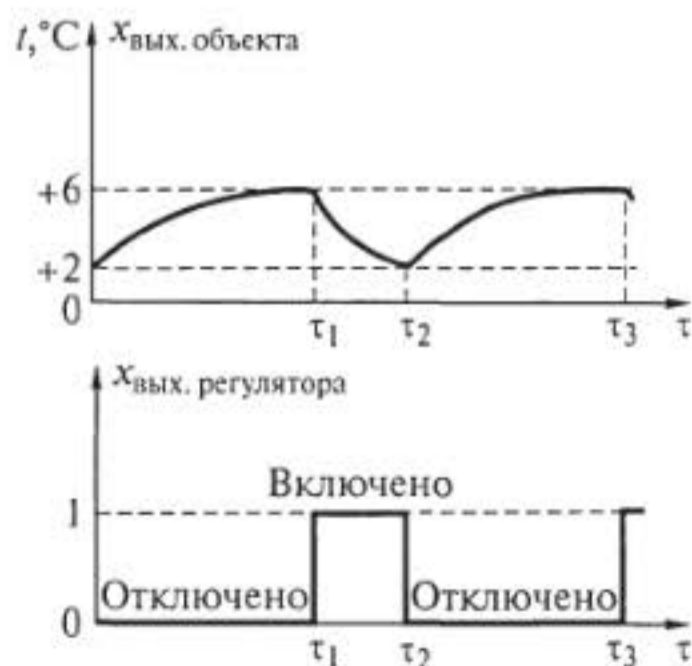


Рис. 1.15. Временной график работы двухпозиционной САУ

### Контрольные вопросы

1. Что такое объект управления и чем отличаются его технологические и регулируемые параметры?
2. Чем отличается система автоматического управления от системы ручного регулирования?
3. Что такое возмущающие воздействия, входные и выходные сигналы САУ?
4. Поясните общую функциональную схему технологического процесса.
5. Поясните функциональную схему закаливания металла в электропечи.
6. Поясните схему и назначение основных элементов САУ процессом закаливания металла.
7. Поясните схему и назначение элементов системы автоматического регулирования уровня жидкости.
8. Поясните схему и назначение основных устройств замкнутой САУ уровнем жидкости.
9. В чем состоит различие разомкнутой и замкнутой САУ числом оборотов электродвигателя? Поясните назначение элементов этих САУ.
10. Поясните типовую функциональную схему САУ и назначение всех ее элементов.
11. Как классифицируются САУ по классам дифференциальных уравнений?
12. Как классифицируются САУ по принципу действия? Приведите примеры таких САУ.

## Глава 2

# КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ

### 2.1. Основные понятия

Любое автоматическое устройство представляет собой комплекс отдельных конструктивных или схемных элементов, каждый из которых выполняет задачу по преобразованию энергии, полученной от предыдущего элемента, и передаче ее последующему элементу. Элементами автоматики называются конструктивно законченные устройства, выполняющие определенные самостоятельные функции преобразования сигнала (информации) в системах автоматического управления и контроля.

На рис. 2.1, *а* схематически изображен элемент автоматики (Э) без усиления энергии, на вход которого подается энергия, обозначенная  $x$ . После преобразования этой энергии по значению на выходе такого элемента автоматики получают энергию  $y$ .

Иногда возникает необходимость в том, чтобы энергия  $y$  на выходе элемента автоматики была больше, чем энергия  $x$  на его входе; в этом случае в элемент вводится дополнительная энергия  $z$  (рис. 2.1, *б*). Очевидно, что при подаче дополнительной энергии возможно усиление небольшой входной энергии  $x$ , т. е. получение большой выходной энергии  $y$ .

Величины  $x$  и  $y$  могут быть электрическими (например, напряжение, ток, сопротивление) и неэлектрическими (например, давление, перемещение, температура, скорость).

Чаще в автоматике применяются электрические элементы, в которых величины  $x$  и  $y$  также являются электрическими, но находят применение и неэлектрические элементы автоматики: гидравлические, пневматические, механические и др.

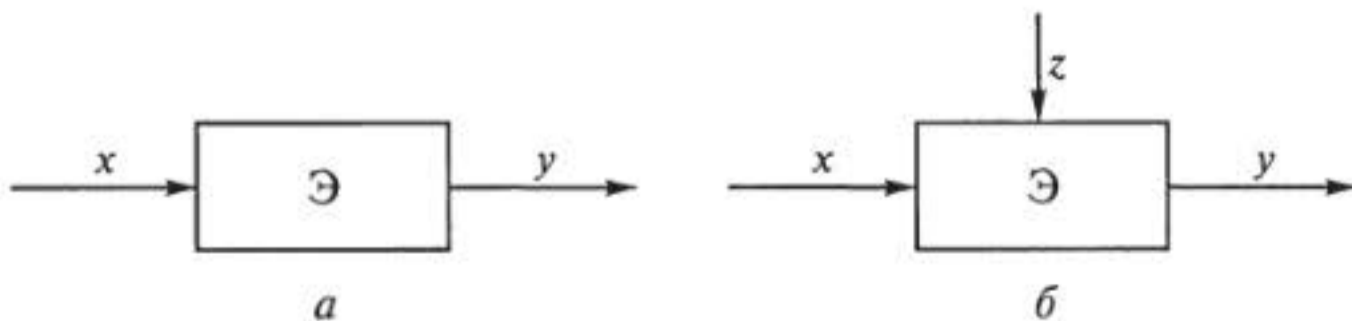


Рис. 2.1. Схемы элементов автоматики без дополнительной энергии (*а*) и с подачей дополнительной энергии (*б*)

Характеристики элементов оказывают влияние на свойства систем автоматики, которые из них состоят. Изучение свойств этих элементов необходимо для анализа работы устройств и схем, основными показателями работы которых являются точность, чувствительность, инерционность и др.

Приведем функции, выполняемые различными элементами, классификацию физических принципов, лежащих в основе их действий, и общие для различных элементов автоматики характеристики.

Рассмотрим типы схем, применяющихся в автоматике и телемеханике, а также основные правила их выполнения.

Комплексы различных устройств и элементов, входящих в состав любых систем управления и соединенных электрическими, механическими и другими связями, на чертежах изображают в виде электрических, гидравлических, пневматических и кинематических схем.

Схема обеспечивает концентрированное и достаточно полное представление о составе элементов и связях в любом устройстве (системе).

Согласно единой системе конструкторской документации (ЕСКД) электрические схемы подразделяются на структурные, функциональные, принципиальные (полные), схемы соединений (монтажные), подключения, общие, расположения и объединенные.

*Структурная* схема служит для определения функциональных частей устройства, их назначения и взаимосвязей.

*Функциональная* схема предназначена для разъяснения процессов, протекающих в отдельных функциональных цепях или устройстве в целом.

*Принципиальная* схема, показывающая полный состав элементов устройства в целом и все связи между ними, дает основное представление о принципе работы данного устройства.

*Монтажная* схема иллюстрирует соединение основных частей устройства с помощью проводов, кабелей, трубопроводов.

*Схема подключения* показывает внешние подключения устройства.

*Общая* схема служит для определения составных частей системы и их соединения на месте эксплуатации.

*Объединенная* схема включает в себя несколько схем разного типа и служит для более ясного раскрытия содержания и связей элементов системы.

Приведем основные правила выполнения схем, изложенные в действующих стандартах ЕСКД.

Функциональные части и элементы системы или устройства на структурных и функциональных схемах изображают в виде прямоугольников или специальных графических обозначений, соеди-

ненных линиями взаимосвязи. На линиях связи стрелками обозначают направления прохождения информационных потоков, а внутри прямоугольников указывают наименования соответствующих функциональных частей и элементов. На функциональных схемах допускается раскрывать функциональные части частично или для большей информативности полностью до отдельных элементов, изображенных в виде условных графических обозначений.

На принципиальных схемах указывают все электрические элементы в виде условных графических обозначений, рядом с которыми (сверху или справа) проставляют условные буквенно-цифровые обозначения. Принципиальные схемы являются более полными. Они отображают все элементы системы в целом или ее функциональных частей и их связи.

Все условные графические обозначения элементов, входящих в одну цепь, вычерчиваются на схемах последовательно одно за другим на одном уровне, а отдельные цепи — одна под другой или параллельно друг другу.

Коммутирующие и другие устройства изображают на схемах в отключенном состоянии, т. е. при отсутствии тока во всех цепях и внешних принудительных сил, воздействующих на подвижные контакты.

Схемы соединений и подключений используют при эксплуатации, монтаже и ремонте систем управления. По ним определяют провода, контактные проводники, жгуты, шины и кабели, которыми выполняются сами соединения и подключения, а также места их пайки, соединений и подключений с указанием соответствующих адресов.

Схема расположения составных частей системы управления выполняется в контуре очертания технологической установки. На схеме изображают все составные части системы управления, включая шкафы, панели, приборы и пульты управления, а также показывают расположение токопроводов, жгутов и кабелей, которыми их соединяют. Нередко такие схемы называют функционально-технологическими.

Каждый функциональный элемент в системе выполняет элементарную функцию, которая заключается в получении, преобразовании и передаче информации в виде сигналов определенной физической природы. В системах автоматики и телемеханики функциональные элементы являются звеньями однонаправленного действия, т. е. передающими сигнал в одном направлении — с входа на выход.

Назначение основных функциональных элементов автоматики рассмотрим на примере одномерной схемы комбинированного управления температурой воздуха в помещении (рис. 2.2).

На этой схеме объект управления (ОУ) — помещение, оборудованное калорифером. Для управления объектом предусмотрен

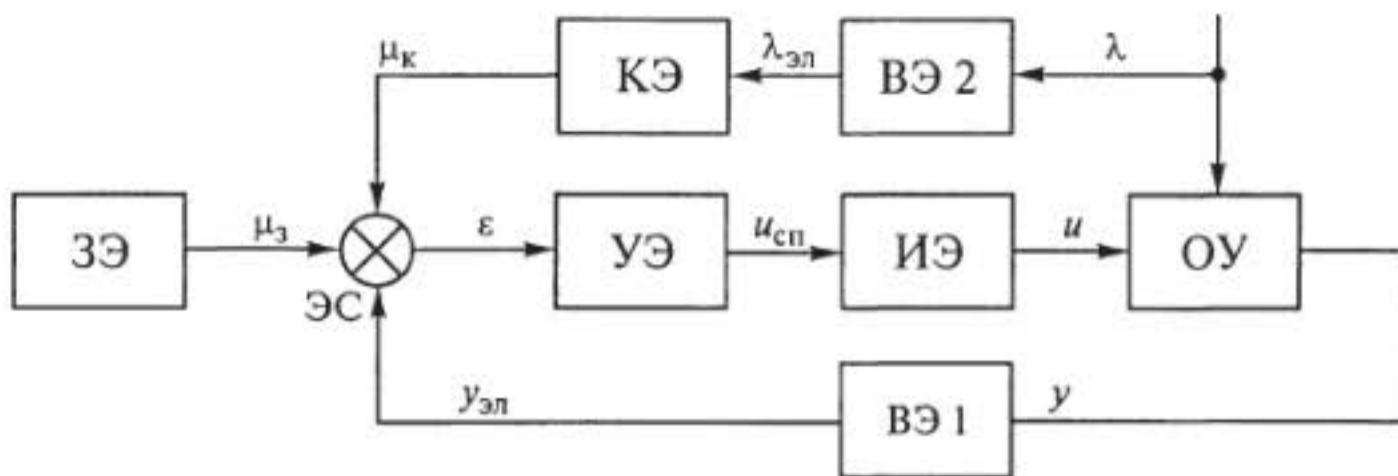


Рис. 2.2. Схема управления температурой воздуха в помещении

исполнительный элемент (ИЭ), содержащий исполнительный механизм (сервопривод) и регулирующий орган (клапан). От положения золотника и клапана, перемещаемого сервоприводом, зависит расход теплоносителя через калорифер, а следовательно, температура  $y$  воздуха в помещении. Сигнал управления сервоприводом  $u_{сп}$  формируется управляющим элементом (УЭ) согласно заложенному в нем алгоритму по выходному сигналу элемента сравнения (ЭС):

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2,$$

причем  $\varepsilon_1 = \mu_3 - y_{эл}$ ;

$$\varepsilon_2 = -\mu_k = -\theta_d(d\lambda_{эл}/dt),$$

где  $\mu_3$  — формируемый задающим элементом (ЗЭ) электрический сигнал, соответствующий требуемому значению температуры воздуха в помещении;  $y_{эл}$  — формируемый первым воспринимающим элементом (ВЭ1) электрический сигнал, соответствующий реальной температуре  $y$  воздуха в помещении;  $\mu_k$  — выходной сигнал корректирующего элемента (КЭ);  $\theta_d$  — положительная величина, представляющая собой постоянную времени дифференциатора, т.е. корректирующего элемента;  $\lambda_{эл}$  — формируемый вторым воспринимающим элементом (ВЭ2) электрический сигнал, соответствующий температуре  $\lambda$  наружного воздуха.

В рассматриваемой системе КЭ — реальное дифференцирующее звено (приблизительно выполняющее операцию дифференцирования электрического сигнала  $\lambda_{эл}$  по времени  $t$ ), т.е. выходной сигнал  $\mu_k$  корректирующего элемента исчезает с исчезновением изменения температуры наружного воздуха  $\lambda$ . В противном случае сигнал КЭ может содержать постоянную составляющую, определяемую установившимся значением температуры  $\lambda$  и воспринимаемую ЭС как сигнал ЗЭ. Другими словами, недопустимо наличие постоянной составляющей в выходном сигнале КЭ, так как эта составляющая формирует алгебраическое слагаемое сигнала



задания системе управления. Однако сигнал задания  $\mu$ , системе управления должен формироваться оператором только с помощью ЗЭ.

Наличие постоянной составляющей в выходном сигнале КЭ может быть допустимым, если этот сигнал поступает непосредственно на вход ИЭ. В этом случае КЭ должен содержать необходимый усилитель мощности, приводящий ИЭ в действие, т.е. должен являться управляющим элементом.

Аналогично строятся схемы для других систем управления.

Из рассмотренного примера видно, что каждый элемент в системе управления выполняет вполне определенную функцию.

По выполняемым функциям основные элементы автоматики делятся на датчики, усилители, стабилизаторы, реле, распределители, двигатели, генераторы импульсов, логические элементы, выпрямители и т.д.

По роду физических процессов, используемых в основе устройств, элементы автоматики делятся на электрические, ферромагнитные, электротепловые, электромашинные, радиоактивные, электронные, ионные и др.

Рассмотрим некоторые основные элементы, наиболее часто применяемые в автоматике, классифицируя их по выполняемым функциям.

*Датчик* (измерительный элемент, электрический преобразователь, чувствительный элемент) — устройство, предназначенное для преобразования информации, поступающей на его вход в виде некоторой физической величины, на выходе в другую физическую величину, более удобную для воздействия на последующие элементы.

Большинство датчиков преобразуют неэлектрическую контролируемую величину  $x$  в электрическую (например, температуру — в ЭДС с помощью термопары; механическое перемещение, связанное с изменением положения якоря электромагнита, — в индуктивность его обмотки и т.д.).

Основной характеристикой датчика является зависимость выходной величины  $y$  от входной  $x$ , т.е.  $y = f(x)$ .

На рис. 2.3 изображены некоторые распространенные виды основной характеристики датчиков. Как видно из рисунка, функциональная связь может подчиняться любой закономерности, но желательно, чтобы характеристика датчика была линейной.

В зависимости от принципа производимого преобразования различают два вида датчиков:

*параметрические* (или *пассивные*), в которых изменение контролируемой величины  $x$  сопровождается соответствующим изменением сопротивления (активного, индуктивного и емкостного), а наличие постороннего источника дополнительной энергии  $z$  (см. рис. 2.1, б) является обязательным условием;

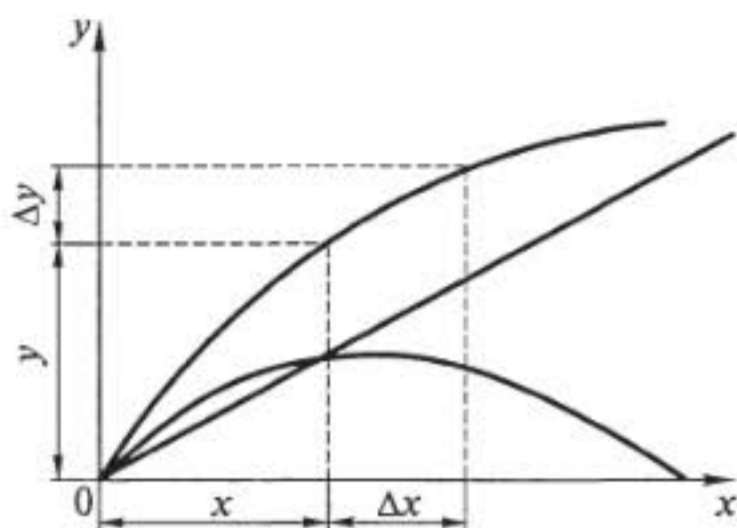


Рис. 2.3. Виды основной характеристики датчиков

генераторные (или активные), в которых изменение контролируемой величины  $x$  сопровождается соответствующим изменением ЭДС на выходе (возникающем, например, вследствие термо-, пьезо-, фотоэффекта и других явлений, вызывающих появление электрических зарядов). Эти датчики выполняются по схеме, приведенной на рис. 2.1, а, т. е. они не требуют наличия источника дополнительной энергии  $z$ , так как выходная энергия элемента полностью берется с входа  $x$  (следовательно, мощность их выходного сигнала всегда меньше мощности входного сигнала).

В зависимости от вида контролируемой неэлектрической величины различают датчики механические, тепловые, оптические и др.

Часто применяются электрические датчики с промежуточным преобразователем, т. е. механический датчик объединяют с электрическим. Преобразование контролируемой величины в таких датчиках происходит по схеме: измеряемая величина — механическое перемещение — электрическая величина. Элемент, преобразующий измеряемую величину в перемещение, называется первичным преобразователем или первичным измерителем (ПИ).

Например, давление преобразуется ПИ в перемещение стрелки манометра, которое затем преобразуется в изменение активного сопротивления (это проволочный, резисторный датчики и др.).

*Усилитель* — элемент автоматики, осуществляющий количественное преобразование (чаще всего усиление) поступающей на вход физической величины (тока, мощности, напряжения, давления и т. п.). Усилитель обязательно должен иметь дополнительный источник энергии  $z$  (см. рис. 2.1, б). Основной характеристикой усилителя является зависимость  $y = f(x)$ ; при этом обычно стремятся к получению линейной или близкой к линейной характеристике на рабочем участке. Величины на входе и выходе усилителя имеют одинаковую физическую природу. На рис. 2.4 изображены различные виды характеристики усилителей.

По принципу действия усилители разделяются на электронные, магнитные, электромашинные, диэлектрические, тиратронные, пневматические и гидравлические.

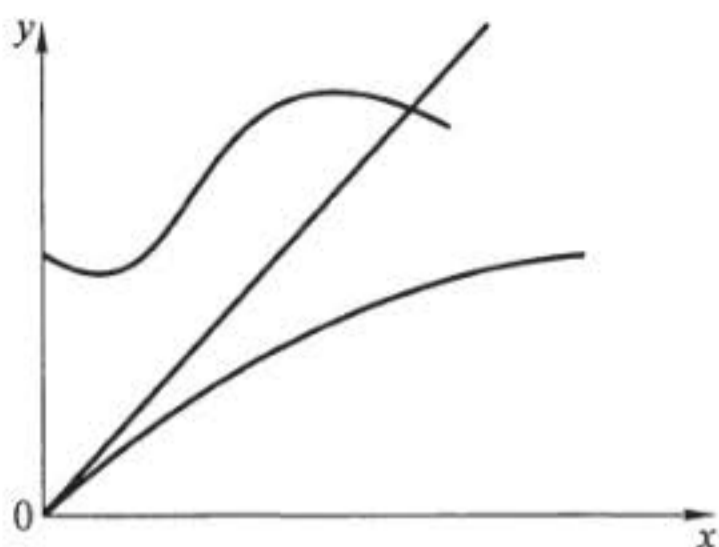


Рис. 2.4. Виды основной характеристики усилителей

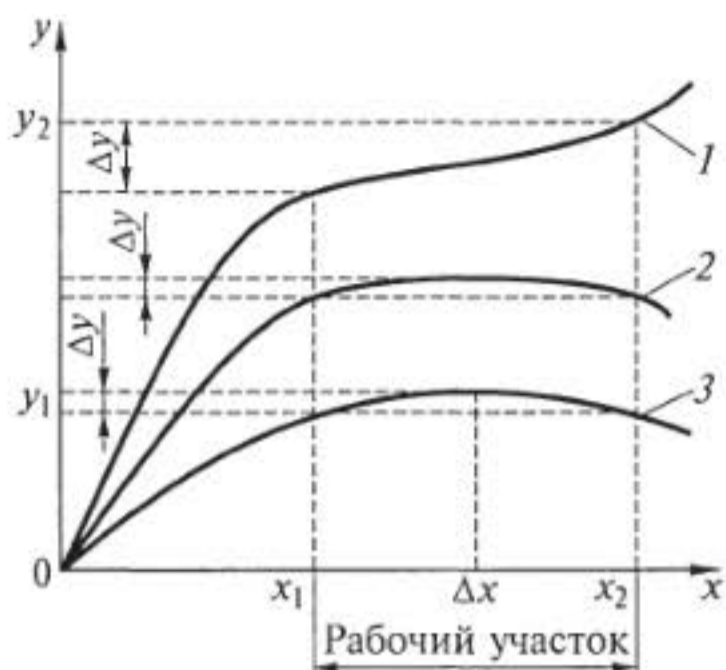


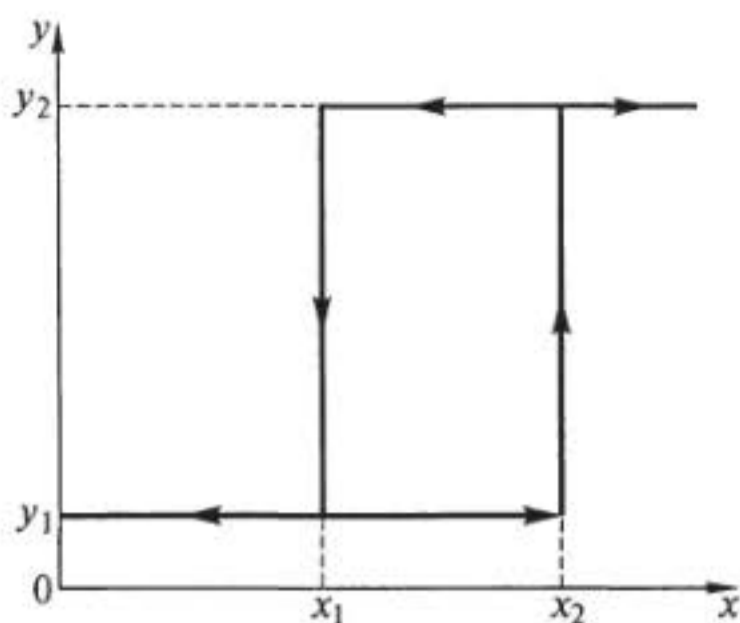
Рис. 2.5. Виды (1... 3) основной характеристики стабилизаторов

*Стабилизатор* — элемент автоматики, обеспечивающий постоянство выходной величины  $y$  при колебаниях входной величины  $x$  в определенных пределах. Эффект стабилизации достигается за счет изменения параметров элементов, входящих в схему стабилизатора; при этом вид энергии на его входе и выходе должен быть один и тот же. Характеристики стабилизаторов показаны на рис. 2.5. Здесь характеристика 1 обеспечивает стабилизацию выходной величины  $y$  хуже, чем характеристика 2. В случае если характеристика не имеет в заданном диапазоне горизонтального участка, а имеет максимум (кривая 3) или минимум, то стабильность выходной величины будет выше, чем в случае, характеризуемом кривой 1.

В зависимости от вида стабилизируемой величины различают стабилизаторы напряжения и тока, обеспечивающие постоянство напряжения или тока в нагрузке при колебаниях входного напряжения и сопротивления нагрузки.

*Реле* — элемент автоматики, в котором при достижении входной величиной  $x$  определенного значения выходная величина  $y$  изменяется скачком. Зависимость  $y = f(x)$  реле неоднозначна и имеет форму петли (рис. 2.6). При изменении входной мощности от 0 до  $x_2$  выходная величина  $y$  изменяется незначительно (или остается постоянной и равной  $y_1$ ). При достижении входной величиной  $x$  значения  $x_2$ , т. е. при  $x = x_2$ , выходная величина изменяется скачком от значения  $y_1$  до  $y_2$ . Впоследствии при увеличении  $x$  выходная величина изменяется незначительно или остается постоянной (имеет установившееся значение). Пока входная величина уменьшается до значения  $x_1$ , выходная величина остается также неизменной и почти равной  $y_2$ . В момент, когда величина  $x$  становится равной  $x_1$ , выходная величина скачком уменьшается до значения  $y_1$  и затем сохраняется приблизительно неизменной при уменьшении  $x$  до нуля.

Рис. 2.6. Основная характеристика реле



Скачкообразное изменение выходной величины  $y$  в момент, когда  $x = x_2$ , называется величиной срабатывания (например, это ток срабатывания или напряжение срабатывания для электрических реле). Скачкообразное изменение выходной величины  $y$  в момент, когда  $x = x_1$ , называется величиной отпускания (например, это ток отпускания, напряжение отпускания). Отношение величины  $x_1$  к величине срабатывания  $x_2$  называется коэффициентом возврата:  $K_v = x_1/x_2$ . Так как обычно  $x_1 < x_2$ , то  $K_v < 1$ .

Существуют различные типы реле, но основными являются электромеханические (электромагнитные, магнитоэлектрические, электродинамические и др.), в которых изменение выходной электрической величины вызывает замыкание или размыкание контактов.

Бывают бесконтактные магнитные реле и бесконтактные реле электронного типа.

*Распределитель (шаговый искатель)* — элемент автоматики, осуществляющий поочередное подключение одной величины к ряду других цепей. При этом подключаемые цепи обычно электрические.

Распределители используются при необходимости управления несколькими объектами от одного и того же управляющего органа и по способу передачи импульсов в управляемые цепи делятся на электромеханические (контактные), электронные и ионные (бесконтактные).

*Исполнительные устройства* — это электромагниты с втяжным и поворотным якорями, электромагнитные муфты, а также электродвигатели, которые относятся к электромеханическим исполнительным элементам автоматических устройств.

Электромагниты преобразуют электрический сигнал в механическое движение; их применяют для перемещения рабочих органов, например клапанов, вентилях, золотников и т. п.

Электромагнитные муфты используются в электроприводах и устройствах управления для быстрого включения и выключения

приводимого механизма, а также для его реверса, т.е. изменения направления движения управляемого устройства.

В некоторых случаях электромагнитные муфты применяют для регулирования скорости и ограничения передаваемого момента.

Электродвигатель — это устройство, обеспечивающее преобразование электрической энергии в механическую и преодолевающее при этом значительное механическое сопротивление со стороны перемещаемых устройств.

Одним из главных требований, предъявляемых к электродвигателям, является их способность развивать требуемую механическую мощность. Кроме того, электродвигатель должен обеспечивать реверс, а также движение объекта с заданными скоростями и ускорениями.

Наиболее широко в качестве электромеханических исполнительных элементов применяют электродвигатели постоянного и переменного тока.

## 2.2. Классификация элементов автоматики

Любая самая сложная автоматическая система управления состоит из определенного комплекса элементов. Многообразие автоматических систем порождает многообразие элементов, что, в свою очередь, приводит к необходимости их классификации. Нередко признаки классификации выбираются произвольно, и в этом случае она не достигает своей цели и даже дезориентирует при выборе требуемого элемента, т.е. большое значение имеют выявление и обоснование признаков, которые должны быть положены в основу классификации. При этом наиболее важны последовательность расположения, выделение главных и вспомогательных признаков, т.е. разработка соответствующей иерархической структуры.

Этим вопросам пока еще не уделяется достаточного внимания, вероятно, из-за некоторой неопределенности представления о многих элементах, но именно эти разработки могут помочь провести научную классификацию элементов и способствовать тем самым укреплению основ теории элементов автоматики.

В основу классификационной схемы могут быть положены *функциональные признаки*. В этом случае различают следующие классы элементов (рис. 2.7): информации, сравнения, распределения, усиления, вычисления, памяти, логики, исполнения и вспомогательные.

Известная доля неопределенности заключена в классе вспомогательных элементов, из которых в будущем должны быть сформированы классы элементов с более конкретными функциональными признаками.



Рис. 2.7. Классификация элементов автоматики по функциональным признакам

Предлагаемый набор классов элементов позволяет собрать любую автоматическую систему измерения, контроля, регулирования и управления. При этом каждый класс элементов в зависимости от выбранных основных и вспомогательных признаков, в свою очередь, может подразделяться на подклассы, группы, подгруппы, виды, подвиды и т.д.

Элементы автоматики могут быть построены на различной физической и конструктивной основе, поэтому основными их признаками являются *функциональная зависимость* и *принцип формирования элемента*. Для дальнейшего подразделения могут быть приняты такие признаки, как состояние вещества, из которого состоит элемент (твердое, жидкое, газообразное), и характер измеряемой величины (или состояния), т.е. механическая, акустическая, тепловая, электрическая, магнитная, химическая и др. Каждому характеру измеряемой величины соответствует множество конкретных измеряемых величин и состояний (табл. 2.1).

Любые величины и состояния могут быть реализованы двумя путями. Первый путь связан с физическими принципами формирования элемента, второй — с конструктивными. Кроме того, важно знать в качестве признака характер выходного параметра элемента: механический, акустический, тепловой, оптический, электрический, магнитный, радиоактивный. На рис. 2.8 приведены основные классификационные признаки элементов автоматики.

Любой элемент может иметь характер преобразования — электрический, пневматический, гидравлический или механический. Таким образом, у элементов сравнения основными классификационными признаками являются характер действия (элек-

Виды измеряемых элементами автоматики величин и состояний

Характер измеряемой величины	Измеряемая величина	Измеряемое состояние
Механическая	Перемещение (длина, ширина, высота, толщина, уровень), положение, скорость, ускорение, время, объем, количество, расход, давление, работа, мощность, момент и т. д.	Плотность, удельный вес, пористость, проницаемость, капиллярность, поверхностное натяжение, диффузионный потенциал, консистентность, вязкость, пластичность, текучесть, упругость, твердость, точность и т. д.
Акустическая	Давление и скорость звука, частота, фаза и длина волны, сопротивление, энергия, работа звука	Удельное сопротивление, поглощение звука, отражение, скорость звука в веществе
Тепловая	Температура, тепловой поток, тепловая проводимость, количество теплоты, параметр сгорания, зажигания и т. д.	Теплопроводность, теплопроводная способность, удельная теплоемкость, тепловое расширение, плавление, кипение, усадка и т. д.
Оптическая	Яркость, освещенность, световой поток, частота волны света, энергия и т. д.	Поглощение света, отражение, поляризация, люминесценция, интерференция и т. д.
Электрическая	Ток, напряжение, напряженность поля, частота тока, мощность, спектр тока и т. д.	Электропроводность, диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность, электрострикция и т. д.
Магнитная	Намагничивающая сила, напряженность магнитного поля, магнитный поток, магнитное сопротивление, магнитная индуктивность, взаимоиндуктивность и т. д.	Магнитные восприимчивость и проницаемость, магнитная индукция, магнитострикция и т. д.
Радиоактивная	Поток радиации, интенсивность радиации, энергия радиации и т. д.	Поглощение, трансформация излучения и т. д.

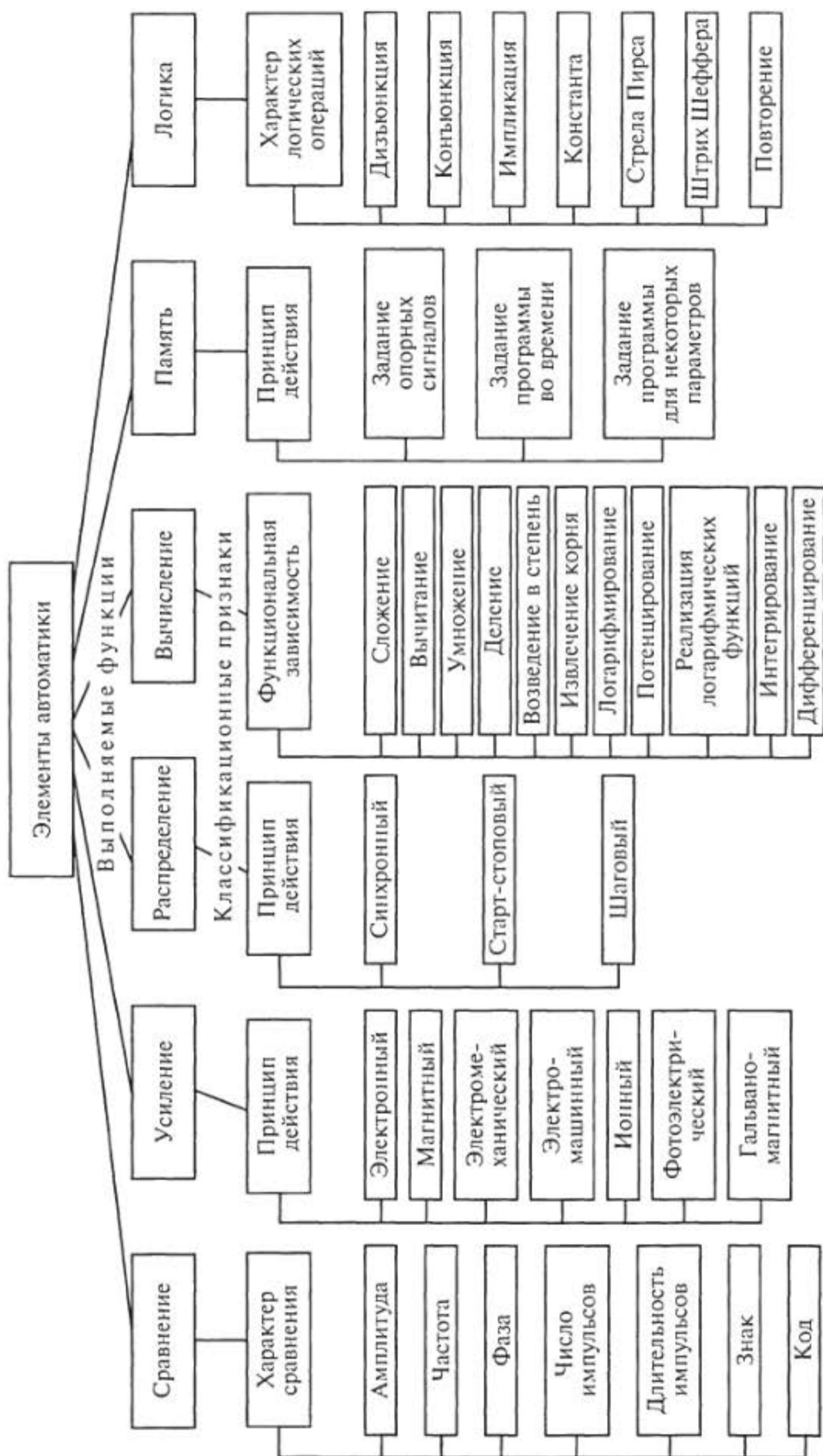


Рис. 2.8. Классификационные признаки элементов автоматики



трический, пневматический, гидравлический) и характер сравнения (амплитуда сигнала, частота, фаза, продолжительность, знак, число импульсов, код).

В свою очередь, каждая величина (амплитуда, частота и т. д.) имеет свою разветвленную классификационную схему.

Основными признаками элементов распределения могут быть также характер действия (электрический, пневматический, гидравлический) и принцип действия, лежащий в основе их классификации. Такой признак, как характер действия, относится почти ко всем элементам и в дальнейшем, если не будет особо оговорено, его следует рассматривать как признак каждого элемента.

В схеме на рис. 2.8 перечисляются только основные классификационные признаки ряда элементов, т. е. она не является полной и может уточняться и развиваться.

К примеру, элементы усиления разделяют прежде всего по выполняемым функциям: усилители тока, напряжения, мощности как постоянного, так и переменного тока. В то же время в зависимости от принципа действия различают следующие электрические усилители: электронные, магнитные, ионные, электромашинные, электромеханические, фотоэлектрические, гальваномагнитные и на основе использования различных нелинейностей. В свою очередь, усилители любого принципа действия имеют также разветвленную схему классификации.

Для элементов вычисления главным признаком является функциональная зависимость, т. е. то математическое действие, для которого они предназначены — сложение, вычитание, умножение, деление, возведение в степень, извлечение корня, логарифмирование, потенцирование, реализация тригонометрических функций, дифференцирование по времени и параметру, интегрирование по времени и параметру.

Элементы памяти классифицируются как по выполняемым функциям, так и по принципу их действия. Это прежде всего элементы для задания опорных сигналов, программы, различных временных функций и других параметров.

Элементами исполнения могут быть всевозможные простейшие и сложные устройства, классифицировать которые можно по принципу действия, имея в виду также и разделение их в зависимости от характера действия.

К классу вспомогательных можно отнести элементы, не получившие еще окончательного конструктивного оформления.

Вопросы классификации при формировании научного направления и массовой автоматизации имеют большое значение, поэтому важна дальнейшая разработка признаков разделения элементов и группирования их с одновременным решением вопросов определения особенностей расчета и исследования каждой группы.

Еще большее значение имеет унификация разрабатываемых классификационных схем, поскольку это позволяет достичь определенного их совершенства.

### 2.3. Общие характеристики элементов автоматики

Каждый из элементов характеризуется какими-либо свойствами, которые определяются характеристиками. Некоторые из этих характеристик являются общими для большинства элементов.

Главной общей характеристикой элементов является *коэффициент преобразования* (или *коэффициент передачи*), представляющий собой отношение выходной величины элемента  $y$  к входной величине  $x$ , или отношение приращения выходной величины  $\Delta y$  (или  $dy$ ) к приращению входной величины  $\Delta x$  (или  $dx$ ). В первом случае  $K = y/x$  называется *статическим коэффициентом преобразования*, а во втором случае  $K' = \Delta y/\Delta x \approx dy/dx$  при  $\Delta x \rightarrow 0$  — *динамическим коэффициентом преобразования*.

Связь между значениями  $x$  и  $y$  определяется функциональной зависимостью (см. рис. 2.3 ... 2.6). Значения коэффициентов  $K$  и  $K'$  зависят от формы характеристики элемента или вида функции  $y = f(x)$ , а также от того, при каких значениях величин они подсчитываются. В большинстве случаев выходная величина изменяется пропорционально входной, и коэффициенты преобразования равны между собой, т. е.  $K = K' = \text{const}$ .

Статический и динамический коэффициенты преобразования характеризуются величинами, имеющими размерность. Например, если размерность входной величины  $^{\circ}\text{C}$ , а выходной  $a$ , то размерность коэффициента преобразования будет  $a/^{\circ}\text{C}$ . Коэффициенты  $K$  и  $K'$  могут быть также выражены в относительных (безразмерных) величинах.

Безразмерным является *относительный коэффициент преобразования*, представляющий собой отношение относительного приращения выходной величины  $\Delta y/y$  к относительному приращению входной величины  $\Delta x/x$ :

$$\eta_{\Delta} = \frac{\Delta y/y}{\Delta x/x} = \frac{\Delta y/\Delta x}{y/x}$$

При  $\Delta x \rightarrow 0$

$$\eta_{\Delta} = \frac{dy/y}{dx/x} = \frac{dy/dx}{y/x} = K' \frac{1}{K}$$

Например, если изменение входной величины на 2 % вызывает изменение выходной величины на 3 %, то относительный коэффи-

циент преобразования  $\eta_{\Delta} = 3/2 = 1,5$ . Из последней формулы видно, что относительный коэффициент преобразования равен отношению динамического коэффициента преобразования к статическому. Следовательно, относительный коэффициент преобразования  $\eta_{\Delta}$  размерности не имеет. Для преобразователя с пропорциональной характеристикой  $\eta_{\Delta} = \eta = 1$ .

Применительно к различным элементам автоматики коэффициенты преобразования  $K'$ ,  $K$ ,  $\eta_{\Delta}$  и  $\eta$  имеют определенный физический смысл и свое название. Например, применительно к датчику коэффициент преобразования называется чувствительностью (статической, динамической, относительной), которая должна быть как можно больше. Для усилителей коэффициент преобразования принято называть коэффициентом усиления и желательно также, чтобы он был как можно больше. Для большинства усилителей (в том числе и электрических) величины  $x$  и  $y$  являются однородными, поэтому коэффициент усиления представляет собой безразмерную величину.

При работе элемента выходная величина  $y$  может отклоняться от требуемого значения за счет изменения внутренних его свойств (износа, старения материалов и т. п.) или внешних факторов (колебаний напряжения питания, окружающей температуры и др.), при этом происходит и изменение характеристики элемента (кривая  $y'$  на рис. 2.9). Возникающее отклонение называется погрешностью, которая может быть абсолютной или относительной.

*Абсолютной погрешностью (ошибкой)* называется разность между полученным значением выходной величины  $y'$  и ее расчетным (желаемым) значением:

$$\Delta y = y' - y.$$

*Относительной погрешностью* называется отношение абсолютной погрешности  $\Delta y$  к номинальному (расчетному) значению выходной величины  $y$ . В процентах относительная погрешность определяется как

$$\gamma = \frac{\Delta y}{y} 100.$$

В зависимости от причин, вызывающих отклонение, различают температурную, частотную, токовую и другие погрешности.

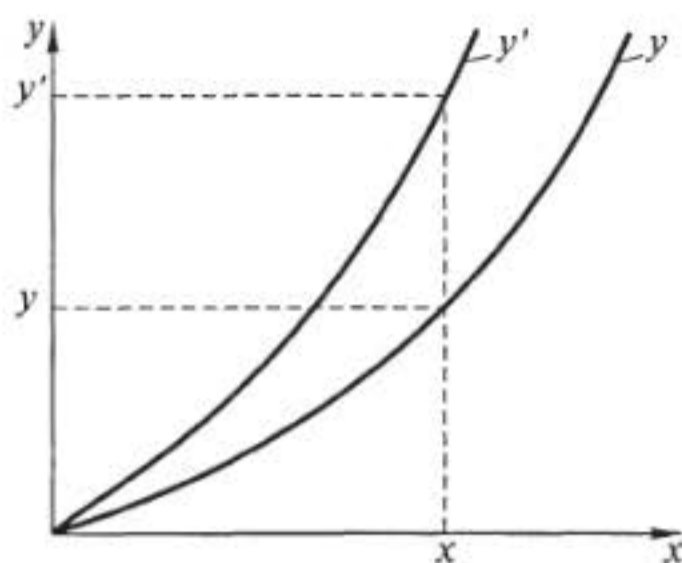


Рис. 2.9. К определению погрешности элемента

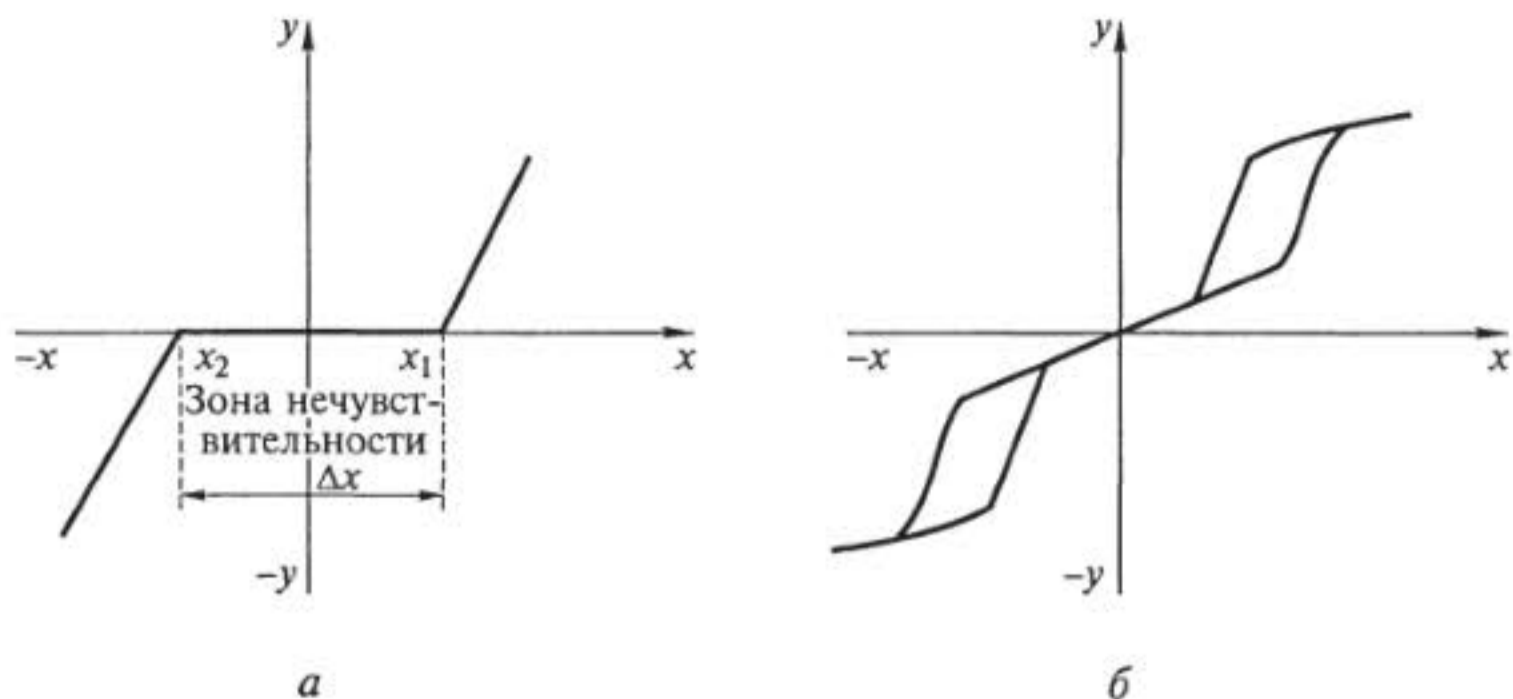


Рис. 2.10. К определению порога чувствительности:

*a* — характеристика элемента с зоной нечувствительности; *б* — характеристика элемента при наличии у него релейных свойств

Иногда пользуются *приведенной погрешностью*, под которой понимается отношение абсолютной погрешности к наибольшему значению выходной величины. В процентах приведенная погрешность

$$\gamma_{\text{прив}} = \frac{\Delta y}{y_{\text{max}}} 100.$$

Если абсолютная погрешность постоянна, то приведенная погрешность также постоянна.

Погрешность, вызванная изменением характеристик элемента со временем, называется *нестабильностью элемента*.

*Порогом чувствительности* называется минимальная величина на входе элемента, которая вызывает изменение выходной величины (т. е. уверенно обнаруживается с помощью данного датчика). Появление порога чувствительности обусловлено как внешними, так и внутренними факторами (трением, люфтами, гистерезисом, внутренними шумами, помехами и др.).

На рис. 2.10, *a* показана характеристика элемента при наличии «мертвого» хода. Из характеристики видно, что когда входная величина  $x$  изменяется в пределах от  $x_1$  до  $x_2$ , то выходная величина  $y$  не изменяется и равна нулю. Значения  $x_1$  и  $x_2$  называются порогами чувствительности, а расстояние между  $x_1$  и  $x_2$ , равное  $\Delta x$ , — зоной нечувствительности. При наличии релейных свойств у элемента характеристика может приобретать реверсивный характер (рис. 2.10, *б*). В этом случае она также обладает порогом чувствительности и зоной нечувствительности.

## 2.4. Динамический режим работы элементов

*Динамическим режимом* называется процесс перехода элементов и систем из одного установившегося состояния в другое, т. е. такое условие их работы, когда входная величина  $x$ , а следовательно, и выходная величина  $y$  изменяются во времени. Элементы автоматики и телемеханики могут обладать инерционностью. В этом случае наблюдается запаздывание изменения  $y$  по отношению к изменению  $x$ . При отсутствии инерционности процесс изменения  $x$  и  $y$  может характеризоваться графиком, приведенным на рис. 2.11, *а*. При наличии инерционности и скачкообразном изменении входной величины от 0 до  $x_0$  выходная величина  $y$  достигает установившегося значения  $y_{уст}$  (рис. 2.11, *б, в*) не сразу, а по истечении промежутка времени, в течение которого происходит переходный процесс. При этом переходный процесс может быть аperiodическим (неколебательным) затухающим (см. рис. 2.11, *б*) или колебательным затухающим (см. рис. 2.11, *в*).

Время установления  $t_{уст}$ , в течение которого выходная величина  $y$  достигает установившегося значения, зависит от инерционности элемента. В простейшем случае установление величины  $y$  происходит по показательному закону:

$$y = y_0 (1 - e^{-t/T_0}),$$

где  $T_0$  — постоянная времени элемента, зависящая от параметров, связанных с его инерционностью.

Установление выходной величины  $y$  тем продолжительнее, чем больше  $T$ . Время установления  $t_{уст}$  выбирается в зависимости от необходимой точности измерения датчика и составляет обычно  $(3 \dots 5)T$ , что дает ошибку измерения в динамическом режиме его работы не более  $5 \dots 1\%$ . Степень приближения  $\Delta y$  (см. рис. 2.11, *б, в*)

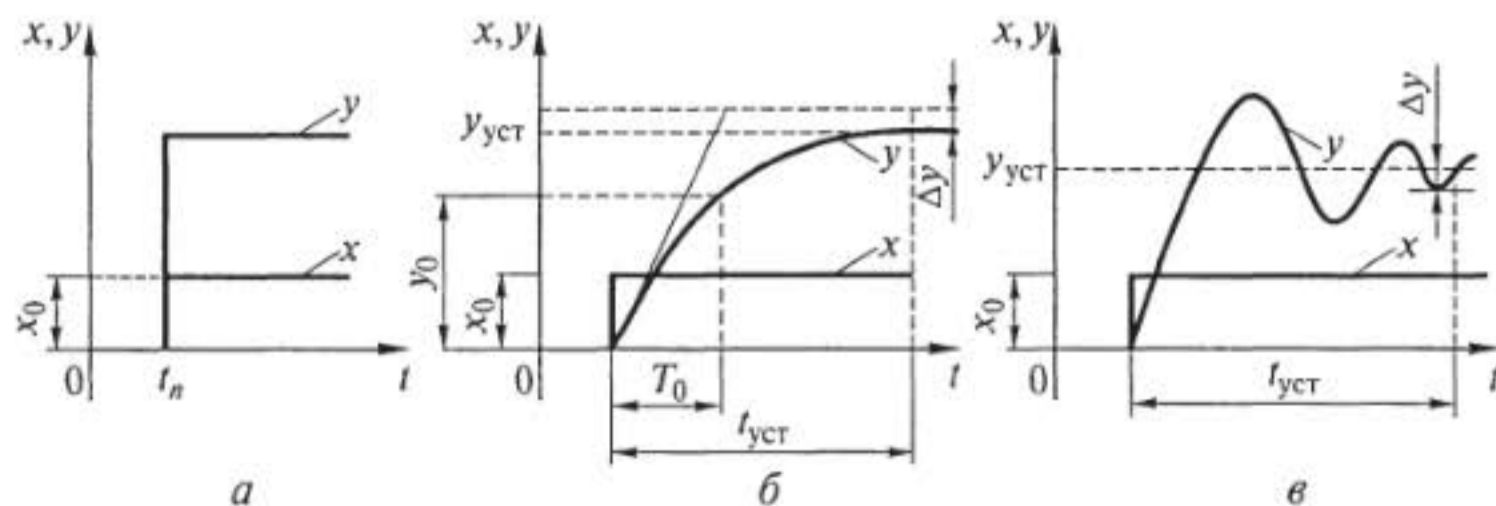


Рис. 2.11. Переходные процессы в элементе при скачкообразном изменении входной величины:

*а* — при отсутствии инерционности; *б, в* — при наличии инерционности

обычно оговаривается и в большинстве случаев составляет от 1 ... 2 до 5 ... 10 % от установившегося значения.

Разность между значениями выходной величины в динамическом и статическом режимах называется ее *динамической погрешностью*. Желательно, чтобы она была как можно меньше.

В электромеханических и электромашинных элементах инерционность в основном определяется механической инерцией движущихся и вращающихся частей. В электрических элементах инерционность определяется электромагнитной индукцией или другими подобными факторами. Инерционность может быть причиной нарушения устойчивой работы элемента или системы в целом.

### Контрольные вопросы

1. Что называется элементом системы автоматического управления?
2. Из каких типовых элементов состоит система автоматического управления?
3. Чем отличаются генераторные датчики от параметрических?
4. Какие функции выполняют различные элементы САУ?
5. Какие классификационные признаки являются наиболее важными для различных типов элементов?
6. Что такое статический и динамический коэффициенты преобразования?
7. Что называется абсолютной и относительной погрешностью элемента?
8. Что такое порог чувствительности и зона нечувствительности элемента?
9. Какие виды переходных процессов характеризуют динамический режим работы элементов?
10. Что такое время установления и постоянная времени элемента?

## Глава 3

# КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

### 3.1. Общие сведения о преобразователях

Ни одна система управления не может работать без информации о состоянии объекта управления и его реакции на управляющие воздействия. Элементами систем, обеспечивающими получение такой информации, являются *измерительные преобразователи*. Специалисты по автоматике также используют термины *первичный преобразователь* и *датчик*. Далее термин «первичный преобразователь» будем использовать при описании принципа действия того или иного измерительного устройства, а термин «датчик» — при описании его конструктивного исполнения.

Автоматизация производственных процессов, научных экспериментов и исследований требует все большего объема измерений различных физических величин. Об их числе можно судить по системе СИ, которая включает в себя более 120 физических единиц измерения. В настоящее время в промышленности существует примерно следующее распределение средств измерений: температуры — 50 %, расхода (объемного и массового) — 15 %, давления — 10 %, уровня — 5 %, количества (массы, объема) — 5 %, времени — 4 %, электрических и магнитных величин — 5 %. Объем выполняемых измерений может быть очень большим.

Число типов измерительных преобразователей значительно превосходит число измеряемых величин, так как одну и ту же физическую величину можно измерять различными методами и датчиками разных конструкций.

Для большинства измерительных преобразователей (ИП) характерно измерение электрическими методами не только электрических и магнитных, но и других физических величин. При этом используется предварительное преобразование неэлектрических величин в электрические. Это обусловлено следующими достоинствами электрических измерений: электрические сигналы можно просто и быстро передавать на большие расстояния, а также легко, быстро и точно преобразовывать в цифровой код, обеспечивая тем самым высокую точность и чувствительность ИП.

Необходимо отметить, что не всегда измерительный преобразователь выполняет непосредственно функции измерения. В ряде

случаев ИП можно использовать в качестве преобразователя одной физической величины в другую (чаще всего из неэлектрической в электрическую). Например, при измерении уровня поплавков в емкости может быть рычажно связан с реостатным преобразователем, включенным в электрическую цепь. В этом случае изменение уровня, измеряемое перемещением поплавка, будет преобразовываться в изменение электрического сигнала (напряжения, тока).

Наряду с широким развитием электрических методов и средств измерений и управления разрабатываются и производятся средства автоматизации на основе других источников энергии — пневматические и гидравлические. Например, применение пневматических средств автоматизации целесообразно в опасных условиях эксплуатации (например, в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой промышленности), при недостаточном уровне квалификации обслуживающего персонала (так как пневматика проще в обслуживании, чем электроника), в целях снижения стоимости систем автоматизации.

Для эффективного функционирования ИП должны отвечать ряду требований, основными из которых являются:

- высокая статистическая и динамическая точность работы, обеспечивающая формирование выходного сигнала с минимальными искажениями;

- высокая избирательность — датчик должен реагировать только на изменения той величины, для которой он предназначен;

- стабильность характеристик во времени;

- отсутствие влияния нагрузки в выходной цепи на режим входной цепи;

- высокая надежность при работе в неблагоприятных условиях внешней среды;

- повторяемость характеристик (взаимозаменяемость);

- простота и технологичность конструкции;

- удобство монтажа и обслуживания;

- низкая стоимость.

Необходимую для управления информацию о состоянии объекта и внешних воздействиях получают в виде значений отдельных физических величин с помощью соответствующих технических устройств — измерительных преобразователей.

В отличие от измерительных приборов, где информация, необходимая для управления, представлена в виде, удобном для непосредственного восприятия оператором, информация от ИП поступает в виде определенной физической величины, удобной для передачи и дальнейшего преобразования в системе автоматизации. Эту величину называют *сигналом*, и она однозначно связана с контролируемой физической величиной или параметром того или иного технологического процесса.



ИП могут соединяться, образуя следующие структурные схемы: однократного прямого преобразования; последовательного прямого преобразования; дифференциальную; с обратной связью (компенсационную).

Простейшие ИП состоят из одного преобразователя. В случае последовательного соединения нескольких первичных преобразователей выходная величина предыдущего преобразователя является входной величиной последующего. Последовательное соединение ИП применяют в том случае, когда однократное преобразование не дает удобного для использования выходного сигнала. При дифференциальной схеме устраняется влияние на результат преобразования искажающих внешних факторов благодаря сопоставлению (сравнению) преобразованной и некоторой эталонной величин, одинаково подверженных действию этих факторов. Схема ИП с обратной связью характеризуется высокой точностью, универсальностью и малой зависимостью коэффициента преобразования от внешних возмущений.

ИП бывают с выходным естественным и унифицированным сигналами.

*Естественный* выходной сигнал формируется первичными ИП естественным путем и может представлять собой угол поворота, перемещение, усилие, напряжение (постоянное и переменное), сопротивление (активное и комплексное), электрическую емкость, частоту и др. ИП с естественным выходным сигналом (термопары, терморезисторы, тензодатчики и др.) широко применяют при автоматизации простых объектов.

*Унифицированный* сигнал — это сигнал определенной физической природы, изменяющийся в определенных фиксированных пределах независимо от вида измеряемой величины, метода и диапазона ее измерения. Из унифицированных сигналов наибольшее распространение получили электрические сигналы постоянного и переменного тока, напряжения и частоты, а также пневматические сигналы.

К основным видам аналоговых унифицированных сигналов относят:

электрические сигналы постоянного тока  $0 \dots 20$ ;  $-5 \dots 0 \dots 5$  мА;  
электрические сигналы постоянного напряжения:  $0 \dots 10$ ;  $0 \dots 20$ ;  
 $-10 \dots 0 \dots 10$  мВ и  $0 \dots 1$ ;  $-1 \dots 0 \dots 1$  В;

электрические сигналы переменного напряжения  $0 \dots 2$ ;  $-1 \dots 0 \dots 1$  В;  
электрические сигналы переменного тока с частотой  $4 \dots 8$  и  $2 \dots 4$  кГц;

пневматические сигналы с давлением  $20 \dots 100$  кПа.

Преобразователи, служащие для изменения масштаба сигнала, называют *масштабными*.

Для получения унифицированных аналоговых сигналов применяют ИП, называемые *нормирующими*.

Специфика контролируемой величины существенно влияет на метод преобразования, используемый в первичном ИП.

Преобразователи, предназначенные для передачи сигнала измерительной информации на расстояние, называют *передающими*.

### 3.2. Классификация измерительных преобразователей

В настоящее время существует множество разнообразных по принципу действия и назначению ИП. Непрерывное развитие науки и технологий приводит к появлению все новых преобразователей.

В качестве классификационных признаков ИП можно принять многие характеристики преобразователей: вид функции преобразования, вид входной и выходной величин, принцип действия, конструктивное исполнение и т. д.

По *виду используемой энергии* ИП можно подразделить на электрические, механические, пневматические и гидравлические.

По *соотношению между входной и выходной величинами* различают:

ИП неэлектрических величин в неэлектрические (рычаги, редукторы, мембраны, пружины и др.);

ИП неэлектрических величин в электрические (потенциометры, термопары, емкостные и индуктивные ИП и др.);

ИП электрических величин в электрические;

ИП электрических величин в неэлектрические (измерительные механизмы электроизмерительных приборов).

В зависимости от *вида выходного сигнала* различают ИП аналоговые, дискретные, релейные, с естественным или унифицированным выходным сигналом.

По *виду функции преобразования* ИП подразделяются следующим образом:

масштабные, изменяющие в определенное число раз входную величину без изменения ее физической природы;

функциональные, осуществляющие однозначное функциональное преобразование входной величины с изменением или без изменения ее физической природы;

операционные, выполняющие над входной величиной математические операции высшего порядка (дифференцирование или интегрирование по временному параметру).

По *виду структурной схемы* различают ИП прямого однократного преобразования, последовательного прямого преобразования, дифференциальные, с обратной связью (компенсационной схемой).

По *характеру преобразования входной величины в выходную* ИП подразделяются на параметрические, генераторные, частотные и

фазовые, а по *виду измеряемой физической величины* — на ИП линейных и угловых перемещений, давления, температуры, концентрации вещества и т. д.

По *динамическим характеристикам* ИП подразделяются в соответствии с видом передаточной функции.

В зависимости от *вида статической характеристики* ИП делятся на реверсивные (двухтактные), у которых знак выходного сигнала определяется знаком входного сигнала, и нереверсивные (однотактные), у которых знак выходного сигнала не зависит от знака входного сигнала.

Даже столь развернутая классификация по ряду признаков не является исчерпывающей, так как за каждым определением стоит группа преобразователей с разными техническими конструктивными характеристиками.

### 3.3. Статические и динамические характеристики измерительных преобразователей

*Статическая характеристика* измерительного преобразователя — это функциональная зависимость между входной  $x$  и выходной  $y$  величинами в установившемся режиме. Как и любую функцию, статическую характеристику можно представить аналитически (уравнением), в виде графика или таблично. Обычно в уравнение преобразования входят конструктивные параметры. Для реального преобразователя статическую характеристику можно получить экспериментально. Для более наглядного восприятия очень широко используют графическую форму представления статической характеристики. Наиболее часто используемые статические характеристики ИП представлены на рис. 3.1.

В общем случае статические характеристики ИП не отличаются от аналогичных характеристик обобщенных звеньев систем управления, так как сами входят в их число.

Статическая характеристика может быть *линейной* и *нелинейной* (см. рис. 3.1, *а*, *б*). При этом необходимо отличать нелинейность как требуемую функциональную зависимость (например, экспоненциальную, логарифмическую) от собственно нелинейности как погрешности линейности.

В общем случае уравнение преобразования для линейной статической характеристики имеет вид

$$y = f(x) = \pm B + Kx,$$

где  $B$  — постоянная;  $K$  — коэффициент преобразования.

Если  $B = 0$ , то график уравнения проходит через начало координат и ИП не имеет ни выходного сигнала холостого хода  $y_0$ , ни зоны нечувствительности  $0 \dots x_0$  (см. рис. 3.1, *а*).

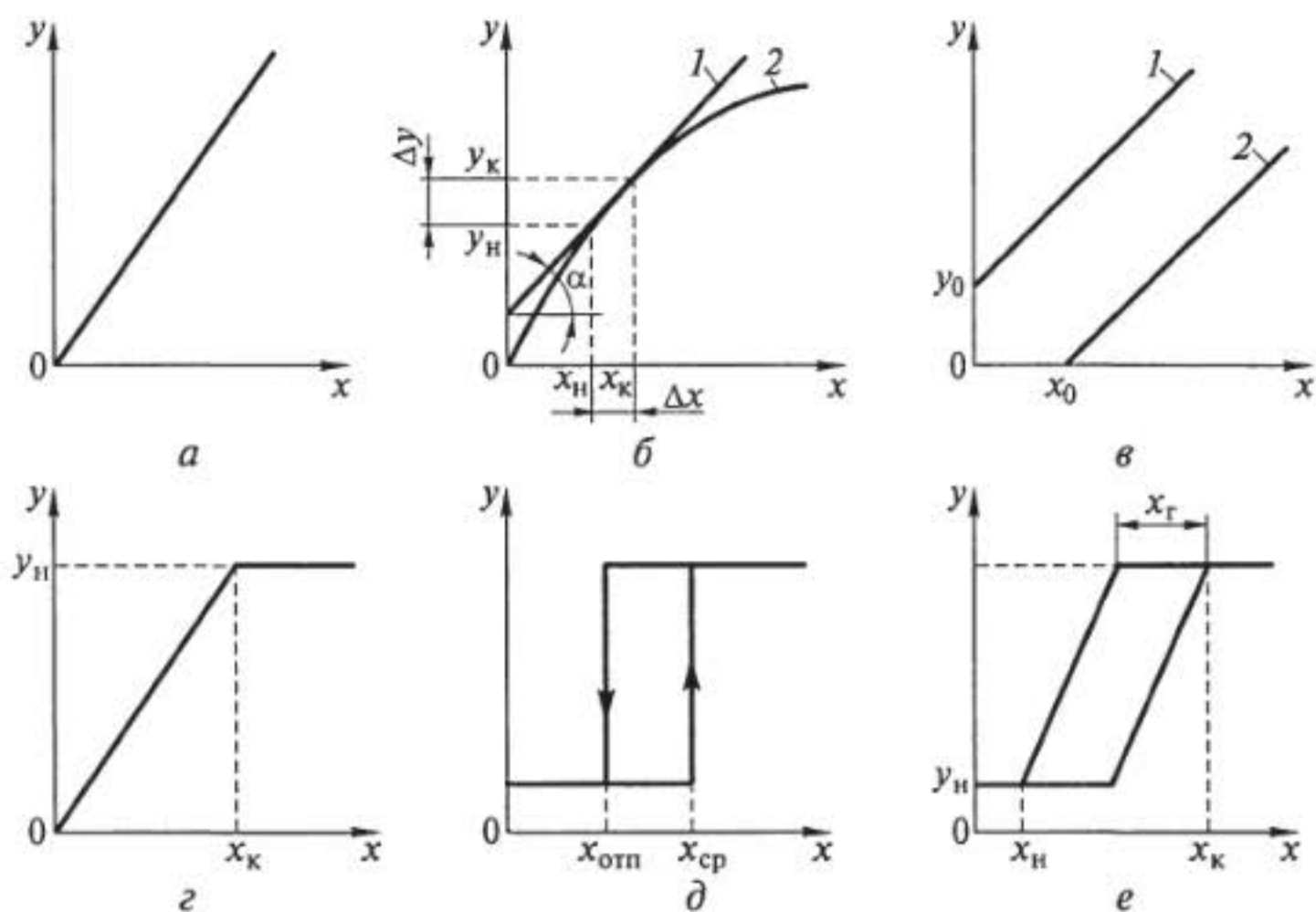


Рис. 3.1. Статические характеристики датчиков:

*a* — линейная; *б* — нелинейная; *в* — с сигналом холостого хода; *г* — с участком насыщения; *д* — релейного характера; *е* — с петлей гистерезиса

При  $B > 0$  характеристика смещена относительно начала координат по оси абсцисс на величину выходного сигнала холостого хода  $y_0 = B$  (см. рис. 3.1, *в*, прямая 1).

При  $B < 0$  характеристика имеет зону нечувствительности  $0 \dots x_0$ , в пределах которой при изменении входной величины  $x$  выходная величина  $y = 0$  (см. рис. 3.1, *в*, прямая 2).

Статическая характеристика может иметь участок насыщения (см. рис. 3.1, *г*), в этом случае она описывается двумя уравнениями: на участке  $0 \dots x_k$  вида  $y = Kx$ ; на участке  $x > x_k$  вида  $y = y_n$ .

При  $K = \infty$  характеристика принимает релейный характер (см. рис. 3.1, *д*), что характерно для датчиков позиционного регулирования, и определяется коэффициентом возврата:

$$K_B = x_{\text{отп}}/x_{\text{ср}},$$

где  $x_{\text{отп}}$ ,  $x_{\text{ср}}$  — значения входного сигнала, обеспечивающие отпущение и срабатывание датчика (реле).

Ряд датчиков имеет неоднозначность хода статической характеристики при увеличении и уменьшении входной величины  $x$  (см. рис. 3.1, *е*). Это явление носит название гистерезиса и характеризуется соответствующим коэффициентом:

$$K_r = x_r/(x_k - x_n),$$

где  $x_r$  — ширина зоны неоднозначности (гистерезиса);  $x_k$  и  $x_n$  — значения соответственно конца и начала рабочего диапазона входной величины.

На рис. 3.1 представлены характеристики одноктактных (неревверсивных) датчиков.

Характеристики двухтактных датчиков имеют вторую аналогичную ветвь, расположенную в третьем квадранте симметрично началу координат.

Нелинейную характеристику можно преобразовать в линейную (линеаризовать) или функциональную посредством аппроксимации.

Простейший способ линеаризации — это кусочно-линейная аппроксимация нелинейной характеристики линейными участками. В этом случае рабочий участок характеристики выбирают на линейном участке. Более сложная линеаризация — структурная связана с введением в структурную схему и соответственно в конструкцию датчика дополнительных звеньев. Такой способ позволяет получить линейную или близкую к линейной характеристику в достаточно широком диапазоне изменения входной величины.

Функциональная аппроксимация — это аппроксимация нелинейной характеристики определенной функциональной зависимостью, желательно стандартной математической функцией.

Для нелинейных характеристик коэффициент преобразования не является постоянной величиной, поэтому для них используют *дифференциальный коэффициент преобразования*  $K_d$ , под которым понимают предел отношения выходной величины  $y$  к входной  $x$ :

$$K_d = \frac{dy}{dx} = \left. \frac{\Delta y}{\Delta x} \right|_{\Delta x \rightarrow 0}$$

Дифференциальный коэффициент преобразования в общем случае меняется от точки к точке и определяется углом  $\alpha$  наклона касательной к характеристике в рабочей точке, т. е.  $K_d = \operatorname{tg} \alpha$ .

Коэффициент преобразования характеризует *чувствительность датчика*  $K_s$  и в зависимости от наименования входной и выходной величин может быть представлен в размерном или безразмерном виде.

Если на характеристике выделить линейный участок, в пределах которого работает преобразователь, то разность между верхним и нижним значениями входного и выходного сигналов определяет рабочие диапазоны  $\Delta x$  и  $\Delta y$  их изменения, а отношение  $\Delta y / \Delta x$  — динамический диапазон  $\operatorname{tg} \alpha$  (см. рис. 3.1, б).

*Порог чувствительности* — это минимальное значение входного сигнала  $x$ , вызывающего появление заметного выходного сигнала  $y$ .

Погрешности датчиков делятся на основные и дополнительные. *Основная погрешность* датчика — это максимальная разность между измеренным значением выходного сигнала  $y_{из}$  и его значе-

нием  $y_{ид}$ , определяемым по идеальной статической характеристике для данной входной величины при нормальных эксплуатационных условиях. Она может выражаться как в абсолютных единицах:  $\Delta = y_{из} - y_{ид}$ , так и в относительных. В последнем случае она равна отношению абсолютной погрешности к истинному значению выходного сигнала:

$$\delta = (y_{из} - y_{ид})/y_{ид} = \Delta/y_{ид}.$$

Можно использовать *относительную приведенную погрешность*  $\gamma$ , равную отношению максимальной абсолютной погрешности  $\Delta_{max}$  в диапазоне измеряемой величины к верхнему значению этого диапазона  $y_{max}$  в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta_{max}}{y_{max}} 100.$$

*Дополнительные погрешности* — это погрешности, вызываемые условиями внешней среды и внутренними процессами в деталях преобразователя. К этим процессам можно отнести изменения температуры, влажности, колебания напряжения источника питания, механические воздействия, старение и износ материалов. Дополнительная погрешность выражается обычно в процентах изменения выходной величины на определенное значение возмущающего параметра.

В зависимости от специфики применения погрешности датчиков нормируются либо *абсолютным* значением, либо *относительным*, либо *классом точности*, являющимся обобщенной характеристикой основной приведенной и дополнительных погрешностей.

Статические характеристики позволяют оценить работу преобразователей в установившемся режиме. Однако в реальных условиях датчикам иногда приходится работать в условиях быстро меняющихся процессов, т. е. в динамическом режиме, когда на вход поступают сигналы, изменяющиеся во времени. В этих случаях начинают проявляться явления отставания выходного сигнала от входного, изменения его частоты, фазы и амплитуды. Связь между входными и выходными величинами в преобразователе в динамическом режиме описывается в общем случае нелинейными дифференциальными уравнениями.

Для описания динамических свойств ИП можно использовать его передаточную функцию, которая представляет собой дифференциальное уравнение, связывающее входную и выходную величины, в операторной форме; переходную характеристику  $y = f(t_0)$  при единичном изменении входной величины  $x$ , а также частотные характеристики. При описании работы измерительных преобразователей в динамических режимах чаще всего используют характеристики типовых звеньев автоматических систем.

По *динамическим характеристикам* большинство ИП относятся к усилительным, апериодическим и колебательным звеньям первого и более высоких порядков. Наиболее используемые характеристики датчиков — это частотная характеристика и передаточная функция, а параметры — постоянная времени, время запаздывания, коэффициент усиления.

### 3.4. Структурные схемы измерительных преобразователей

Несмотря на все многообразие ИП, их структурные схемы можно свести к нескольким типам (табл. 3.1).

Структурная схема *прямого однократного преобразования* реализуется во многих ИП с естественными выходными сигналами (например, в термопарах, датчиках давления и разрежения), в которых измеряемая величина преобразуется непосредственно в электрический сигнал, перемещение или усилие. Статическая характеристика, погрешность и другие свойства в этом случае полностью определяются параметрами самого чувствительного элемента.

В тех случаях, когда первичное преобразование не позволяет получить удобный или требуемый для дальнейшего использования сигнал, применяют структурные схемы *последовательного прямого преобразования* (например, при необходимости получения унифицированного выходного сигнала, преобразования неэлектрической величины в электрическую, коррекции статической или динамической характеристик преобразователя). Суммарный коэффициент преобразования (общая чувствительность), равный произведению коэффициентов преобразования отдельных звеньев ИП, можно получить достаточно высоким, однако при этом увеличивается общая погрешность преобразования, равная сумме погрешностей составляющих звеньев.

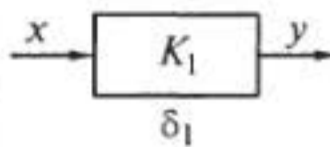
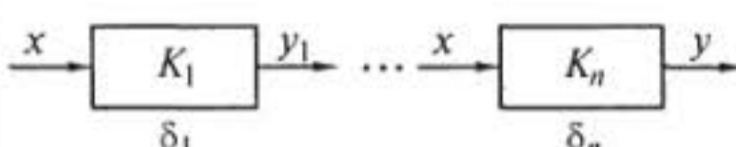
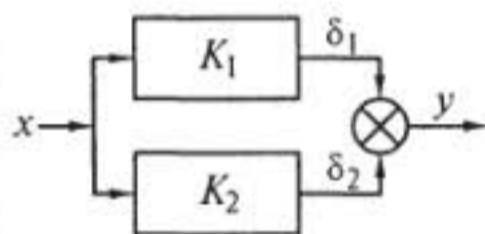
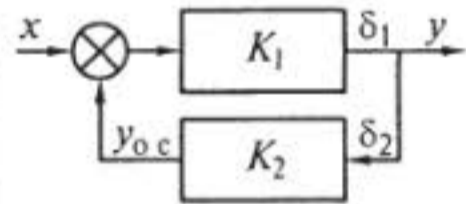
В датчиках, построенных по *дифференциальной* схеме, измеряемая величина подается одновременно на два идентичных измерительных преобразователя.

Выходной сигнал такого датчика пропорционален разности выходных сигналов ИП каждого из каналов. При этом, если выходные сигналы имеют одинаковые знаки, орган сравнения выполняет операцию вычитания, если же знаки разные, — операцию суммирования.

Возможны варианты, когда на один из входов подается эталонный сигнал и сравнение осуществляется с ним или когда информация преобразуется по одному каналу в реальных условиях, а по другому — в эталонных.

К достоинствам дифференциальных схем построения датчиков следует отнести:

Типовые структурные схемы измерительных преобразователей

Тип схемы	Статическая характеристика	Погрешность преобразования
Прямого (однократного) преобразования 	$y = K_1 x$	$\delta_n = \delta_1$
Последовательного прямого преобразования 	$y = \prod_{i=1}^n K_i x$	$\delta_n = \sum_{i=1}^n \delta_i$
Дифференциальная 	$y = (K_1 - K_2) x$	$\delta_n = \delta_1 \frac{K_1}{K_1 + K_2} +$ $+ \delta_2 \frac{K_2}{K_1 + K_2}$
С обратной связью (компенсационная) 	$y = \frac{K_1}{1 + K_1 K_2} x$	$\delta_n = \delta_1 \frac{1}{1 + K_1 K_2} -$ $- \delta_2 \frac{1}{1 + 1/(K_1 K_2)}$

Примечание. В формулах приняты следующие обозначения:  $x$  — измеряемая величина;  $y$  — выходная величина;  $\delta_i$  — погрешность звена преобразователя;  $\delta_n$  — общая погрешность преобразователя;  $K$  — коэффициент преобразования звена.

значительное уменьшение аддитивных (постоянных) составляющих общей погрешности, обусловленных воздействием возмущающих факторов;

увеличение чувствительности вдвое при подаче входного сигнала на оба входа;

получение реверсивной статической характеристики;

снижение нелинейности статической характеристики и постоянных составляющих выходного сигнала по сравнению с ха-



рактическими характеристиками отдельных ИП, входящих в дифференциальную схему.

Наиболее совершенной является схема ИП с обратной связью, или компенсационная схема. В датчиках, построенных по этой схеме, обеспечивается автоматическое уравнивание контролируемой величины компенсирующей величиной того же рода непосредственно или после предварительного преобразования. Основное достоинство такой схемы состоит в ее способности компенсировать значительные изменения параметров измерительного тракта. Кроме того, основная часть энергии, необходимой для работы датчика, берется от дополнительных источников, а не от измерительного элемента.

Преобразователи с отрицательной обратной связью принципиально точнее, чем схемы прямого последовательного преобразования. Отрицательная обратная связь существенно снижает влияние погрешностей звеньев прямой цепи на результат преобразования. Любые ошибки и возмущения звена, не охваченного обратной связью, полностью передаются на выход преобразователя, поэтому при построении ИП целесообразно стремиться к тому, чтобы охватить обратной связью как можно больше звеньев. При  $K_1 K_2 = 20 \dots 30$ , что нетрудно обеспечить на практике, общая погрешность преобразования практически определяется только погрешностью  $\delta_2$  обратной связи, вследствие чего требования к погрешности  $\delta_1$  прямого канала можно значительно снизить (см. табл. 3.1).

Датчики с обратной связью обладают высокой чувствительностью и позволяют легко изменять параметры настройки путем изменения коэффициентов преобразования обратной цепи.

Структурные схемы реальных ИП могут представлять собой любую комбинацию из рассмотренных выше типовых структур. В цепи последовательного преобразования измеряемого сигнала принято различать первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) и промежуточные преобразователи (рис. 3.2). Измеряемая величина воздействует непосредственно на первичный преобразователь. Очень часто метод первичного преобразования входной величины определяет наименование всего измери-



Рис. 3.2. Структурная схема цепи последовательного преобразования

тельного преобразователя или прибора. Промежуточные преобразователи могут выполнять функции усиления, линеаризации, преобразования типа сигнала и др. В частности, на рис. 3.2 представлена упрощенная схема ИП с естественным и унифицированным выходами.

### 3.5. Унификация и стандартизация измерительных преобразователей

В отечественном приборостроении вопросы унификации и стандартизации измерительных преобразователей решаются в рамках Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП). Для того чтобы создавать сложные информационные системы (управляющие, измерительные), необходимо в первую очередь обеспечить информационную совместимость технических средств. С этой целью в рамках ГСП сначала были унифицированы, а затем и стандартизированы выходные сигналы ИП.



Рис. 3.3. Виды сигналов измерительных преобразователей

По виду выходных сигналов различают измерительные преобразователи с *естественным* и *унифицированным* выходными сигналами. Первые — представляют собой устройства, в которых осуществляется первичное (обычно однократное) преобразование измеряемой физической величины. Естественное формирование сигнала здесь обеспечивается методом преобразования и конструкцией ИП. Такие преобразователи чаще всего применяют в устройствах прямого регулирования либо при централизованном контроле сравнительно простых объектов. В ГСП приняты десять видов естественных выходных сигналов (рис. 3.3).

При создании относительно сложных систем с использованием ЭВМ и необходимости передачи сигналов на большие расстояния применяют преобразователи естественных сигналов в унифицированные. Для этих целей разрабатываются специальные нормирующие преобразователи, параметры выходных сигналов которых приведены на рис. 3.3.

### Контрольные вопросы

1. Что представляют собой измерительный преобразователь, первичный преобразователь и датчик?
2. Какие виды энергии используются в преобразователях?
3. Перечислите основные требования, предъявляемые к преобразователям.
4. По каким признакам можно классифицировать измерительные преобразователи?
5. Какие виды статических характеристик характерны для измерительных преобразователей?
6. Что такое основная и дополнительная погрешности датчика?
7. Что такое относительная приведенная погрешность и класс точности датчика?
8. Каковы структурная схема, статическая характеристика и погрешность прямого (однократного) преобразования?
9. Каковы схема последовательного прямого преобразования, его статическая характеристика и погрешность?
10. Что представляет собой и в каких случаях применяется дифференциальная схема преобразования?
11. Как построена и какие имеет преимущества схема преобразования с обратной связью?

## Глава 4

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ (ДАТЧИКИ)

### 4.1. Общие сведения

Функцией измерительного элемента является измерение регулируемой или какой-либо другой величины, дающей необходимую для управления информацию. Одновременно измерительный элемент осуществляет преобразование измеренной величины в величину другого вида, удобную для передачи сигналов в данной автоматической системе. В большинстве систем автоматического управления для передачи и обработки сигналов, несущих информацию об управляемом процессе, используются электрические величины, т. е. большинство датчиков автоматически преобразуют измеряемые величины любой физической природы (скорость, давление, перемещение и др.) в электрические.

Измеряемая величина является входной величиной датчика.

Выходная электрическая величина может представлять собой один из параметров электрической цепи ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) или ЭДС.

Датчики, преобразующие входную величину в ЭДС, называются *генераторными*, а датчики, преобразующие входную величину в изменение параметра электрической цепи, — *параметрическими*.

По характеру представления выходной величины датчики подразделяются на *измерительные* и *релейные*. Измерительные датчики имеют линейную статическую характеристику и выдают значение измеряемой величины в непрерывной (аналоговой) форме. Релейные датчики имеют релейную характеристику и выдают дискретный по уровню сигнал, соответствующий некоторому предельному значению измеряемой величины.

### 4.2. Датчики перемещений

#### Потенциометрические датчики

Потенциометрический датчик (рис. 4.1), являющийся датчиком линейных или угловых перемещений, представляет собой реостат с подвижным контактом — щеткой, включенной по схеме

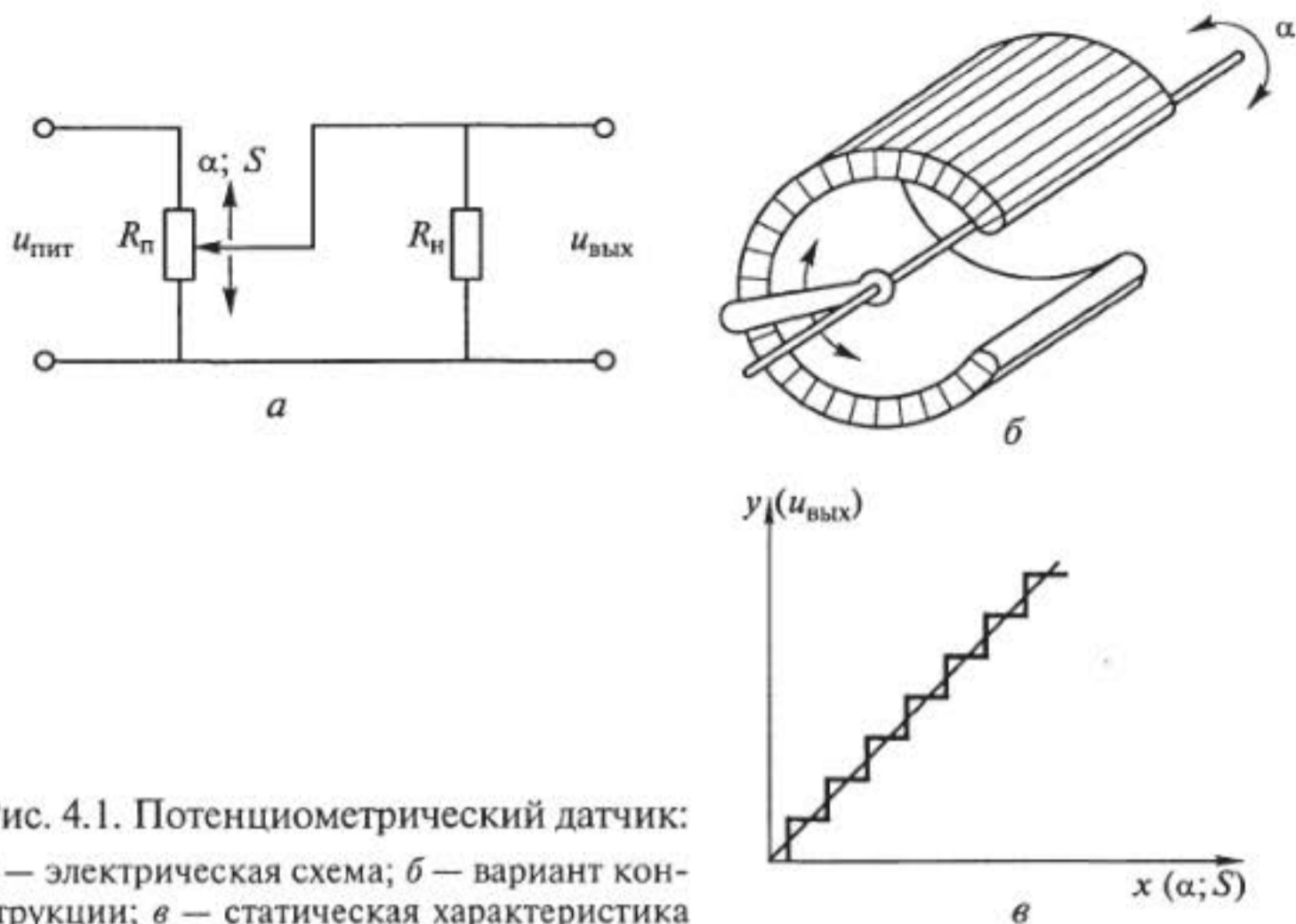


Рис. 4.1. Потенциометрический датчик: *a* — электрическая схема; *б* — вариант конструкции; *в* — статическая характеристика

потенциометра. Перемещение подвижного контакта такого датчика преобразуется в напряжение, снимаемое со щетки и одной клеммы обмотки потенциометра (см. рис. 4.1, *a*).

Характеристика потенциометра линейна, если сопротивление нагрузки значительно больше его сопротивления.

Динамические свойства потенциометра также зависят от его нагрузки; при активной нагрузке он практически безинерционен, а при емкостной и индуктивной нагрузках изменение его выходного сигнала будет отставать от изменения входного сигнала, так как динамические процессы в электрических цепях с реактивным сопротивлением протекают не мгновенно.

Чувствительность потенциометрических датчиков при измерении перемещений составляет 3...5 В/мм.

Конструкции потенциометра разнообразны. Наиболее распространен потенциометр с каркасом цилиндрической формы (см. рис. 4.1, *б*), которая обеспечивает небольшие его габариты и позволяет снизить усилия, необходимые для перемещения щетки, а следовательно, уменьшить зону нечувствительности, что очень важно при измерении малых перемещений.

Каркасы потенциометров делают из пластмасс, керамики, оксидированного алюминия, а обмотки — из сплавов с высоким удельным сопротивлением (константана, сплавов платины, золота). Для намотки используется проволока малого диаметра (до сотых долей миллиметра), так как чем меньше диаметр проволоки, тем меньше ступенчатость статической характеристики (см. рис. 4.1, *в*).

Щетки потенциометров изготовляют из сплавов серебра, платины, иридия, палладия и др.

Применяются и потенциометры с каркасами другой формы, например, если надо произвести измерения большого линейного перемещения с большой точностью, — прямолинейные, большой длины.

Достоинства потенциометрического датчика — простота конструкции и схемы, малые габаритные размеры и масса; недостаток — наличие скользящего контакта, который, во-первых, снижает надежность, а во-вторых, ограничивает срок его эксплуатации, так как со временем происходит истирание проволоки и характеристика потенциометра меняется.

### Индуктивные датчики

Принцип действия индуктивного датчика состоит в преобразовании перемещения подвижной части его магнитопровода в изменение индуктивности катушек. Применяется такой датчик главным образом для точных измерений малых перемещений.

Схемы конструкций простого и дифференциального индуктивных датчиков представлены на рис. 4.2, а, б.

Измеряемое перемещение предмета 1 вызывает перемещение подвижной части магнитопровода 2, изменение воздушного зазора  $\delta$  и в конечном счете изменение индуктивности в обмотке 3. (В дифференциальном датчике изменяются индуктивности обеих обмоток 3.) Обмотки включены в мостовую схему переменного тока, поэтому выходной сигнал датчика — разбаланс моста пропорционален входному сигналу — перемещению.

Статическая характеристика датчика представлена на рис. 4.2, в.

Чувствительность индуктивных датчиков может достигать 10 В/мм; линейная область характеристики невелика. Индуктивным датчиком можно измерять перемещения порядка  $10^{-7}$  м.

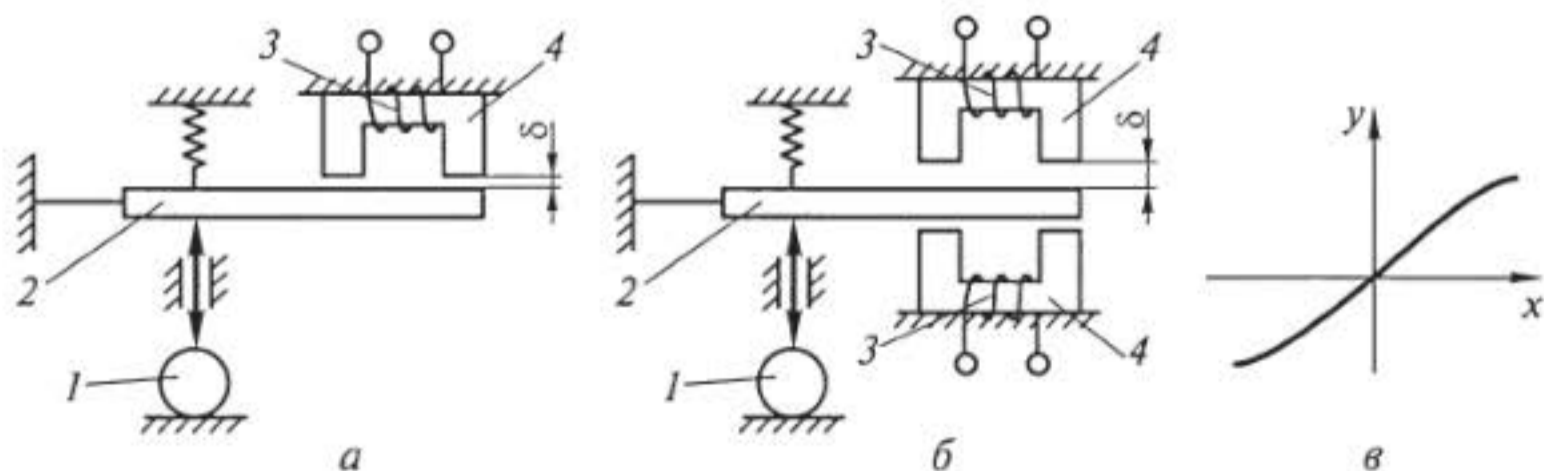


Рис. 4.2. Схемы конструкций простого (а) и дифференциального (б) индуктивных датчиков и их статическая характеристика (в):

1 — перемещающийся предмет; 2 — подвижная часть магнитопровода; 3 — обмотки; 4 — неподвижный магнитопровод

## Индукционные датчики

Действие индукционного датчика основано на изменении индуктивных связей между его обмотками при смещении подвижных элементов магнитопровода. Существует много разновидностей таких датчиков, но наиболее распространен дифференциальный трансформаторный датчик (рис. 4.3). На полюсных выступах неподвижной части магнитопровода *1* такого датчика расположены обмотка возбуждения *3* и сигнальные обмотки *2* и *4*, с которых снимается выходное напряжение. Измеряемое перемещение воздействует на подвижную часть магнитопровода *5*.

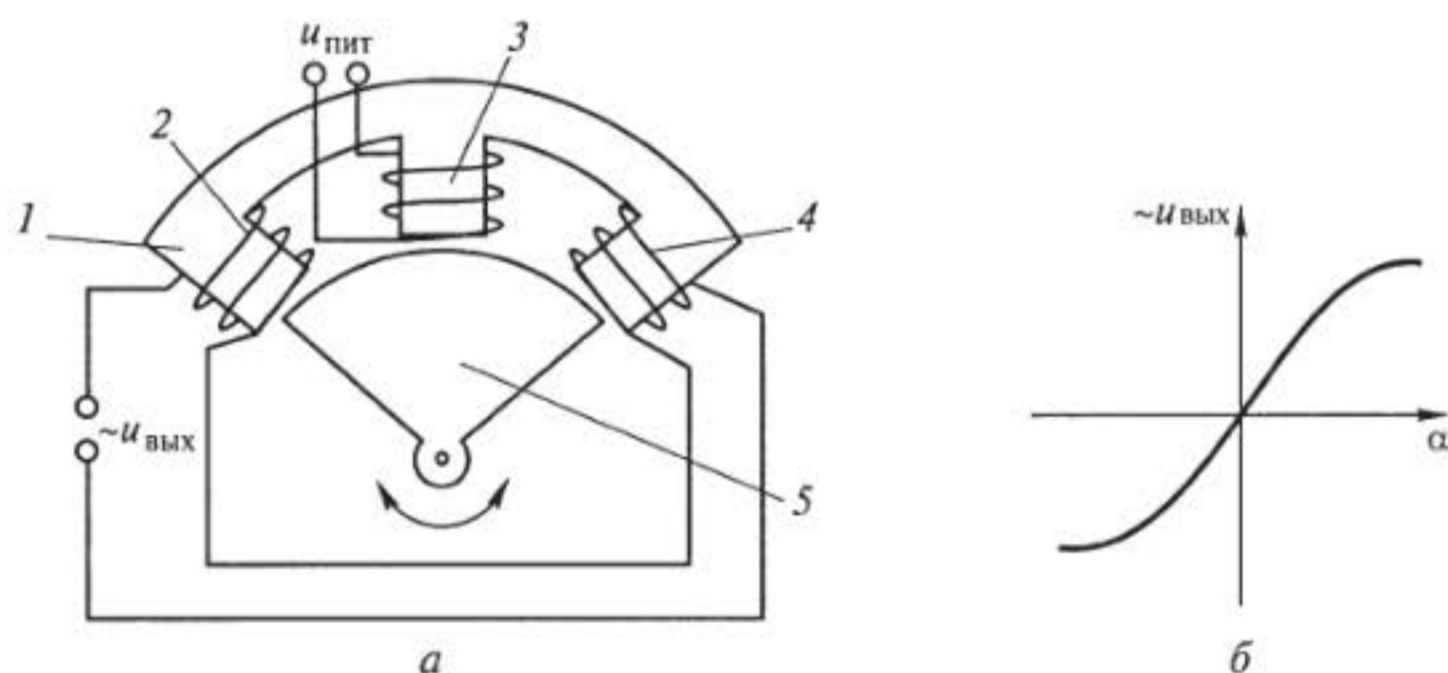


Рис. 4.3. Схема конструкции (а) и статическая характеристика (б) индукционного трансформаторного датчика:

*1* — неподвижная часть магнитопровода; *2*, *4* — сигнальные обмотки; *3* — обмотка возбуждения; *5* — подвижная часть магнитопровода

Когда магнитопровод находится в среднем положении, магнитный поток, создаваемый катушкой *3*, наводит в обмотках *2* и *4* равные ЭДС; поскольку эти катушки соединены встречно, на выходе датчика сигнала в этом случае нет. При смещении подвижной части магнитопровода ЭДС в одной из сигнальных катушек увеличивается, а в другой — уменьшается, и на выходе появляется сигнал, равный разности этих ЭДС.

## Емкостные датчики

Принцип действия емкостного датчика состоит в преобразовании перемещения в изменение емкости *C*.

Емкостные датчики бывают простые и дифференциальные.

На рис. 4.4 представлены схемы конструкций некоторых емкостных датчиков. Емкость в таких датчиках может изменяться в резуль-

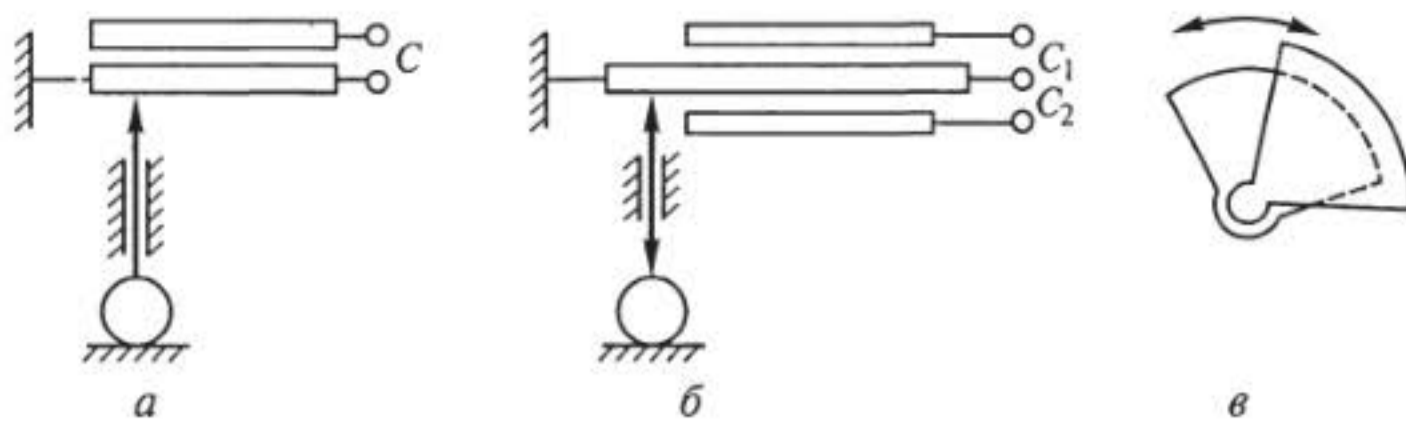


Рис. 4.4. Схемы конструкций емкостных датчиков:

*a, б* — соответственно простого и дифференциального с переменным расстоянием между пластинами; *в* — с переменной площадью взаимоперекрывания пластин

тате изменения расстояния между пластинами (см. рис. 4.4, *a, б*), площади взаимного перекрытия пластин (см. рис. 4.4, *в*), а также и за счет изменения диэлектрических свойств изолирующего промежутка.

Емкостные датчики питаются переменным током высокой частоты. Они очень чувствительны, а следовательно, в большой степени подвержены влиянию различных помех (наводок, действию внешних емкостей, отклонениям питающего напряжения и др.), поэтому применяются преимущественно как датчики релейного типа.

### Фотоэлектрические датчики

Действие фотоэлектрического датчика основано на преобразовании изменения светового потока в изменение электрических параметров фотоэлемента.

Фотоэлементы — это особый вид полупроводников или электронных приборов (газонаполненные элементы).

Для измерения перемещений обычно используются фоторезисторы, меняющие свое внутреннее сопротивление при изменении освещения, и фотодиоды, которые при изменении освещения меняют свои вентильные свойства.

Схема фотоэлектрического датчика представлена на рис. 4.5.

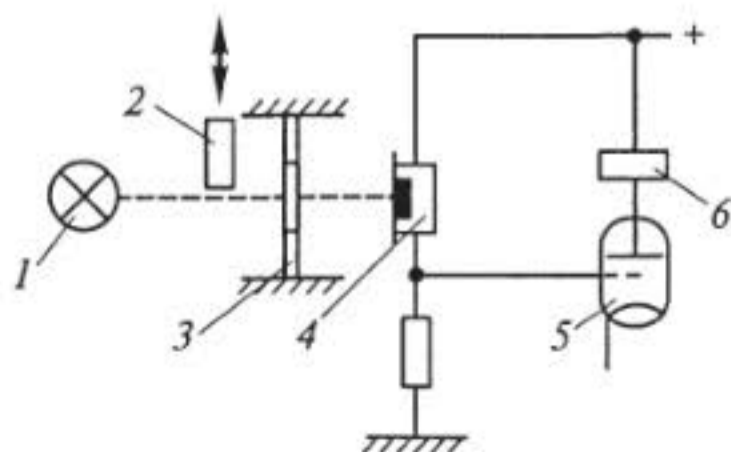


Рис. 4.5. Схема фотоэлектрического датчика релейного типа:

*1* — осветитель; *2* — перемещающийся элемент; *3* — диафрагма; *4* — фотоэлемент; *5* — усилитель; *6* — выходное реле



Работают фотоэлектрические датчики следующим образом. Измеряемое перемещение вызывает перекрытие светового потока, освещающего фотоэлемент. Изменение электрических параметров воспринимается электрической схемой, обычно усилителем.

Эти датчики широко применяются в промышленности не только для измерения перемещений, но и для контроля чистоты поверхности, наличия дефектов поверхности, счета деталей на конвейерах и т. п.

Существует группа фотоэлектрических импульсных датчиков, которые работают в комплексе со счетными устройствами. Такой комплекс позволяет измерять большие перемещения (как угловые, так и линейные) с высокой точностью. Высокая (в сравнении с другими видами датчиков) точность достигается за счет увеличения масштаба измеряемого перемещения при его учете.

Примером может служить *муаровый растровый датчик*, представляющий собой комбинацию двух растров — подвижного и неподвижного (рис. 4.6). Растры — это решетки из прозрачных и непрозрачных полос, форма которых может быть различной. На рис. 4.6, *а*, *б* представлены радиальные центральный и нецентральный растры, сопряжение которых применяется при измерении угловых перемещений, а на рис. 4.6, *в*, *г* — растровые решетки, сопряжение которых используется при измерении линейных перемещений.

Растровое сопряжение устанавливается на пути светового потока таким образом, чтобы он проходил перпендикулярно к обоим растрам.

При перемещении подвижного растра относительно неподвижного образуются комбинационные муаровые полосы, движущиеся перпендикулярно к измеряемому перемещению. Эти полосы пересекают световой поток, модулируют его, и фотодатчик формирует импульсы. Выходной сигнал измерительной схемы имеет цифровую форму — это число импульсов, учтенных счетчиком.

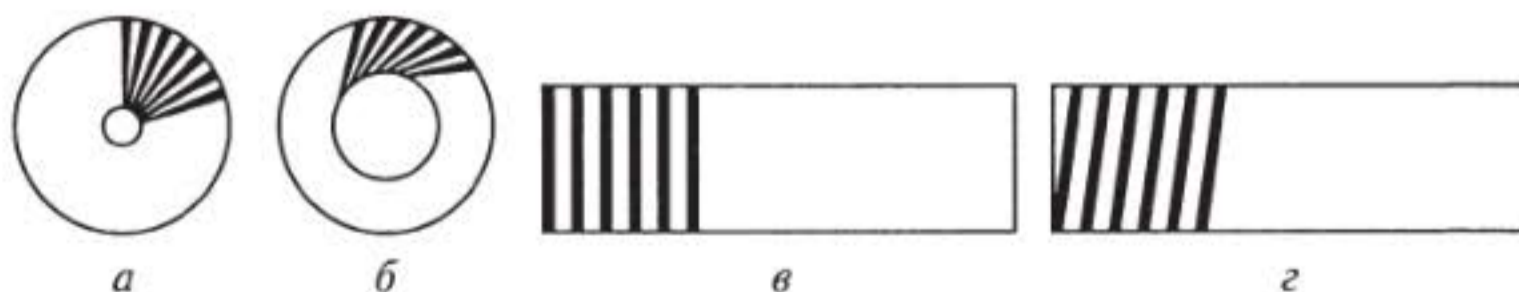


Рис. 4.6. Растры муаровых датчиков:

*а*, *б* — соответственно подвижный и неподвижный для измерения угловых перемещений; *в*, *г* — соответственно подвижный и неподвижный для измерения линейных перемещений

## Электроконтактные датчики

Электроконтактные датчики перемещения имеют релейную характеристику и применяются в основном для контроля размеров деталей.

Электроконтактные датчики бывают однопредельные (с одним контактом) и двухпредельные (с двумя контактами). Однопредельные датчики применяются для контроля размера детали по допуску одного знака. Двухпредельные датчики позволяют контролировать размер детали по допускам «+» и «-». Электроконтактные датчики измеряют не фактические размеры деталей, а только разброс их значений. Например, при контроле диаметра цилиндрической детали воспринимающий стержень (измерительный наконечник) смещается относительно корпуса датчика, воспринимая разность между максимальным и минимальным диаметрами.

На рис. 4.7 представлена схема конструкции двухпредельного электроконтактного датчика.

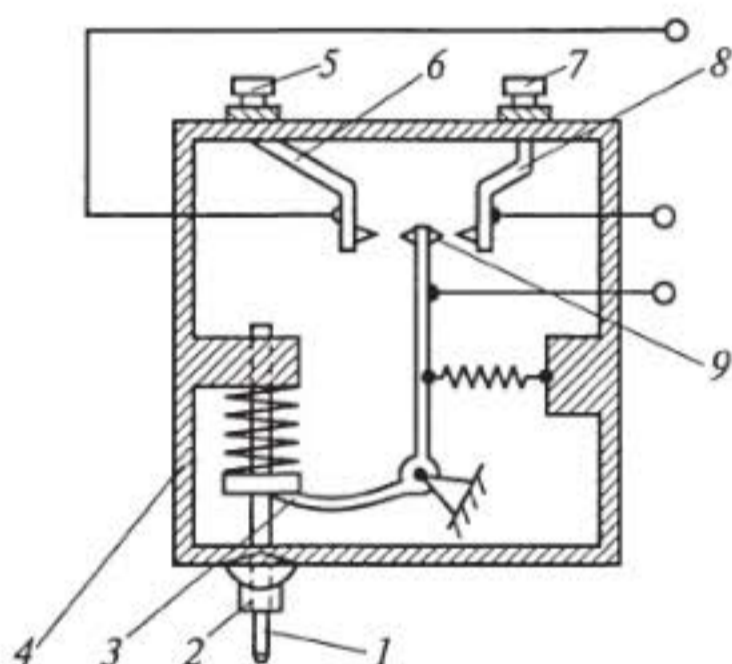


Рис. 4.7. Схема конструкции двухпредельного электроконтактного датчика:

1 — воспринимающий стержень; 2 — направляющая гильза; 3 — двуплечный рычаг; 4 — корпус; 5, 7 — настроечные винты; 6, 8, 9 — контакты

Датчики, предназначенные для точных измерений (с погрешностью не более 0,01 мм), рассчитаны на очень малый ток в цепи контактов (порядка десятых долей миллиампера), поэтому их включают с усилительными электронными схемами. Датчики для более грубых измерений могут включаться непосредственно в цепи обмоток реле.

## Путевой выключатель

Путевой выключатель (рис. 4.8) — это предельный датчик перемещения. Он применяется в электрических схемах промышленной автоматики для подачи команд о начале перемещения какого-либо подвижного узла или проходе определенного участка пути. Путевой выключатель представляет собой систему из нескольких

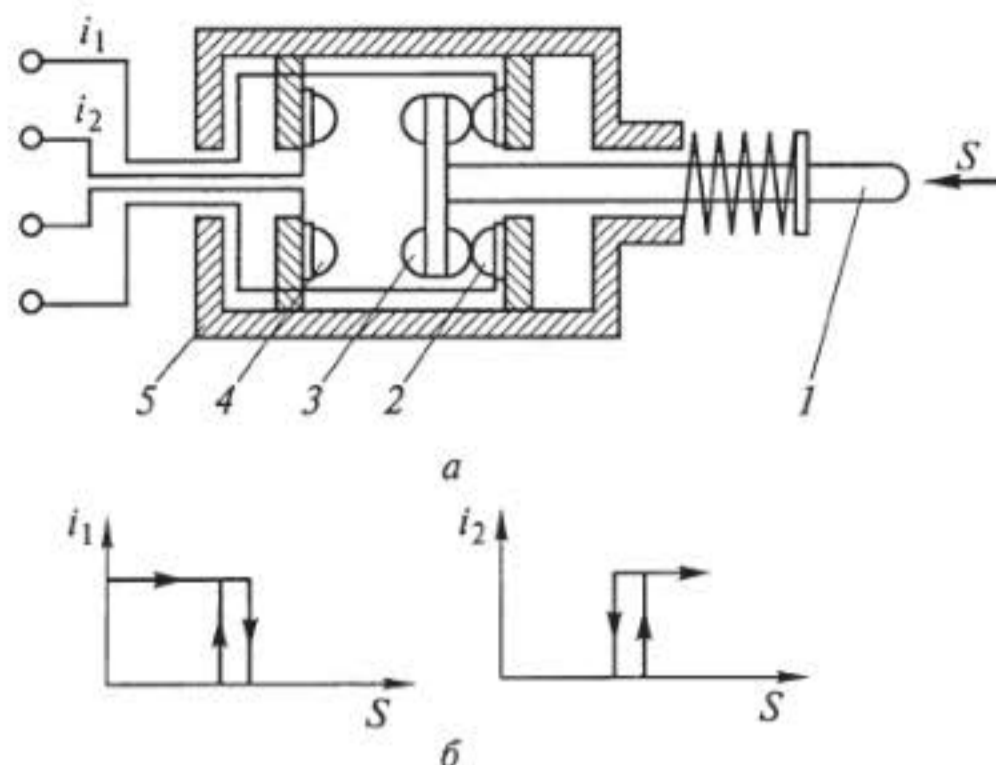


Рис. 4.8. Схема конструкции (а) и статические характеристики (б) путевого выключателя:

1 — воспринимающий стержень; 2, 4 — неподвижные контакты; 3 — подвижный контакт; 5 — корпус

пар неподвижных и подвижных контактов, которые непосредственно связаны с перемещающимся узлом.

Точность срабатывания такого датчика по отношению к перемещению невелика — от 10 до 2 мм в зависимости от типа выключателя.

### 4.3. Датчики скорости

#### Центробежные датчики скорости

Схема конструкции центробежного датчика скорости представлена на рис. 4.9.

На двух муфтах шарнирно закреплены грузы; с увеличением скорости вращения грузы расходятся, сжимая пружину, и поднимают вверх нижнюю подвижную муфту. Перемещение муфты является выходной величиной датчика, а его входная величина — угловая скорость. Для преобразования выходной величины в электрический сигнал к подвижной муфте можно присоединить любой датчик перемещения.

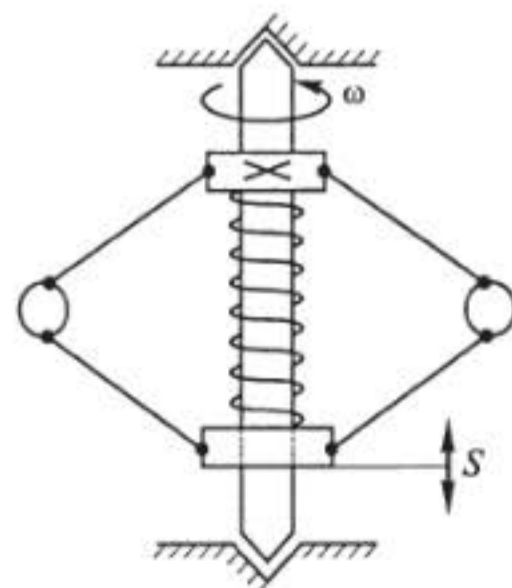


Рис. 4.9. Схема конструкции центробежного датчика

## Тахогенераторы

Тахогенераторы — это миниатюрные генераторы постоянного или переменного тока с независимым возбуждением, осуществляемым от электромагнитов или постоянных магнитов. На рис. 4.10 представлена схема конструкции тахогенератора постоянного тока, в котором напряжение, снимаемое с обмоток якоря, пропорционально скорости вращения якоря.

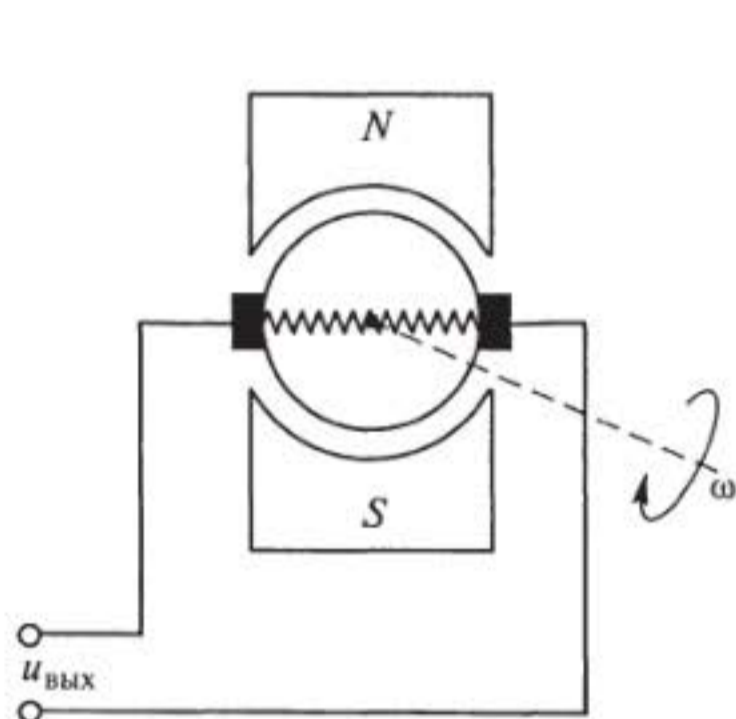


Рис. 4.10. Схема конструкции тахогенератора постоянного тока

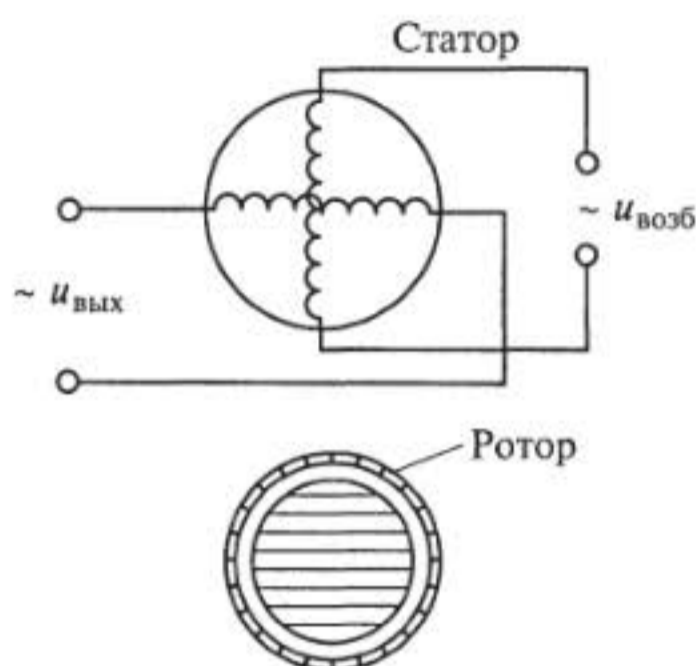


Рис. 4.11. Схема конструкции асинхронного тахогенератора переменного тока

В асинхронном тахогенераторе переменного тока (рис. 4.11) две обмотки, сдвинутые по оси на  $90^\circ$ , расположены на статоре. Ротор представляет собой алюминиевый тонкостенный цилиндр, вращающийся в зазоре между статором и неподвижным сердечником, набранным из стальных пластин. Одна из обмоток статора питается током возбуждения; под влиянием поля, создаваемого этой обмоткой, во вращающемся роторе наводятся токи. Магнитный поток, создаваемый этими токами, при вращении ротора пересекает вторую обмотку статора и наводит в ней ЭДС, пропорциональную скорости вращения.

## 4.4. Датчики температуры

### Биметаллические датчики температуры

Действие биметаллического датчика основано на различии температурных коэффициентов расширения различных металлов. В биметаллическом датчике используется сплав железа с никелем (ин-

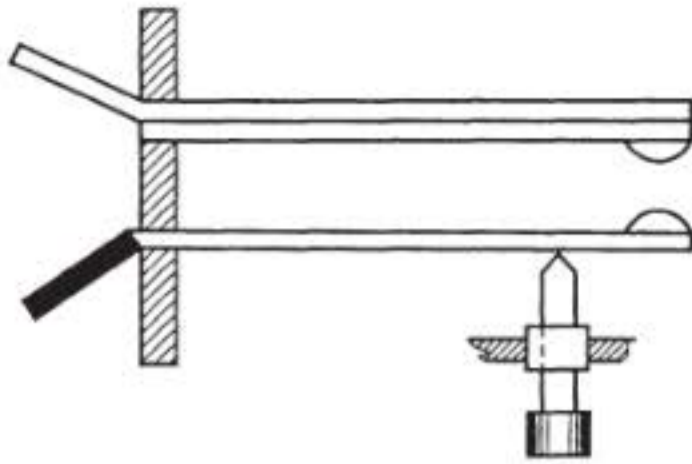


Рис. 4.12. Схема биметаллического реле температуры

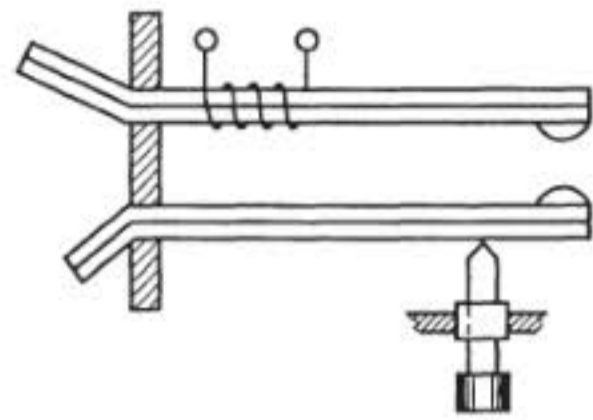


Рис. 4.13. Схема биметаллического реле времени (энергии)

вар) с коэффициентом температурного расширения  $1 \cdot 10^{-6} \cdot 1/1^\circ\text{C}$  и железо, соответствующий коэффициент которого в 10 — 20 раз больше.

Входной величиной такого датчика является температура, выходной — перемещение.

Конструкции биметаллических датчиков могут быть различными. В промышленной автоматике наиболее широко используется биметаллическое реле температуры. Такое реле состоит из биметаллической полосы, несущей подвижный контакт, и обычной контактной пружины (рис. 4.12), на которой укреплен неподвижный контакт. При нагреве биметаллическая полоса прогибается, и контакты замыкаются. Выходной величиной датчика является перемещение, преобразуемое в электрический сигнал. Одновременно с преобразованием энергии сигнала происходит и преобразование его формы, т. е. непрерывное перемещение преобразуется в дискретный электрический сигнал.

Все биметаллические датчики в динамическом режиме имеют значительное запаздывание, так как обладают тепловой инерцией (требуется время на прогрев массы датчика).

Инерционные свойства биметаллических датчиков имеют полезное применение: биметаллические датчики со специальным постоянным нагревом используются как *реле времени* (рис. 4.13). Работает такое реле следующим образом: при включении нагревающей обмотки верхняя его пластина изгибается и по истечении установленной выдержки времени замыкает электрическую цепь. Расстояние между контактами реле устанавливается регулировочным винтом; это расстояние определяет предел температуры, отмечаемый реле, или время его выдержки.

## Термопары

Термопара (рис. 4.14) является генераторным датчиком. Действие термопары основано на том, что в цепи, составленной из

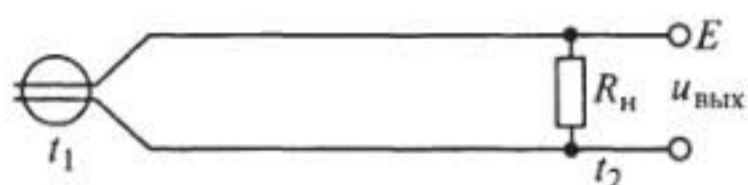


Рис. 4.14. Схема включения термопары

двух или более металлических проводников из различных материалов, при неодинаковой температуре точек их соединения (спаев) возникает термоЭДС, величина которой зависит от разности этих температур (явление Томсона).

Для статического режима

$$E_{\text{вых}} = K (t_1 - t_2),$$

где  $K$  — коэффициент, зависящий от материалов, из которых изготовлена термопара.

Горячий спай термопары помещается в среду, температуру которой надо измерить, при этом холодный спай находится в среде с комнатной температурой (желательно, чтобы она поддерживалась постоянной).

Мощность выходного сигнала термопар очень мала; увеличить ее можно посредством увеличения массы спаива, но при этом увеличится и инерционность датчика, что нежелательно, поэтому термопары, как правило, работают с усилителями.

Стандартные термопары и их рабочие диапазоны, °С:

Хромель — копель .....	до 600
Сплавы никель — кобальт и кремний — алюминий ...	от 300 до 1000
Хромель — алюмель .....	до 1300
Платинородий — платина .....	от 1000 до 1600
Платинородий — платинородий .....	от 1000 до 1800

### Проволочные термосопротивления

Термосопротивления изготавливаются из медной, никелевой, платиновой и другой проволоки. Действие их основано на увеличении сопротивления проводника при нагреве. Диапазон измерений — до 500 °С. Относительное приращение сопротивления маленькое — десятые доли процента на 1 °С.

Конструкция проволочного термосопротивления очень проста — это проволочная спираль на изолированном стержне, помещенная в защитный корпус.

### Полупроводниковые термосопротивления (термисторы)

Действие полупроводниковых термосопротивлений основано на том, что повышение температуры увеличивает количество так

называемых свободных электронов в полупроводнике и, следовательно, повышает его электропроводность.

Температурный коэффициент термистора отрицателен и в десятки раз больше, чем у проволочных термосопротивлений.

Термисторы — маломощные датчики, их нельзя нагружать сколь-нибудь значительным током, так как они нагреваются в этом случае уже не теплом окружающей среды, а этим током.

Преимущества термисторов по сравнению с проволочными термосопротивлениями:

большой температурный коэффициент сопротивления, т. е. большая чувствительность;

высокое удельное сопротивление.

Термисторы — малогабаритные элементы, поэтому инерционные свойства их незначительны.

Поскольку сигнал, снимаемый с термистора, имеет малую мощность, применение такого датчика в САУ возможно только с усилителем.

#### 4.5. Датчики давления

Большие давления и усилия, способные вызвать деформации и смещения основных элементов конструкций, в промышленной автоматике измеряют, главным образом, с помощью угольных реостатов и тензодатчиков.

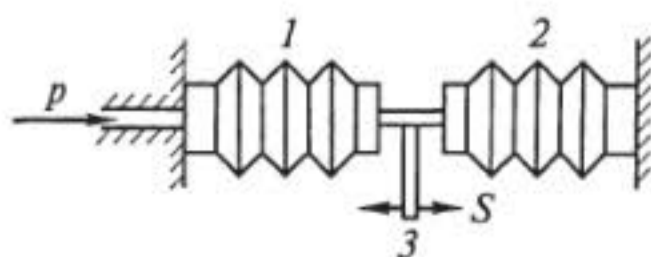
Для измерения небольших давлений газа или жидкости применяются различные типы мембранных датчиков и сильфонов.

На рис. 4.15 представлена схема конструкции сильфонного датчика, измеряющего давление газа, который работает следующим образом. При изменении давления газа гофрированные стенки сильфонного цилиндра 1 сжимаются или разжимаются, создавая выходной сигнал.

Сильфонный цилиндр 2 служит для компенсации влияния окружающей среды (изменений температуры, давления и т. д.). Воздух из него откачен, и он запаян.

Сильфонные и мембранные датчики чувствительны к перегрузке: нельзя доводить измеряемое давление до предела, за которым возникают остаточные деформации.

Рис. 4.15. Схема конструкции дифференциального сильфонного датчика: 1, 2 — сильфонные цилиндры; 3 — перемещающийся стержень



### Контрольные вопросы

1. Каковы преимущества и недостатки потенциометрических датчиков? Почему у проволочных датчиков имеется ступенчатая погрешность?
2. Чем отличаются схемы и принципы действия индуктивных и индукционных датчиков?
3. Для чего предназначены и как работают емкостные датчики?
4. Какие существуют разновидности фотоэлектрических датчиков и для чего они предназначены?
5. Как устроен и какую характеристику имеет электроконтактный датчик?
6. Для чего используется путевой выключатель и какова его схема?
7. Как устроены и каковы принципы работы центробежного датчика скорости и тахогенератора?
8. Каков принцип работы биметаллических датчиков и для чего они применяются?
9. Каковы устройство, принцип действия и назначение термопар и термосопротивлений?
10. Каковы особенности, преимущества и недостатки термисторов?
11. Как и с помощью каких датчиков измеряют усилия и давления?



## Глава 5

# ЗАДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И УСТРОЙСТВА СРАВНЕНИЯ

### 5.1. Задающие устройства

Назначением задающего устройства является ввод в систему автоматического управления задающего воздействия, которое в том или ином виде содержит информацию о желаемом течении управляемого процесса.

В замкнутых системах, где осуществляется регулирование по отклонению, задающее устройство вводит заданное значение регулируемой координаты. В разомкнутых системах, где осуществляется регулирование по возмущению, задающее устройство как отдельный элемент отсутствует, и заданное значение регулируемой координаты вводится начальной настройкой системы.

В замкнутых и разомкнутых системах автоматического управления с логическими программами рабочую программу вводит задающее устройство.

В системах регулирования задающее воздействие содержит информацию количественного характера, выраженную в дискретной или непрерывной форме.

В системах с логическими программами наряду с информацией количественного характера используются команды типа включить, выключить, вперед, назад и т. п.

Характер задающего воздействия и объем содержащейся в нем информации определяют конструкцию задающего устройства. Простейшими задающими устройствами являются потенциометры, в которых входной величиной является перемещение, а выходной — электрический сигнал (ток, напряжение). Например, потенциометр, движок которого в начале процесса установлен в определенное положение, т. е. с выхода которого подается в САР определенное напряжение, может служить простейшим задающим устройством для стабилизирующей системы.

Если же движок потенциометра связан с механизмом, осуществляющим его перемещение в течение рабочего процесса, это будет задающее устройство с переменным задающим воздействием.

Автоматические системы с программным управлением, используемые в промышленности, весьма разнообразны и имеют задающие устройства различной степени сложности.

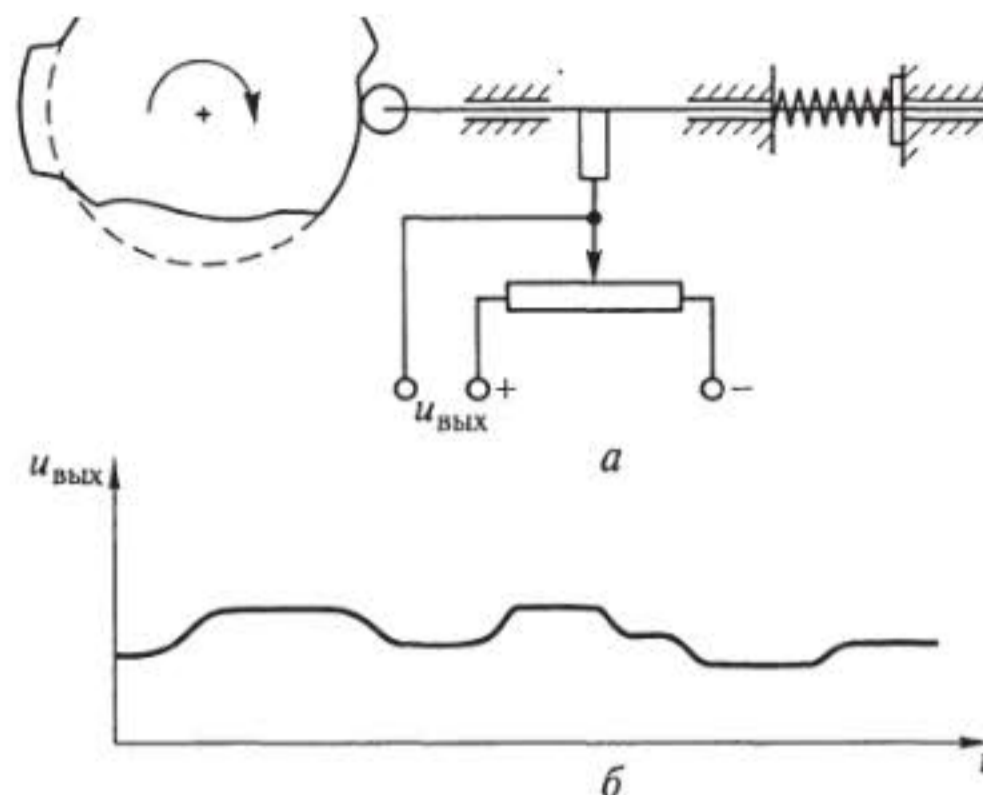


Рис. 5.1. Схема командоаппарата непрерывного действия (а) и диаграмма изменения его выходного сигнала во времени (б)

Наиболее простые автоматические системы с постоянной программой без информационных звеньев обратной связи обычно работают с периодической повторяемостью рабочих циклов, т.е. по окончании одного цикла автоматически начинается следующий, и т.д.

В качестве задающих устройств в таких системах используют командоаппараты, которые могут быть механическими, электрическими, гидравлическими, а также комбинированными.

По виду выходной величины различают командоаппараты непрерывного (рис. 5.1) и дискретного (рис. 5.2) действия.

Принцип действия командоаппаратов всех типов одинаков: распределительный вал вращается с постоянной скоростью от синхронного двигателя или привода самого автоматизированного

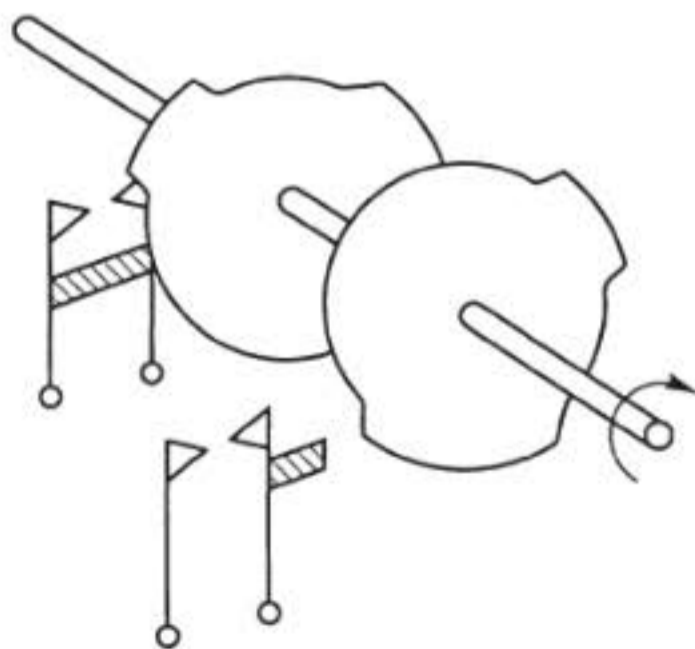


Рис. 5.2. Схема командоаппарата дискретного действия (контактного)

устройства, совершая один оборот за заданное время цикла. На валу насажены кулачки, воздействующие на электрические контакты и рычаги, открывающие и закрывающие пневмоклапаны или другие управляющие органы. Фазные углы между кулачками можно регулировать, так как конструкция крепления предусматривает возможность угловых смещений. Можно менять и форму кулачков.

За один оборот вала все кулачки и рычаги формируют один цикл задающих команд, посылаемых в автоматическую систему. При этом фактическое выполнение команд не влияет на ход задающего устройства (разумеется, кроме аварийных режимов, когда приборы защиты выключают всю систему).

В автоматических программных системах, имеющих цепи обратной связи, использование задающих устройств типа командоаппаратов не всегда приемлемо. В частности, они не могут применяться, когда начало последующей операции должно зависеть от окончания предыдущей. В качестве задающих устройств для таких систем используют шаговые командоконтроллеры или релейные логические схемы.

Действие шагового командоконтроллера аналогично действию командоаппарата; разница заключается только в том, что в последнем переход от одного состояния коммутируемых цепей к другому осуществляется не по временному закону, а в зависимости от команд, поступающих от управляемого объекта.

В качестве командоконтроллера может быть использован шаговый искатель или любой другой распределитель как с самостоятельным приводом, так и имеющий переменное сцепление посредством муфт с основным приводом машины.

Если функции задающего устройства выполняет релейная схема, то переход от одной операции рабочего цикла к другой осуществляется изменением состояния элементов схемы (срабатыванием, отпусканием) по командам, поступающим от объекта.

На рис. 5.3 показана такая схема. Автоматическое включение вращения шпинделя в цикле обработки осуществляется здесь после того, как деталь зажата в патроне; факт ее зажима контролируется срабатыванием реле давления гидросистемы (РД), т.е. когда оно срабатывает, включается привод шпинделя.

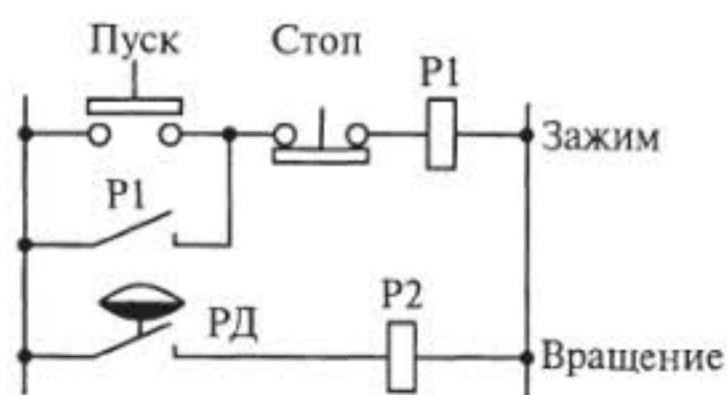


Рис. 5.3. Релейная схема, выполняющая функции задающего устройства

## 5.2. Устройства сравнения

Сравнивающие устройства или элементы сравнения являются неотъемлемой частью любой системы автоматического управления. К одному из входов сравнивающего устройства, как правило, подключается датчик, к другому — задающее устройство (задатчик).

В качестве задающих устройств в электрических схемах сравнения обычно используют переменные резисторы, а в отдельных случаях — многоцепные переключатели с набором резисторов, потенциометры с профильными каркасами, кулачковые механизмы и другие устройства. С развитием вычислительной техники в качестве задающего устройства стали использоваться специальные программы.

В сравнивающих устройствах управляемая величина  $y$ , контролируемая датчиком, сравнивается с сигналом задания  $g$ , формируемым задатчиком. На выходе сравнивающего устройства устанавливается исполнительный механизм (ИМ), который в зависимости от сигнала рассогласования  $\varepsilon$ , определяемого выражением

$$\varepsilon = g - y,$$

может находиться в состоянии равновесия (при  $\varepsilon = 0$ ) или рабочем состоянии (при  $\varepsilon \neq 0$ ). Пусковое устройство включает ИМ в целях устранения рассогласования.

В кинематических схемах сравнение механических величин может осуществляться с помощью рычага (рис. 5.4, а), равновесие которого определяется соотношением

$$F_x l_x = F_{\text{зад}} l_{\text{зад}},$$

где  $F_x$ ,  $F_{\text{зад}}$  — соответственно контролируемое и заданное усилия;  $l_x$ ,  $l_{\text{зад}}$  — плечи рычага, соответствующие контролируемому и заданному усилиям.

В соответствии с этим выражением сигнал рассогласования

$$\varepsilon = F_{\text{зад}} - F_x l_x / l_{\text{зад}},$$

где  $F_{\text{зад}} = g$ ;  $F_x l_x / l_{\text{зад}} = y$ .

Следовательно, рычаг может быть использован для сравнения усилий.

Сравнение заданного  $p_{\text{зад}}$  и контролируемого  $p_x$  давлений в гидравлических и пневматических устройствах можно рассмотреть на примере схемы, приведенной на рис. 5.4, б. При  $p_x = p_{\text{зад}}$  выходные сигналы одинаковые:  $p_1 = p_2$ , а ИМ находится в состоянии равновесия. При  $p_x > p_{\text{зад}}$  и  $p_1 > p_2$  поршень перемещается вверх. При  $p_x < p_{\text{зад}}$  поршень перемещается вниз.

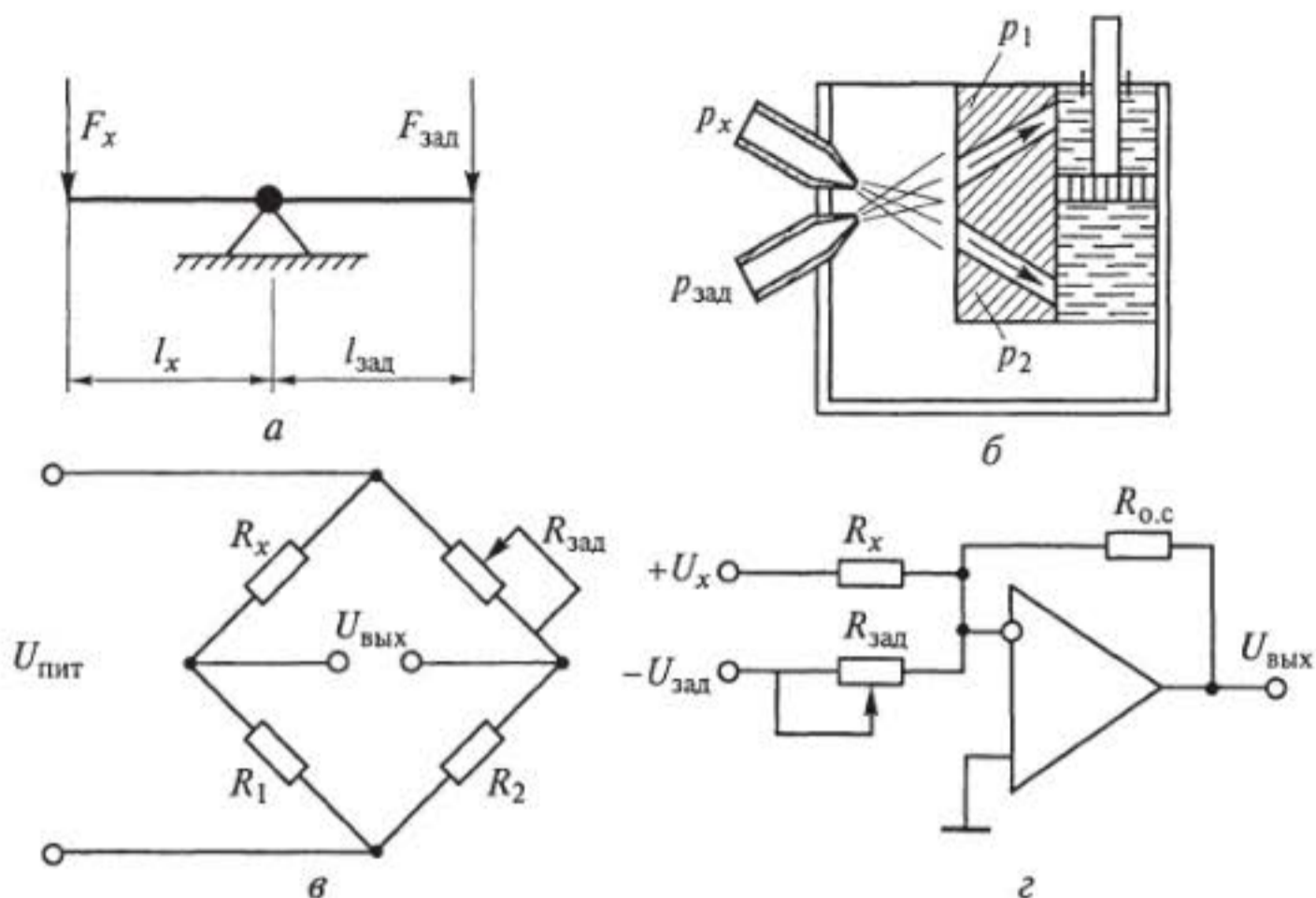


Рис. 5.4. Схемы сравнивающих устройств:

*a* — на базе рычага; *б* — на пневматических элементах; *в* — электрическая мостовая; *г* — на базе операционного усилителя

К электрическим сравнивающим устройствам относятся мостовые, потенциометрические, трансформаторные, дифференциально-трансформаторные схемы, электромеханические устройства, нуль-органы и др.

Мостовая схема сравнения постоянного тока (рис. 5.4, *в*) состоит из задающего резистора  $R_{\text{зад}}$ , датчика  $R_x$ , сопротивление которого зависит от изменения управляемой величины, и двух образцовых резисторов с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ . На одну из диагоналей схемы подают напряжение питания  $U_{\text{пит}}$ , с другой ее диагонали снимают выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ , которое питает ИМ (например, поляризованное реле).

Условие равновесия мостовой схемы определяется равенством произведений сопротивлений ее противолежащих плеч:

$$R_{\text{зад}} R_1 = R_x R_2,$$

в соответствии с которым сигнал рассогласования

$$\varepsilon = R_{\text{зад}} - R_x R_2 / R_1.$$

Считая  $R_{\text{зад}} = g$  и  $R_x R_2 / R_1 = y$ , получим исходное выражение для сигнала рассогласования:

$$\varepsilon = g - y.$$

Электрическое устройство сравнения может быть выполнено на базе операционного усилителя (рис. 5.4, *г*). При этом на датчик

$R_x$  подается напряжение  $+U_x$ , а на задатчик  $R_{зад}$  — напряжение обратной полярности  $-U_{зад}$ .

Выходное напряжение усилителя

$$U_{вых} = -R_{о.с.}(U_x/R_x - U_{зад}/R_{зад}),$$

где  $R_{о.с.}$  — сопротивление обратной связи усилителя.

При использовании операционного усилителя для сравнения напряжений  $U_x$  и  $U_{зад}$ , считая  $R_x = R_{зад} = R_{о.с.}$ , получают выражение  $U_{вых} = U_{зад} - U_x$ , тождественное исходному выражению для сигнала рассогласования, если принять  $g = U_{зад}$  и  $y = U_x$ .

Операционный усилитель может быть также использован для сравнения сопротивлений  $R_x$  и  $R_{зад}$ . Тогда при  $U_x = |U_{зад}|$  получают значение выходного напряжения усилителя, зависимое от изменения  $R_x$ . В этой схеме результат сравнения имеет непрерывную форму.

Наряду с рассмотренными устройствами в автоматике широко распространены устройства сравнения дискретного типа, которые могут выражать отклонение в виде числа (это различные счетчики, шаговые искатели и др.) или в виде логических категорий, например:  $U_1 > U_2$ ,  $I_1 < I_c$ . Примерами устройств последнего типа могут служить различные релейные элементы.

Простейшие реле постоянного или переменного тока срабатывают, когда ток в цепи срабатывания достигает большего значения, нежели установленный для них предел. Следовательно, факт срабатывания — это сигнал «больше»:

$$I > I_{сраб.}$$

Поляризованные реле, имеющие несколько обмоток, могут осуществлять алгебраическое суммирование нескольких величин. Направление переброски якоря определяется знаком сигнала рассогласования.

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение задающего устройства в САУ?
2. Как и в каком виде вводятся заданные величины в различных САУ?
3. Как работают и чем отличаются командоаппараты непрерывного и дискретного действия?
4. Приведите схемы кулачковых задающих устройств.
5. Поясните работу задающего устройства, выполненного по релейной схеме.
6. Какова функция устройств сравнения в составе САУ?
7. Поясните работу электрической мостовой схемы сравнения.
8. Как можно сравнивать механические величины?

## Глава 6

# УСИЛИТЕЛИ

### 6.1. Общие сведения

Во многих системах регулирования мощность сигнала, поступающего от измерительного устройства, недостаточна для осуществления регулирующего воздействия. Следовательно, сигнал необходимо усилить, для этого и служат усилители. Усилитель — это устройство, в котором входной сигнал преобразуется с усилением его мощности, причем выходной сигнал усилителя имеет ту же физическую природу, что и входной. Кроме того, в усилителях путем введения специальных корректирующих устройств формируются заданные зависимости выходных сигналов от входных.

В САУ применяют усилители разного типа: полупроводниковые, магнитные, электромашинные, гидравлические, пневматические и др.

Все усилители имеют цепь подвода энергии, за счет которой осуществляется усиление. В электронных усилителях это энергия питания цепей схемы, в электромашинных — энергия вращения якоря, в гидравлических — энергия установки, поддерживающей давление в гидросистеме.

Основными характеристиками усилителей, работающих в системах автоматики, являются:

- коэффициент усиления;
- линейность статической характеристики;
- быстродействие;
- уровень собственных шумов;
- максимальная выходная мощность.

Для усилителей, работающих в подвижных системах (например, летательных аппаратах), большое значение имеет также вес, приходящийся на единицу выходной мощности.

Полупроводниковые усилители систем автоматики аналогичны усилителям низкой частоты и постоянного тока, применяемым в устройствах связи, измерительной технике и т.п. Широко применяются фазочувствительные усилители постоянного тока.

Для полупроводниковых усилителей характерны большое быстродействие, высокие коэффициенты усиления, низкий уровень собственных шумов. Их максимальная выходная мощность, по

сравнению с другими типами усилителей невелика. Применяются полупроводниковые усилители в основном в входных и промежуточных каскадах. В качестве выходных усилителей они применяются только в системах, имеющих исполнительные устройства небольшой мощности.

## 6.2. Магнитные усилители

Магнитный усилитель представляет собой многообмоточный дроссель с железным сердечником, работающий по принципу изменения индуктивности обмоток переменного тока при подмагничивании сердечника магнитным полем постоянного направления. Магнитные усилители используются для усиления напряжения и мощности.

На рис. 6.1 представлена схема простого однотактного магнитного усилителя, имеющего одну двухсекционную обмотку переменного тока  $w_{\sim}$ , последовательно с которой включена нагрузка усилителя  $R_H$ . На среднем стержне сердечника усилителя намотаны три обмотки:  $w_{упр}$ ,  $w_{о.с}$  и  $w_0$ . На обмотку  $w_{упр}$  подается входной сигнал — постоянный ток  $i_{упр}$ . Обмотка обратной связи  $w_{о.с}$  питается через выпрямитель выходным напряжением усилителя. Цепь обратной связи служит для тех же целей, что и в электронных усилителях: положительная обратная связь увеличивает крутизну статической характеристики и одновременно инерцию усилителя, при отрицательной обратной связи, наоборот, усиление уменьшается и инерция усилителя также уменьшается.

Последний фактор весьма важен для магнитных усилителей, так как они (особенно усилители мощности) имеют малое быстродействие.

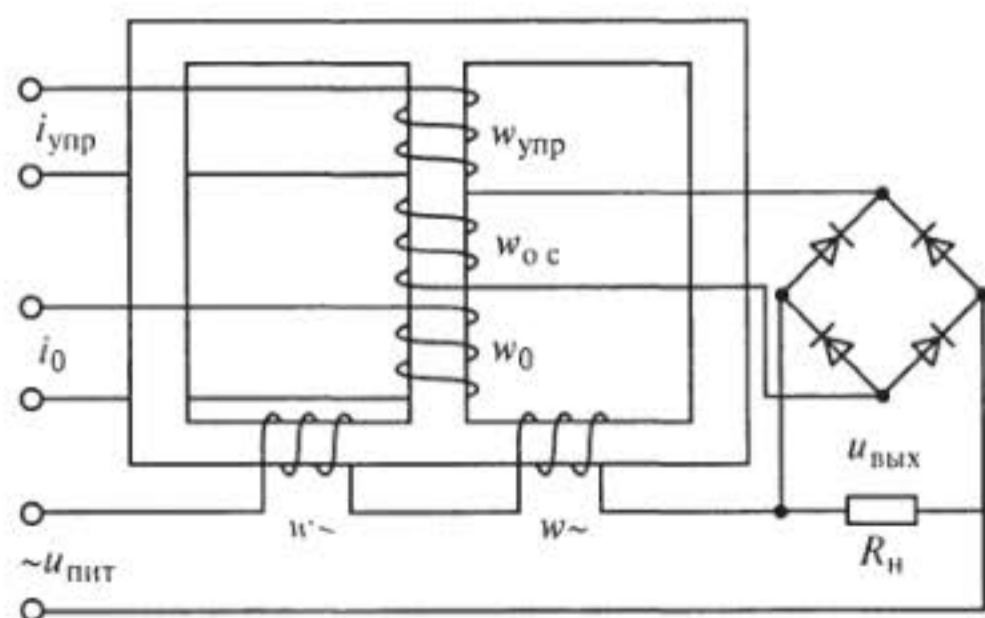
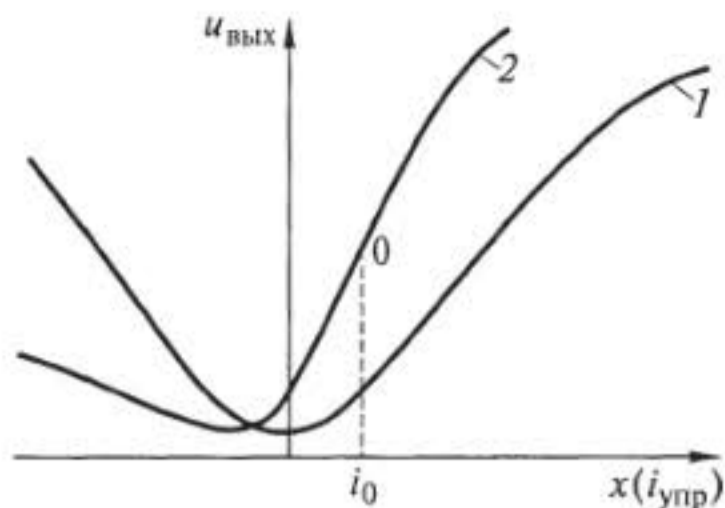


Рис. 6.1. Схема однотактного магнитного усилителя



Рис. 6.2. Статические характеристики однотактного магнитного усилителя:

1 — без обратной связи; 2 — с обратной связью и сдвигом рабочей точки



Нулевая обмотка  $w_0$  питается от независимого источника постоянного тока и служит для сдвига рабочей точки усилителя на линейный участок его характеристики.

При отсутствии входного сигнала индуктивное сопротивление обмотки  $w$  усилителя максимально, а выходной сигнал  $u_{\text{вых}}$  — минимален. При прохождении по управляющей обмотке входного сигнала железо сердечника намагничивается, приближаясь к насыщению, при этом индуктивное сопротивление обмотки  $w$  падает, и ток в цепи  $R_n$ , а следовательно, и  $u_{\text{вых}}$  растет.

При отсутствии тока в обмотке  $w_{0,c}$  статическая характеристика 1 (рис. 6.2) усилителя симметрична относительно оси ординат, и усилитель нечувствителен к полярности входного сигнала.

При включении цепи обратной связи правая ветвь статической характеристики (здесь обратная связь положительна) становится круче, а левая (здесь обратная связь отрицательна) — более пологой (кривая 2).

При подаче в обмотку  $w_0$  тока  $i_0$  (см. рис. 6.1) рабочая точка усилителя сдвигается вправо на середину линейной части характеристики. Теперь при положительной полярности  $i_{\text{упр}}$ , когда ампервитки  $i_{\text{упр}}w_{\text{упр}}$  и  $i_0w_0$  складываются,  $u_{\text{вых}}$  будет расти, а при отрицательной полярности, когда ампервитки  $i_{\text{упр}}w_{\text{упр}}$  вычитаются из ампервитков  $i_0w_0$ , напряжение  $u_{\text{вых}}$  будет уменьшаться, т. е. усилитель приобретает чувствительность к полярности  $i_{\text{упр}}$ . Такой режим работы неудобен наличием значительного сигнала на выходе усилителя при  $i_{\text{упр}} = 0$ .

Лучшую статическую характеристику обеспечивает более сложная двухтактная схема усилителя (рис. 6.3), в которой выходной сигнал (рис. 6.4, кривая 3) образуется как разность выходных сигналов двух усилителей 1 и 2 (см. рис. 6.3), имеющих общую цепь управления (см. рис. 6.4, кривые 1 и 2).

В таком усилителе при  $i_{\text{упр}} = 0$  и выходной сигнал  $u_{\text{вых}} = 0$ . При положительном  $i_{\text{упр}}$  на выходе появляется сигнал  $u_{\text{вых}}$  с определенным фазовым углом, а при отрицательном — с фазовым углом, сдвинутым на  $180^\circ$ .

Положительным качеством магнитных усилителей является низкий уровень собственных шумов, что при использовании их в

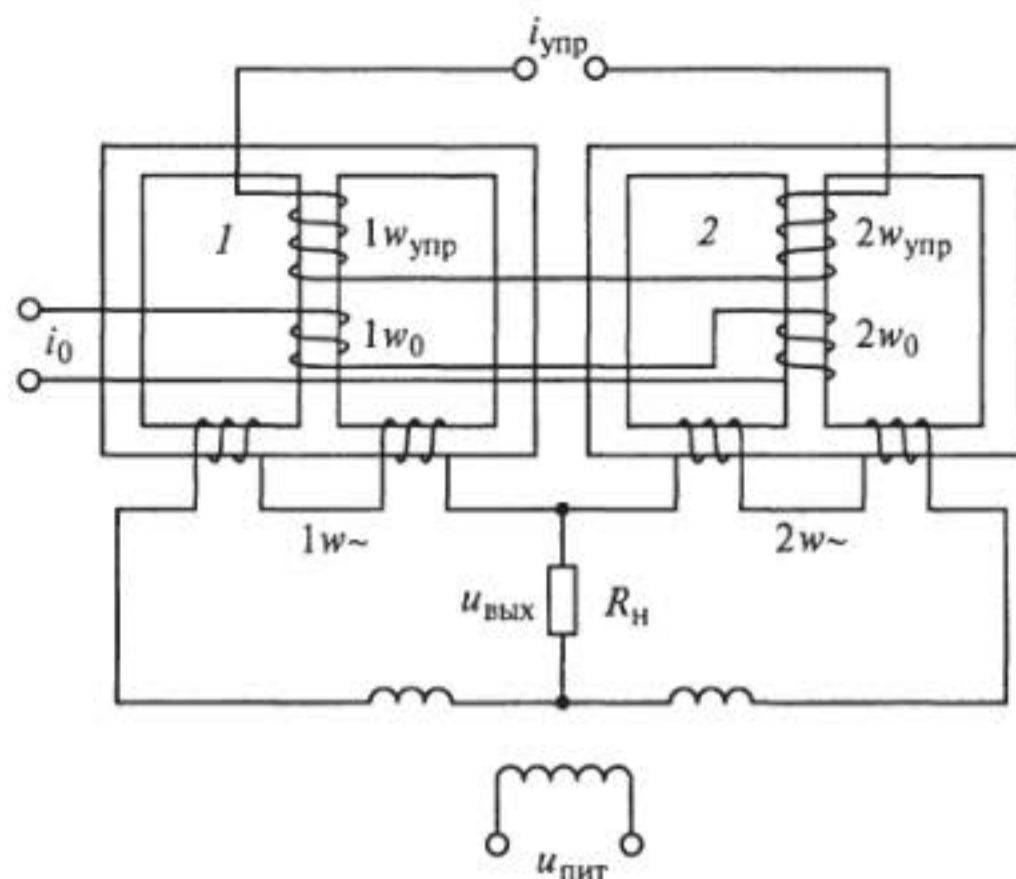


Рис. 6.3. Схема двухтактного магнитного усилителя:  
1, 2 — усилители

качестве усилителей напряжения позволяет получить усиление до  $10^6 \dots 10^7$ . Магнитные усилители мощности обеспечивают усиление порядка  $10^2$ .

Инерционные свойства магнитных усилителей мощности, выполненных из обычной трансформаторной стали, весьма существенны (их постоянные времени порядка  $0,1 \dots 1,0$  с). Усилители напряжения изготавливаются с сердечниками из специальных магнитных материалов. Их инерционные свойства характеризуются постоянными времени порядка  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  с.

Основными достоинствами всех типов магнитных усилителей являются высокие надежность, прочность и долговечность.

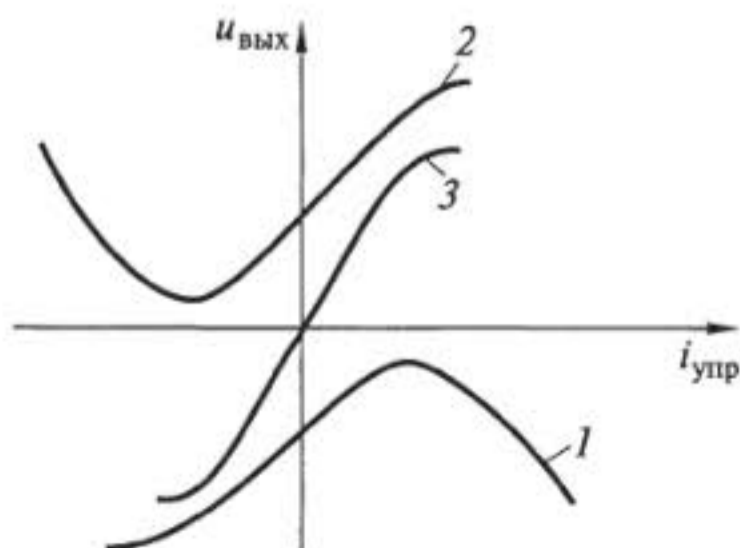


Рис. 6.4. Статические характеристики двухтактного магнитного усилителя:

1, 2 — соответственно двух его усилителей; 3 — суммарная

### 6.3. Электромашинные усилители

Электромашинный усилитель представляет собой генератор постоянного тока, в котором энергия приводного двигателя преобразуется в электрическую энергию выходного сигнала, причем управление этим преобразованием осуществляется полем управляющей обмотки (обмотки возбуждения). При соответствующем выборе параметров достигается линейная зависимость между входным сигналом усилителя — током в обмотке возбуждения и выходным напряжением.

На рис. 6.5 представлены схема простейшего (однокаскадного) усилителя и его статистическая характеристика.

В электромашинном усилителе с поперечным полем (рис. 6.6) существует два каскада усиления, конструктивно объединенных в одноякорном генераторе. Генератор имеет две пары щеток. Одна пара (2—2) расположена по продольной оси, а вторая (3—3) — по поперечной и замкнута накоротко.

На одном из полюсов возбуждения усилителя расположена управляющая обмотка 1, а на другом — компенсационная обмотка 5 с сопротивлением 4, по которой протекает часть тока выходной цепи.

Усилитель работает следующим образом: при вращении якоря и подаче в обмотку 1 входного сигнала возникает поле возбуждения (магнитный поток  $\Phi_p$ ). ЭДС, наводимая в обмотке якоря этим полем, вызывает ток в тех секциях якоря, которые замкнуты накоротко через щетки 3—3. Этот ток довольно значителен, так как он усилен по мощности первым каскадом усилителя и, кроме того, выходное сопротивление этого каскада мало.

Ток, протекающий по цепи короткозамкнутых щеток, создает магнитный поток  $\Phi_q$ , направленный по поперечной оси, который замыкается симметрично через наконечники полюсов маши-

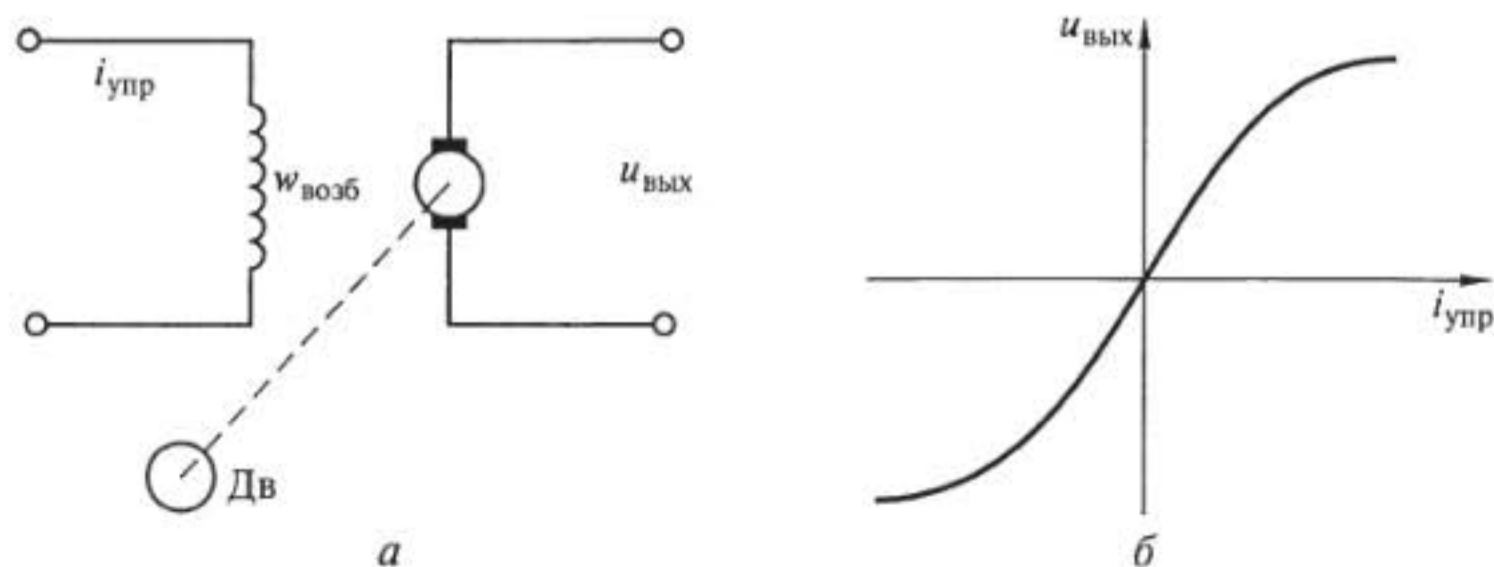


Рис. 6.5. Принципиальная схема простейшего электромашинного усилителя (а) и его статическая характеристика (б)

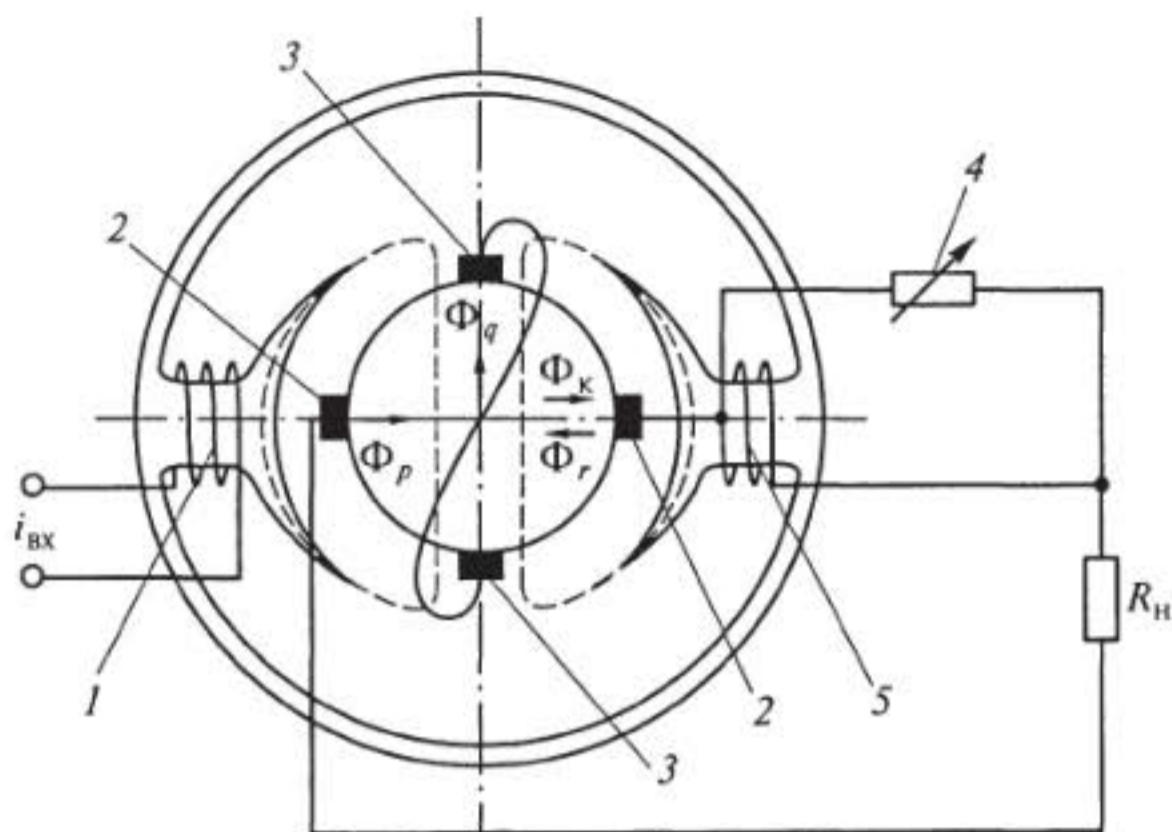


Рис. 6.6. Схема конструкции электромашинного усилителя с поперечным полем:

1 — управляющая обмотка; 2—2 — пара щеток продольного расположения; 3—3 — пара щеток поперечного расположения; 4 — переменное сопротивление компенсационной обмотки; 5 — компенсационная обмотка

ны. Этот поток служит потоком возбуждения для тех секций обмотки якоря, которые соединяются со щетками 2—2. ЭДС, наведенная потоком  $\Phi_q$ , снимается этими щетками и питает цепь нагрузки. Это второй каскад усиления.

При протекании тока по цепи щеток 2—2 возникает поток реакции якоря  $\Phi_r$ , направленный по продольной оси навстречу потоку возбуждения, который вычитается из  $\Phi_p$  (посредством отрицательной обратной связи) и резко снижает усиление. Чтобы обеспечить заданное усиление, вводится положительная обратная связь, компенсирующая влияние  $\Phi_r$ , в виде магнитного потока  $\Phi_k$ , создаваемого компенсационной обмоткой 5. Значение тока в этой обмотке и, следовательно, значение  $\Phi_k$  устанавливаются с помощью переменного сопротивления 4.

Статическая характеристика двухкаскадного усилителя аналогична характеристике на рис. 6.5, б, но имеет большую крутизну, так как усиление его значительно больше, нежели однокаскадного усилителя.

Достоинством электромашинных усилителей является чувствительность к полярности выходного сигнала. Они также имеют большой диапазон выходных мощностей (от десятков до  $10^4$  Вт) и высокий уровень собственных шумов, который при использовании их в выходных каскадах не вносит больших помех в сигнал регулирующего воздействия.

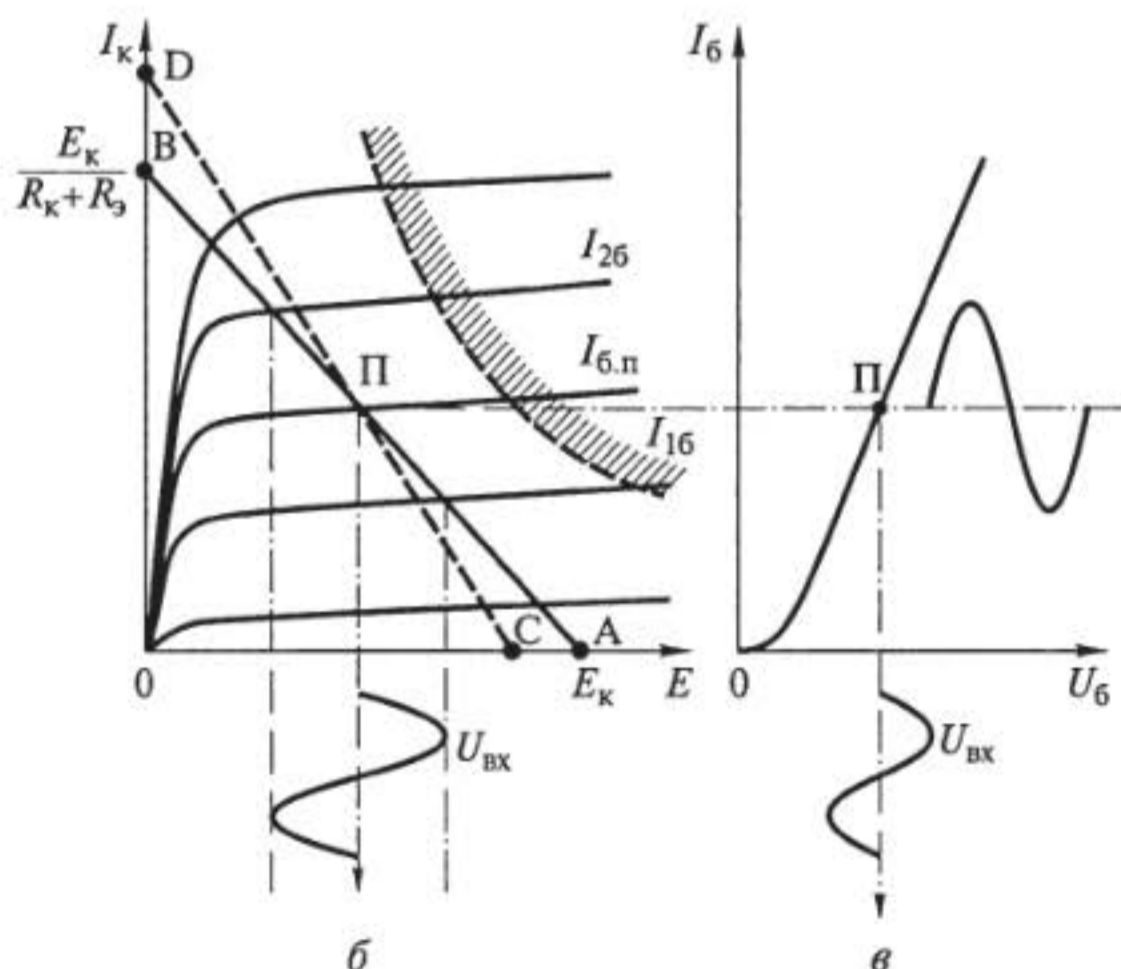
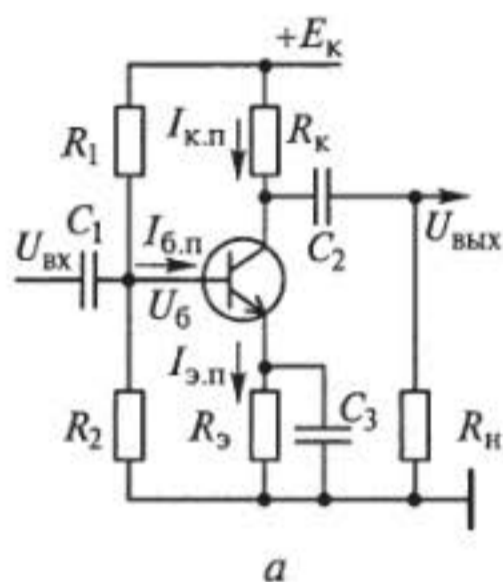
## 6.4. Полупроводниковые усилители

### Усилители на биполярном транзисторе

Схема усилителя на биполярном транзисторе приведена на рис. 6.7, *a*. В этой схеме сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  задают режим покоя (П) каскада, при котором в транзисторе протекают только постоянные токи покоя базы  $I_{б.п}$ , коллектора  $I_{к.п}$  и эмиттера  $I_{э.п}$ . Также на базе, коллекторе и эмиттере действуют постоянные напряжения покоя  $U_{б.п}$ ,  $U_{к.п}$ ,  $U_{э.п}$ .

Емкости  $C_1$  и  $C_2$  — разделительные. Емкость  $C_1$  препятствует протеканию постоянного тока с делителя  $R_1$ ,  $R_2$ , а емкость  $C_2$  препятствует прохождению постоянного напряжения на сопротивле-

Рис. 6.7. Схема (*a*), входная (*б*) и выходная (*в*) статические вольт-амперные характеристики усилителя на биполярном транзисторе



ние  $R_n$  (на котором будет переменная составляющая коллекторного напряжения). Сопротивление  $R_3$  определяет ток покоя через транзистор при заданном напряжении  $U_{б.п.}$ . Это сопротивление для переменного сигнала является отрицательной обратной связью, предназначенной для стабилизации режима покоя транзистора при изменении его температуры. Например, при увеличении из-за роста температуры тока коллектора покоя  $I_{к.п.}$  возрастают ток эмиттера покоя  $I_{э.п.}$  и падение напряжения на сопротивлении  $R_3$ , поскольку  $U_{э.п.} = I_{э.п.} R_3$ .

Так как напряжение  $U_{б.п.}$  фиксировано делителем  $R_1, R_2$ , то с увеличением  $U_{э.п.}$  происходит закрывание транзистора, что приводит к уменьшению коллекторного тока. Происходит автоматическая балансировка режима работы транзистора в режиме покоя.

Введение сопротивления  $R_3$  изменяет работу каскада и при усилении переменного входного сигнала. Переменный ток эмиттера создает на этом сопротивлении падение напряжения  $U_3 = I_3 R_3$ , которое уменьшает усиливаемое напряжение. Коэффициент усиления каскада

$$K = R_k / R_3.$$

Для исключения протекания переменного тока через сопротивление  $R_3$  его необходимо шунтировать сопротивлением  $C_3$ , при наличии которого общее сопротивление в цепи эмиттера

$$R_{э.о} = \frac{R_3 X_C}{R_3 + X_C},$$

где  $X_C = \frac{1}{i\omega C}$ .

Расчет параметров каскада в режиме покоя по постоянному току проводят графоаналитическим методом с использованием статических входных и выходных вольт-амперных характеристик (рис. 6.7, б, в).

Для определения параметров выходного сигнала в динамическом режиме усиления сопротивление нагрузки  $R_n$  подключается параллельно сопротивлению  $R_k$ . Тогда общее сопротивление в цепи коллектора  $R_{к.о} = R_k R_n / (R_k + R_n)$ . При этом следует учитывать, что  $X_{C_2} = 0$ .

Сопротивление  $R_k > R_{к.о}$ , поэтому нагрузочная прямая (см. рис. 6.7, б) проходит по линии  $СД$ .

Рассмотренный каскад дает ограниченное усиление из-за того, что сопротивление  $R_k$  определяет рабочую точку на выходных характеристиках по постоянному току с учетом допустимых нелинейных искажений. С увеличением  $R_k$  нелинейные искажения увеличиваются.

## Усилители напряжения на полевом транзисторе

Схема усилителя на полевом транзисторе приведена на рис. 6.8, а, а его эквивалентная схема показана на рис. 6.8, б. Емкость  $C_0$  является здесь входной емкостью второго каскада.

По эквивалентной схеме можно рассматривать работу усилителя на различных частотах. В средней части частотного диапазона от 200 до 3000 Гц сопротивление емкости  $C_0$  достаточно большое, и оно не шунтирует сопротивления  $R_c$  и  $R_1$ , поэтому общее сопротивление в стоке транзистора

$$R_{o.c} = \frac{R_c R_1}{R_c + R_1}.$$

Коэффициент усиления каскада

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{I_c R_{o.c}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\mu R_{o.c}}{R_{o.c} + R_i} = \frac{\mu}{1 + R_i/R_{o.c}} = \frac{\mu\alpha}{1 + \alpha},$$

где  $I_c$  — ток в стоке транзистора;  $\mu$  — статический коэффициент усиления полевого транзистора;  $\alpha = R_i/R_{o.c}$  — коэффициент нагрузки.

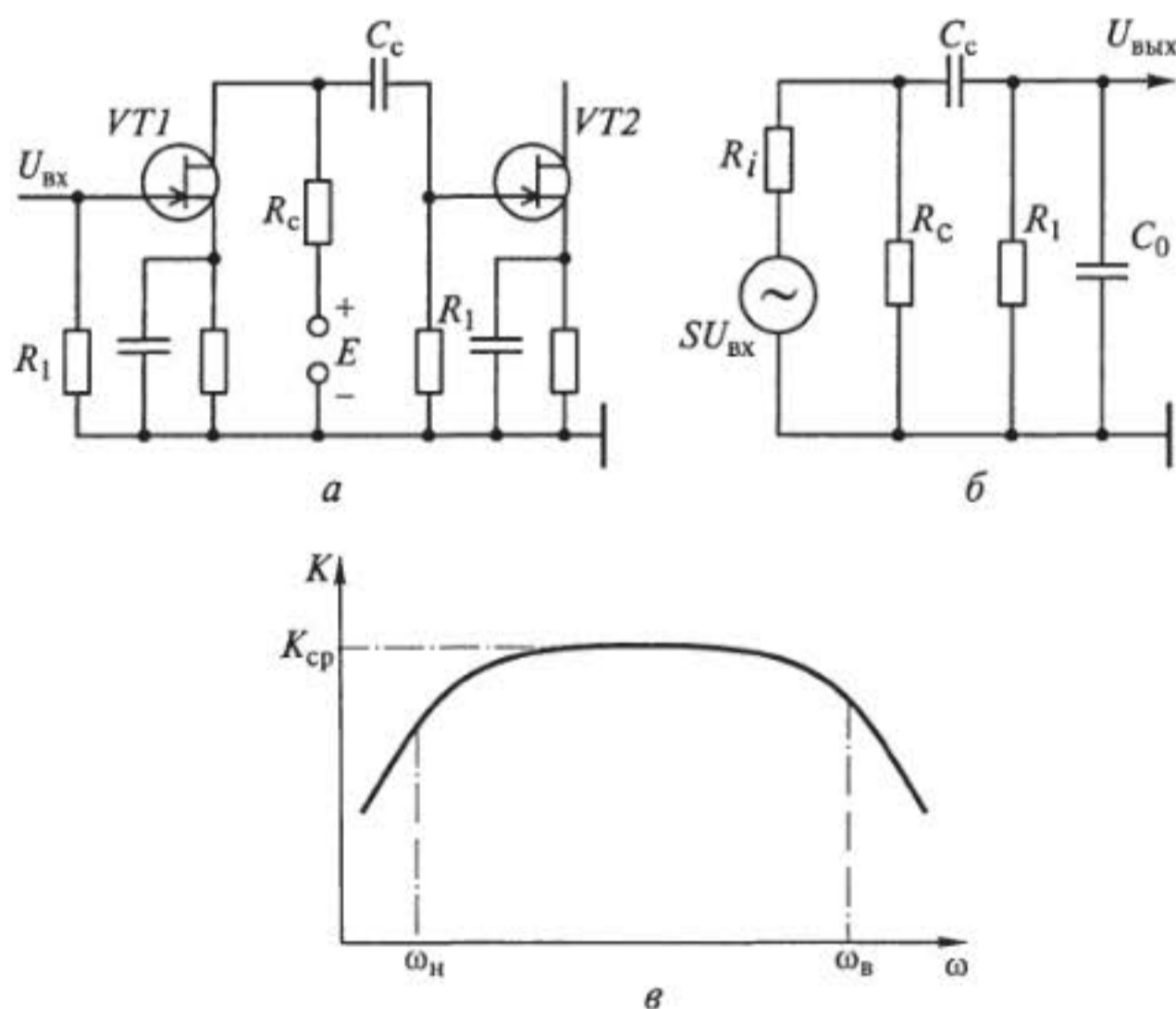


Рис. 6.8. Схема усилителя напряжения на полевом транзисторе (а), его эквивалентная схема (б) и частотная характеристика (в):

$\omega_{\text{н}}$ ,  $\omega_{\text{в}}$  — соответственно нижняя и верхняя граничные частоты

При  $R_i \gg R_1$ ,  $R_1 \gg R_c$  можно считать  $R_i/R_c \gg [1 + R_i/R_1]$ , и тогда коэффициент усиления в средней части частотного диапазона

$$K_{\text{ср}} = \mu / (R_i/R_c) = SR_c,$$

где  $S$  — крутизна характеристики полевого транзистора.

Частотная характеристика рассматриваемого усилителя приведена на рис. 6.8, в.

Для увеличения коэффициента усиления выбирают большее сопротивление  $R_c$ , но при этом уменьшается частотный диапазон усилителя, поэтому для полевых транзисторов принимают  $R_c = (0,01 \dots 0,25)R_i$ .

Сопротивление  $R_1$  должно быть в 5... 10 раз больше  $R_c$ , но при этом оно не должно превышать 2 МОм, так как в этом случае на нем создается напряжение смещения за счет токов утечки затвора. Кроме того, с увеличением номинала резистора  $R_c$  снижается эффективное напряжение сток — исток.

### Операционные усилители

Операционные усилители (ОУ), широко применяемые в электронной аппаратуре за счет своей универсальности и многофункциональности, представляют собой специальные усилители постоянного тока.

Электрические схемы ОУ весьма разнообразны. Например, они могут быть с одним или двумя входами; также различают ОУ с параметрической компенсацией дрейфа нуля, преобразованием сигнала и автоматической коррекцией дрейфа нуля.

В усилителях с непосредственными связями компенсация дрейфа нуля осуществляется за счет построения входных каскадов по симметричной балансирной или дифференциальной схеме.

В усилителях с преобразованием сигнала для усиления постоянной составляющей используется импульсная стабилизация типа модуляция — усиление — демодуляция.

Автоматическая коррекция дрейфа нуля может быть периодической и непрерывной.

Для ОУ принципиальное значение имеют три параметра: входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$ , скорость нарастания выходного сопротивления  $\rho = \Delta U_{\text{вых}}/\Delta T$  (где  $\Delta U_{\text{вых}}$  — выходное напряжение сдвига;  $\Delta T$  — разность температур) и температурный дрейф напряжения смещения  $\Delta U_{\text{см}}/\Delta T = 1 \dots 5$  мкВ/°С. Любой из этих параметров может быть улучшен, но за счет ухудшения других.

По указанным параметрам различают ОУ:

прецизионные, предназначенные для применения в контрольно-измерительной аппаратуре;



быстродействующие для схем, где требуются широкая полоса пропускания, высокая скорость нарастания выходного напряжения и малое время установления выходного напряжения;

универсальные или средней точности;

микроомощные и программируемые, в которых рабочий ток задается внешним резистором;

с высоким входным сопротивлением;

малозумящие;

многоканальные (двух-, трех- и четырехканальные);

мощные.

Прецизионные, быстродействующие, микроомощные, малозумящие широкополосные ОУ относятся к классу специализированных, поскольку один или несколько параметров у них имеют значение, близкое к предельному.

### Универсальные ОУ

На рис. 6.9, а приведена базовая схема двухкаскадного универсального ОУ, содержащая входной дифференциальный усилитель на транзисторах  $VT1...VT4$  и второй каскад усиления с общим эмиттером — транзисторы  $VT5$  и  $VT6$ . На выходе схемы включен двухтактный усилитель мощности — эмиттерный повторитель. Второй каскад усиления работает как интегратор на высоких частотах, поскольку на инвертирующем входе (базе  $VT5$ ) включен конденсатор коррекции с емкостью  $C = 30$  пФ.

Работу входного дифференциального каскада можно проиллюстрировать диаграммой распределения токов усилителя КР140УД7, показанной на рис. 6.9, б. При равенстве входных напряжений токи эмиттеров транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  равны току  $I_1$ , поэтому одинаковы и токи эмиттеров транзисторов  $VT3$  и  $VT4$ . При этом по-

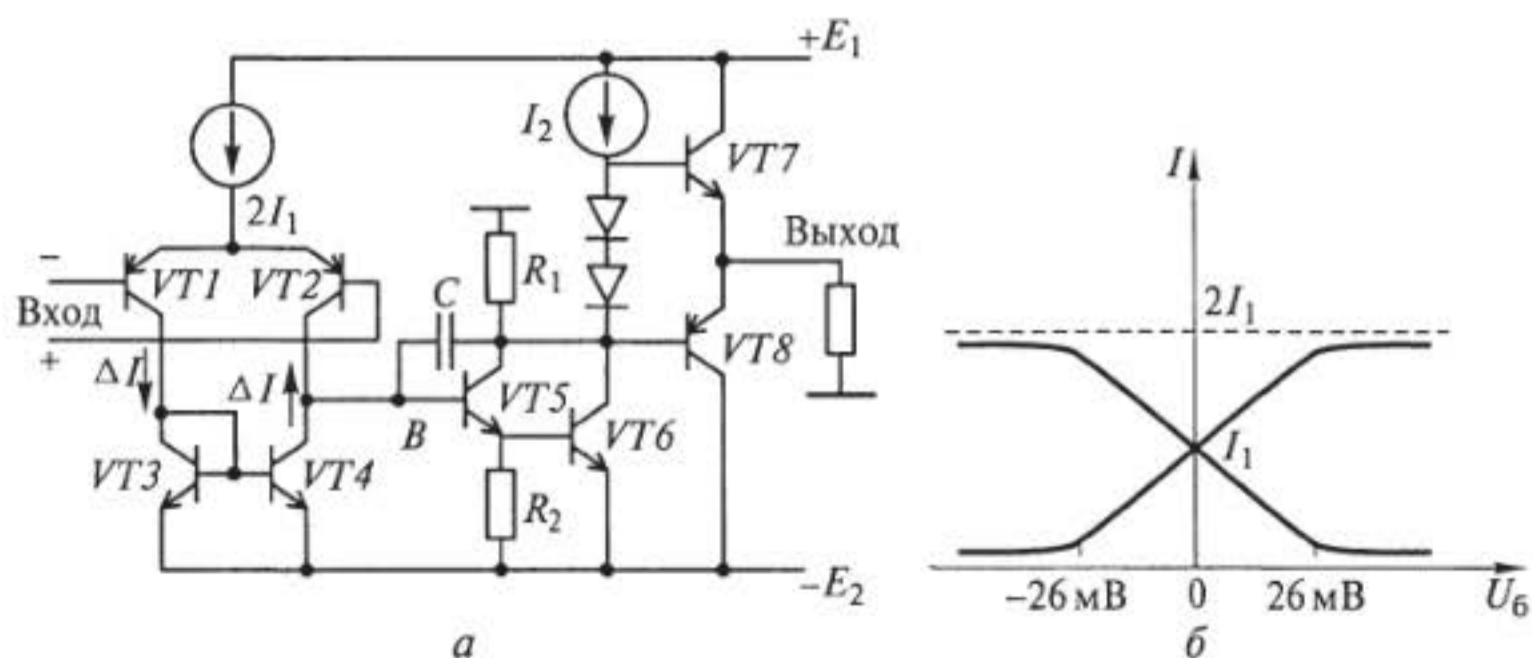


Рис. 6.9. Базовая схема (а) и диаграмма распределения токов (б) универсального ОУ

лагают, что базовые токи транзисторов пренебрежимо малы. При идентичности технологических параметров токи транзисторов  $VT4$  и  $VT3$  всегда будут равны. Такое включение транзисторов называют «зеркалом токов». Потенциал точки  $B$  (см. рис. 6.9,  $a$ ) — выхода дифференциального усилителя равен примерно  $2U_{6-3}$ . Когда появляется напряжение между входами ОУ, токи эмиттеров транзисторов  $VT1$  и  $VT2$  изменяются на значение  $\pm U_{вх}/(2 \times 26)$  мВ.

Допустим, что ток транзистора  $VT1$  получил приращение  $\Delta I = U_{вх}/(2 \times 26)$  мВ. Тогда ток транзистора  $VT2$  должен уменьшиться на такую же величину, поскольку оба эти транзистора питаются от генератора стабильного тока.

Нагрузка «зеркало токов» удваивает изменение тока на выходе первого каскада. Действительно, в точку  $B$  поступает ток  $\Delta I_{вых1} = -2\Delta I$ , поскольку второе приращение  $\Delta I$  есть отклик коллекторной цепи транзистора  $VT4$  на изменение его базового напряжения, которое, в свою очередь, вызвано приращением тока транзистора  $VT3$  на величину  $\Delta I$ .

Далее сигнал усиливается вторым каскадом на транзисторах  $VT5$  и  $VT6$  и поступает на усилитель мощности, построенный на транзисторах  $VT7$  и  $VT8$ . Токи  $I_1$  и  $I_2$  каскадов ОУ стабилизируются различными по конфигурации схемами внутренней стабилизации.

### Прецизионные операционные усилители

В измерительных устройствах необходимо усиливать без искажения слабые сигналы датчиков, сопровождаемые значительным уровнем синфазных, температурных и других помех. Прецизионные усилители, используемые для этих целей, должны обладать не только очень большими значениями коэффициентов усиления (более  $10^5$ ) и подавления синфазного сигнала, но и малым напряжением смещения нуля (не более 0,5 мВ) и его дрейфом, малым уровнем шумов и большим входным сопротивлением. Для построения такого усилителя, называемого иногда инструментальным и способного с большой точностью фиксировать эти параметры, обычно используются два-три ОУ общего применения с несколькими высокоточными, хорошо подобранными по температурным коэффициентам резисторами отрицательной обратной связи, от которых в значительной мере зависит погрешность усиления.

Приемлемую схему инструментального усилителя можно получить, если на входе универсального ОУ использовать специальный прецизионный усилитель с небольшим коэффициентом усиления напряжения, но с высоким входным сопротивлением и малым дрейфом напряжения смещения. Такой входной каскад обеспечит точный прием и неискаженную передачу информации для дальнейшей обработки на универсальный ОУ, который, в свою очередь, обеспечит требуемый коэффициент усиления (более  $10^5$ ).



Рис. 6.10. Прецизионный ОУ типа КМ551УД1:

*a* — схема включения; *б* — принципиальная схема; *в* — схема цепей частотной коррекции

В настоящее время по этому принципу разработано несколько ОУ. Прецизионный усилитель КМ551УД1 имеет малое напряжение смещения нуля (менее 0,5 мВ), малые уровни дрейфа нуля и шумов и  $K > 10^6$ . Но основным достоинством этого ОУ является то, что он позволяет поддерживать с высокой точностью большое значение коэффициента усиления операционного усилителя, замкнутого отрицательной обратной связью. Таким образом можно получить  $K = (1000 \pm 0,3) \%$ .

Характеристики данного усилителя обеспечиваются входным каскадом, который построен по простой дифференциальной схеме с резисторными нагрузками (рис. 6.10, *a*).

Для уменьшения дрейфов входные транзисторы *VT1* и *VT2* представляют как параллельные соединения двух транзисторов (рис. 6.10, *б*).

Амплитудно-частотная характеристика ОУ корректируется двумя цепями частотной коррекции (рис. 6.10, *в*).

### Мощные операционные усилители

Операционный усилитель К157УД1 представляет собой мощный усилитель с выходным током до 0,5 А, построенный по классической двухкаскадной схеме на основе полупроводниковой технологии с изоляцией *p-n*-перехода (рис. 6.11, *a*). Кристалл ОУ помещается в прямоугольный пластмассовый корпус, позволяющий рассеивать значительную мощность. Характеристики этого ОУ приведены на рис. 6.11, *б*.

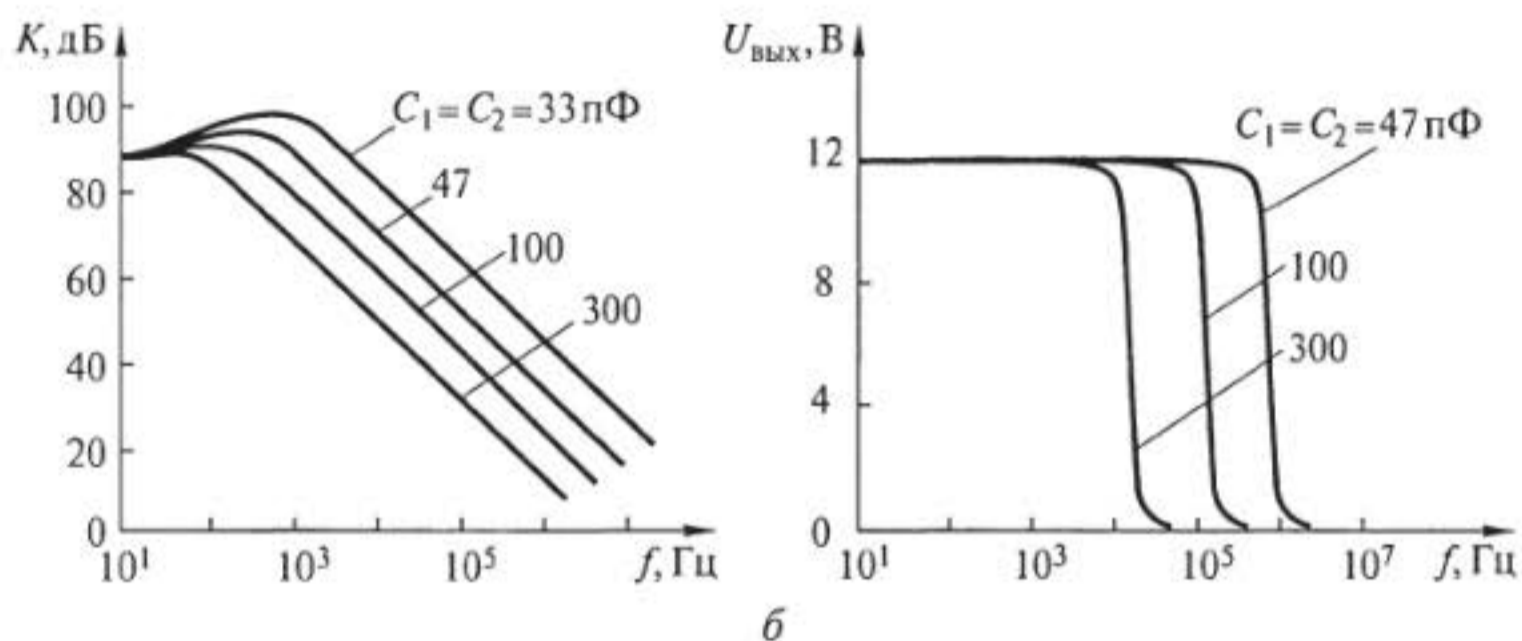
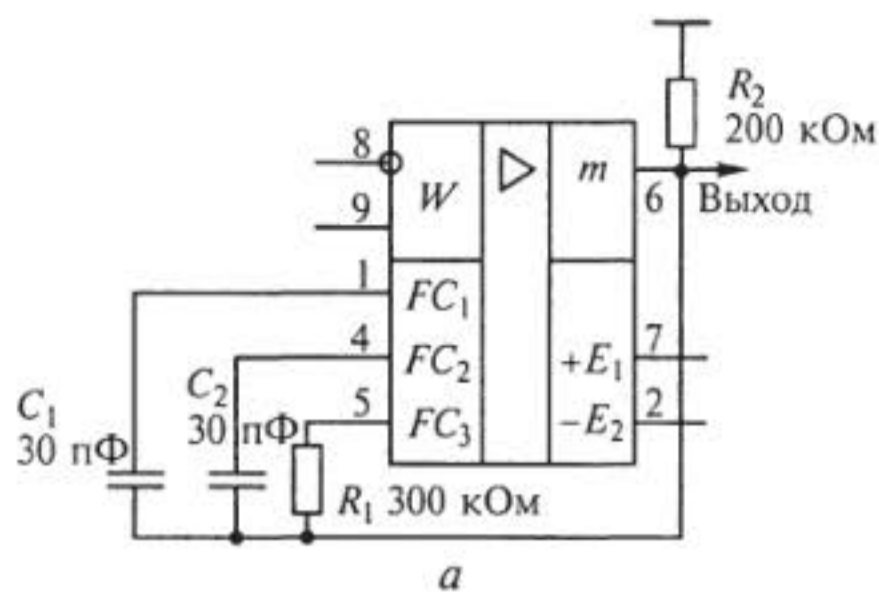


Рис. 6.11. Схема включения (а) и частотные характеристики (б) мощного ОУ типа К157УД1

### Операционные усилители в моделировании математических операций

С помощью ОУ можно моделировать различные математические преобразования. На базе этих элементов строятся аналоговые вычислительные машины.

На рис. 6.12, а представлена схема *инвертирующего усилителя*. Для расчета элементов этого усилителя воспользуемся двумя положениями:

напряжения на инвертирующем и неинвертирующем входах равны, т. е.  $U_+ = U_-$ ;

входной ток усилителя равен нулю по любому из входов, т. е.  $I_1 = I_2 = 0$ .

В данной схеме  $U_+ = 0$ , а значит, и  $U_- = 0$ . Следовательно, входной ток  $I_{вх} = U/R_1$ . Ток  $I_2$ , протекающий через резистор  $R_2$ , равен  $U/R_2$ . Так как ток  $I_{вх} = I_2$ , то  $U_{вх}/R_1 = U_{вых}/R_2$ , и коэффициент передачи

$$K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = R_2/R_1.$$

На рис. 6.12, б показана схема инвертирующего сумматора, выходной сигнал которого описывается выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(U_1 R/R_1 + U_2 R/R_2 + U_3 R/R_3 + \dots + U_n R/R_n).$$

Схема инвертора с регулируемым усилением изображена на рис. 6.12, в. Его выходной сигнал

$$U_{\text{ВЫХ}} = -KU/(1 - K).$$

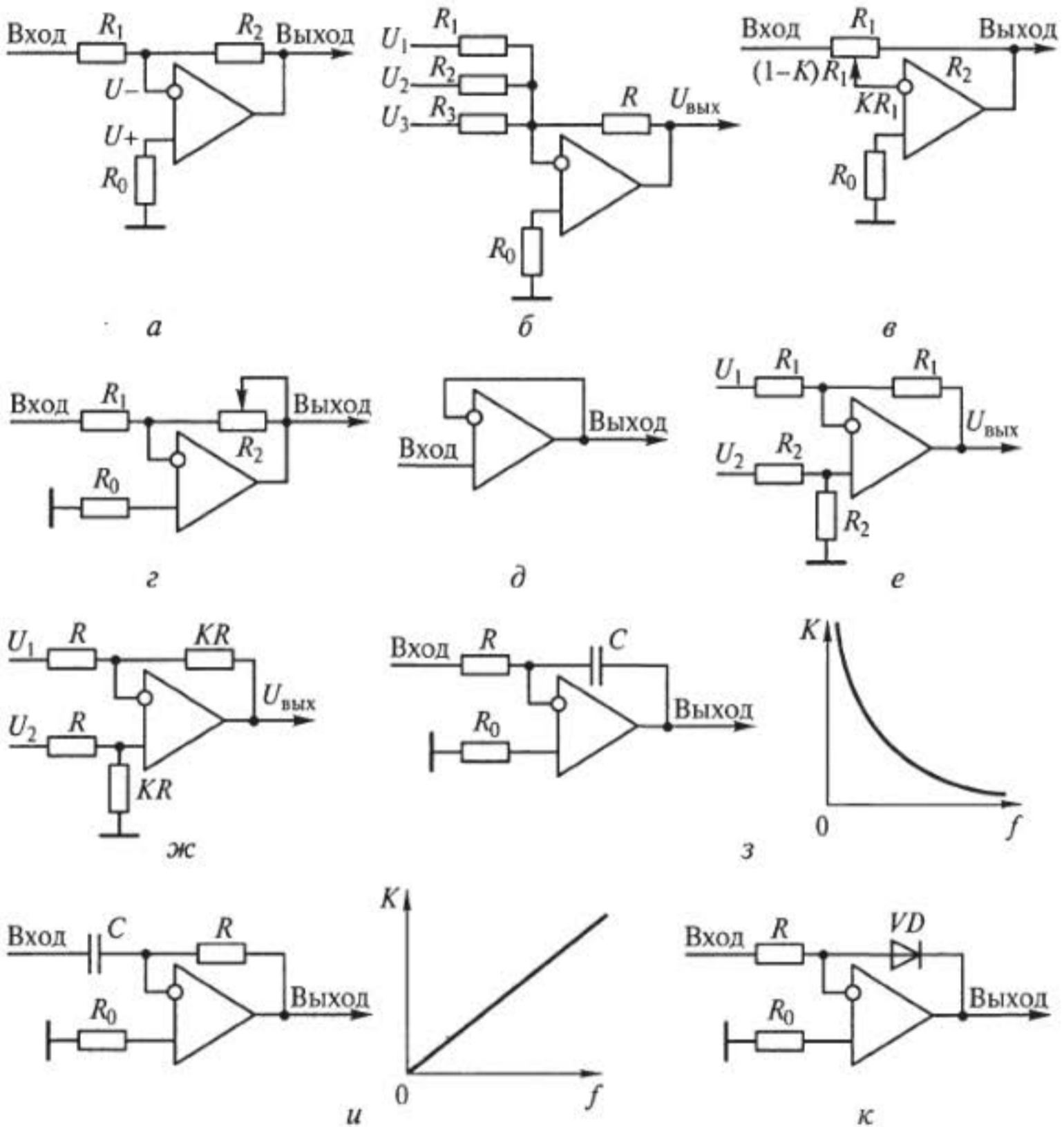


Рис. 6.12. ОУ для моделирования математических операций:

а — инвертирующий усилитель; б — инвертирующий сумматор; в — генератор с регулируемым усилением; г — инвертор-усилитель с линейной зависимостью; д — повторитель; е — каскад вычитания; ж — усилительное вычитающее устройство; з — аналоговый интегратор и его частотная характеристика; и — идеальный дифференциатор и его частотная характеристика; к — логарифмический усилитель

Схема инвертора-усилителя с линейной зависимостью усиления от положения движка показана на рис. 6.12, г. Его передаточное уравнение имеет вид

$$U_{\text{вых}} = -kR_2 U_{\text{вх}} / R_1,$$

где  $k$  — часть переменного сопротивления  $R_2$ .

В схеме повторителя, показанной на рис. 9.18, д,  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$ .

В каскаде вычитания двух входных сигналов, показанном на рис. 6.12, е, выполняется следующее равенство:  $I_{\text{вх}} = I_{\text{вых}}$ . Тогда  $(U_1 - U_+)/R_1 = (U_{\text{вых}} - U_+)/R_1$  и  $U_1 - U_+ = U_{\text{вых}} + U_+$ .

Учитывая, что  $U_- = U_2/2 = U_+$ , получим

$$U_1 - U_2/2 = U_{\text{вых}} + U_2/2,$$

или

$$U_1 - U_2/2 - U_2/2 = U_{\text{вых}}.$$

Тогда выражение для выходного напряжения можно записать в виде

$$U_{\text{вых}} = U_+ - U_2.$$

Схема усилительного вычитающего устройства показана на рис. 6.12, ж. Его передаточная функция описывается выражением

$$U_{\text{вых}} = K(U_2 - U_1).$$

Схема аналогового интегратора и его частотная характеристика показаны на рис. 6.12, з. Передаточная функция аналогового интегратора описывается выражением

$$U_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{RC} \int U t dt.$$

Схема идеального дифференциатора и его частотная характеристика показаны на рис. 6.12, и. В этом каскаде для высоких частот коэффициент усиления принимает максимально возможное значение.

Схема логарифмического усилителя показана на рис. 6.12, к. Для этого каскада можно составить следующее уравнение:

$$U_{\text{вых}}/R = I_0 \exp(SU_{\text{вых}}),$$

где  $S$  — коэффициент пропорциональности.

Передаточная функция этого усилителя описывается выражением

$$U_{\text{вых}} = A \lg(U_{\text{вх}}/I_0 R),$$

где  $A$  — коэффициент передачи.

Во всех схемах с ОУ на свободный от функций входной вывод подключается резистор  $R_0$ , номинал которого определяется суммарным сопротивлением по другому входу.

### Электрометрические и измерительные усилители

Электрометрические и измерительные усилители предназначены для измерения напряжения и тока сверхмалых значений. Измерение напряжения производится в диапазоне от 0 до 100 мВ, а измерение тока — от  $10^{-16}$  до  $10^{-3}$  А. Для этих усилителей основным параметром является большое входное сопротивление, а работают они в области частот от 0 до 10 Гц. Основные их погрешности определяют временной и температурный дрейфы нуля. Если на входе такого усилителя сигнал равен нулю, то его выходной сигнал также должен быть равен нулю, причем сколь угодно долго. Однако выполнить это условие практически невозможно. Создать усилитель с большим входным сопротивлением и малыми дрейфами на биполярном транзисторе путем введения отрицательной обратной связи невозможно. По этой причине практически все схемы таких усилителей имеют входной каскад с полевыми транзисторами. Данные усилители нашли большое применение для усиления малых сигналов и потенциалов различных датчиков.

На рис. 6.13 показаны схема и характеристики термостабильного электрометрического усилителя, который позволяет измерять минимальный ток  $10^{-5}$  А. Его выходное напряжение при этом равно 50 мВ. Усилитель содержит входной каскад на сборке полевых транзисторов *DA1*. Сигнал с полевых транзисторов подается на вход ОУ. Для балансировки схемы служат сопротивления  $R_5$  и  $R_{10}$ . Временной дрейф схемы составляет 20 мВ/ч, а температурный — 5 мВ/°С.

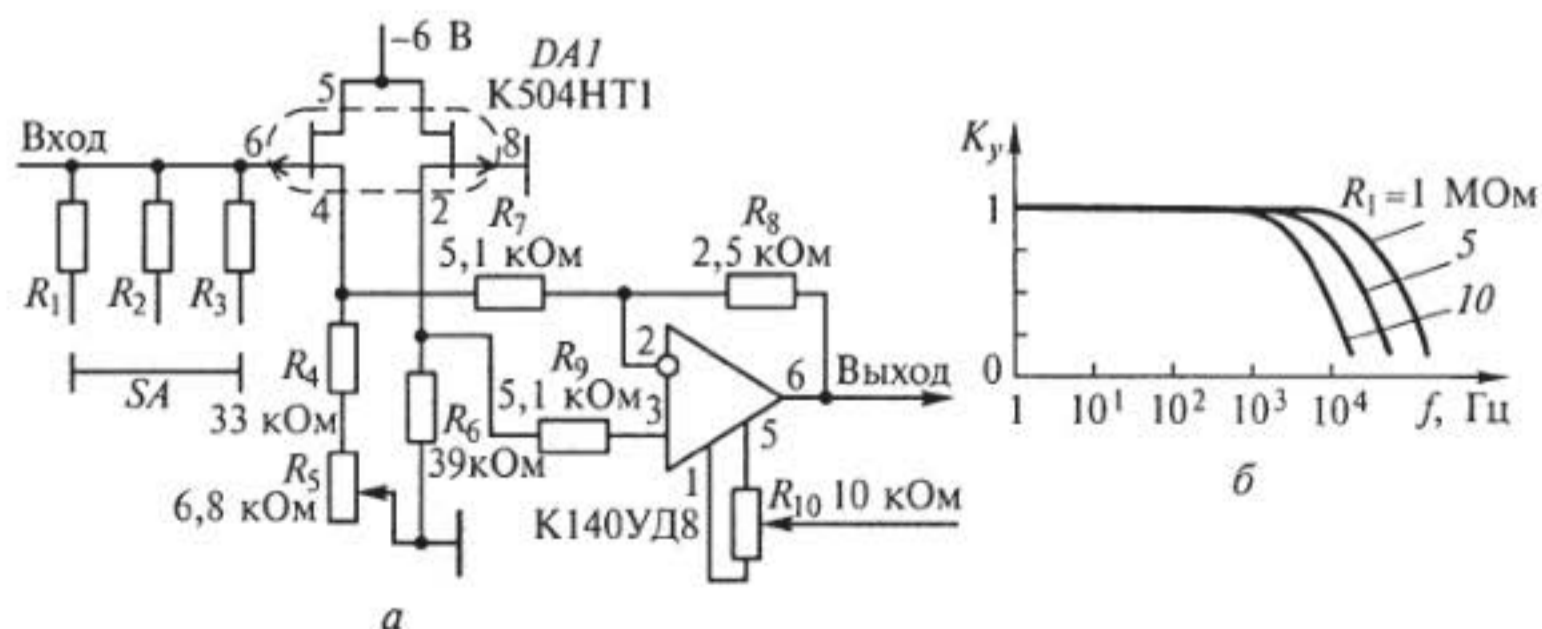


Рис. 6.13. Схема (а) и частотные характеристики (б) электрометрического усилителя

## Многокаскадные усилители

Разработка многокаскадных усилителей обусловлена тем, что получить большой (более 100) коэффициент усиления на одном активном элементе практически нельзя. В то же время в многокаскадных усилителях при большом коэффициенте усиления не должно возникать паразитных колебаний, возбуждение которых в этих усилителях явление рядовое.

Для исключения паразитных возбуждений приходится применять специальные меры:

разделение общего коэффициента усиления на нечетное число каскадов;

питание каждого каскада от своего источника (или использование индивидуальной конденсаторной развязки);

максимальное удаление выхода последнего каскада от входа первого каскада.

Существуют два принципа построения многокаскадных усилителей: с конденсаторной развязкой между каскадами и гальваническим соединением каскадов.

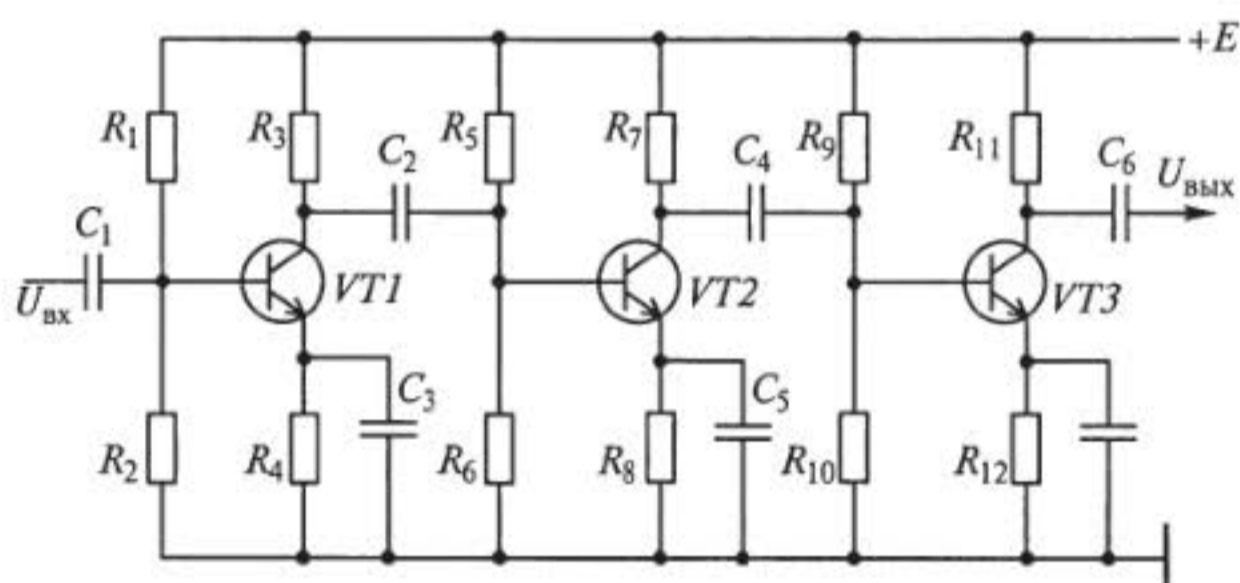


Рис. 6.14. Схема трехкаскадного усилителя с конденсаторной развязкой

- ✓ На рис. 6.14 показана схема трехкаскадного усилителя с конденсаторной развязкой. Режим по постоянному току в этом усилителе у каждого каскада свой, а входной переменный сигнал проходит от каскада к каскаду через разделительные конденсаторы.

## Усилители мощности

Мощные усилители низкой частоты гармонических сигналов являются необходимым элементом любых систем.

К числу основных характеристик усилителей мощности относятся:

- коэффициент усиления;
- диапазон рабочих частот;



динамическая характеристика;  
 амплитудно-частотная характеристика;  
 фазочастотная характеристика;  
 амплитудная характеристика;  
 уровень нелинейных искажений;  
 коэффициент полезного действия;  
 входное сопротивление;  
 выходное сопротивление.

Одним из основных параметров этих усилителей является *коэффициент усиления по мощности*, который зависит от сопротивления нагрузки и входного сопротивления, а также от изменения питающего напряжения.

*Диапазон рабочих частот* — это полоса частот усилителя, в которой коэффициент усиления остается неизменным. Хорошие усилители низких частот (УНЧ) имеют рабочую полосу частот от 16 Гц до 20 кГц, а УНЧ с удовлетворительными качествами — от 50 Гц до 10 кГц, причем неравномерность коэффициента усиления в этой полосе частот составляет менее 5 дБ.

*Нелинейные искажения* обусловлены динамической характеристикой УНЧ. Их полное отсутствие в усилителях принципиально невозможно из-за нелинейности реальных характеристик транзисторов, т. е. на степень нелинейных искажений в УНЧ оказывают влияние электрическая схема и режимы работы транзисторов. Количественно степень нелинейных искажений оценивается коэффициентом гармоник  $K_r$ , который определяет их относительную интенсивность. Допустимые значения  $K_r$  для измерительных усилителей менее 0,1 %, а для акустических — менее 3 %.

При повышении уровня входного сигнала УНЧ увеличивается его выходная мощность, но возрастает и уровень нелинейных искажений. Искажения менее 1 % для усилителей определенной мощности на выходе считаются небольшими и вполне допустимыми для качественного воспроизведения звука.

Динамический диапазон усилителя — это разность  $U_{\max} - U_{\min}$ , где  $U_{\min}$  — превышение номинального уровня выходного сигнала над минимальным уровнем, еще различимым на фоне собственных шумов. Верхний предел выходного сигнала, ограничивается заданной нормой нелинейных искажений и номинальным питающим напряжением.

Схема бестрансформаторного усилителя мощности приведена на рис. 6.15. Мощность данного усилителя в нагрузке

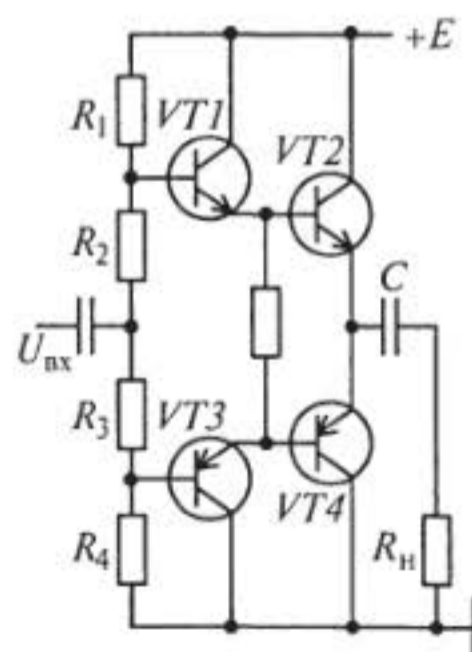


Рис. 6.15. Схема бестрансформаторного усилителя мощности

$P_n = 10$  Вт; сопротивление нагрузки (динамика типа 0,5 ГД14)  
 $R_n = 8$  Ом; полоса частот от нижней граничной  $f_n = 250$  Гц до  
верхней граничной  $f_v = 10\,000$  Гц; коэффициент гармоник  $K_r =$   
 $= 10\%$ .

### Контрольные вопросы

1. Каковы назначение усилителей в составе САУ и их основные характеристики?
2. Каковы принцип действия и характеристики однотактного магнитного усилителя?
3. Каковы схема и преимущества двухтактного магнитного усилителя?
4. В чем заключается принцип действия электромашинного усилителя и какова его статическая характеристика?
5. Поясните схему и принцип действия электромашинного усилителя с поперечным полем.
6. Как работает схема усилителя на биполярном транзисторе?
7. Поясните принцип действия усилителя на полевом транзисторе и его частотную характеристику.
8. Каковы особенности построения операционных усилителей: универсальных, прецизионных, регулируемых, мощных высоковольтных?
9. Как используются ОУ в моделировании математических операций?
10. В чем состоят особенности построения электрометрических и измерительных усилителей?
11. Каковы принципы построения многокаскадных усилителей?
12. Каковы принципы построения усилителей мощности и их основные параметры?

## ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА (РЕЛЕ)

### 7.1. Общие сведения и классификация реле

В системах автоматики и телемеханики одним из наиболее распространенных элементов является реле. Реле — это устройство, которое автоматически осуществляет скачкообразное изменение (переключение) выходного сигнала под воздействием управляющего сигнала, изменяющегося непрерывно в определенных пределах.

Электрическое реле является промежуточным элементом, который приводит в действие одну или несколько управляемых электрических цепей при воздействии на него определенных электрических сигналов управляющей цепи (рис. 7.1).

Основные параметры реле:

*мощность срабатывания  $P_{ср}$*  — минимальная электрическая мощность, которая должна быть подведена к реле от управляющей цепи для его надежного срабатывания, т. е. приведения в действие управляемой цепи. Эта мощность определяется общими электрическими и конструктивными параметрами реле;

*мощность управления  $P_y$*  — максимальная электрическая мощность в управляемой цепи, при которой контакты реле еще работают надежно. Мощность управления определяется параметрами контактов реле, переключающих управляемую цепь;

*допустимая разрывная мощность  $P_p$*  — мощность в цепи, разрываемой контактами при определенном токе или напряжении без

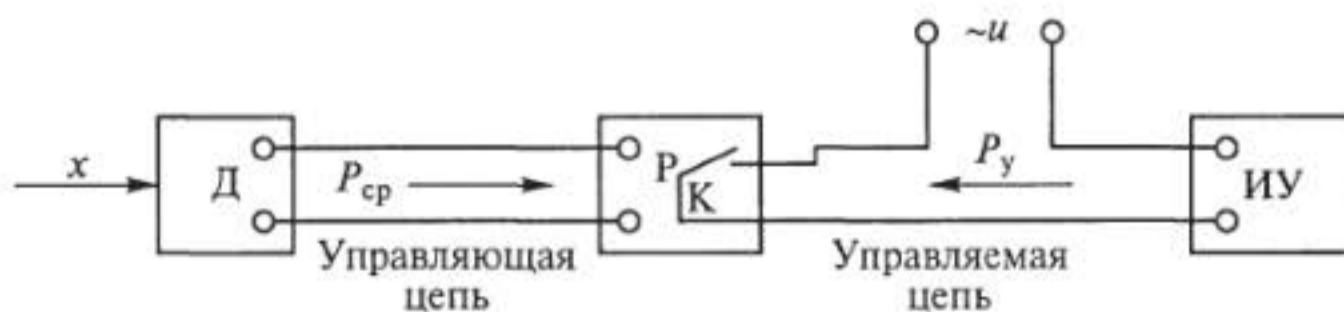


Рис. 7.1. Структурная схема включения реле в систему автоматического управления:

$x$  — контролируемая величина; Д — датчик; Р — реле; ИУ — исполнительное устройство; К — контакт реле

образования устойчивой электрической дуги, при данном напряжении;

*коэффициент управления*  $K_y$  — величина, характеризующая отношение управляемой мощности к мощности срабатывания реле:  $K_y = P_y / P_{cp} \geq 1$ ;

*время срабатывания*  $t_{cp}$  — интервал времени от момента поступления сигнала из управляющей цепи до момента начала воздействия реле на управляемую цепь. Допустимое значение  $t_{cp}$  определяется необходимой быстротой передачи сигнала в управляемую цепь.

Выбор типа реле производится в соответствии со значениями  $P_{cp}$  и  $P_y$ , так как эти параметры постоянны для отдельных конструкций реле.

Существующие типы реле можно классифицировать по следующим признакам:

назначению — управления, защиты, сигнализации;

принципу действия — электромагнитные (электромагнитные, нейтральные, электромагнитные поляризованные, магнитоэлектрические, электродинамические, индукционные, электротермические), магнитные бесконтактные, электронные, триггерные (бесконтактно-электронные), фотоэлектронные, ионные;

измеряемой величине — электрические (тока, напряжения, мощности, сопротивления, частоты, коэффициента мощности), механические (силы, давления, скорости, перемещения, уровня, объема и т.д.), тепловые (температуры, количества теплоты), оптические, силы звука и других физических величин (времени, вязкости и т.д.);

мощности управления — маломощные ( $P_y \leq 1$  Вт), средней мощности ( $P_y = 1 \dots 10$  Вт), мощные ( $P_y > 10$  Вт);

времени срабатывания — безынерционные ( $t_{cp} \leq 0,001$  с), быстродействующие ( $t_{cp} = 0,001 \dots 0,05$  с), замедленные ( $t_{cp} = 0,15 \dots 1$  с), реле времени ( $t_{cp} > 1$  с).

Наиболее распространены электромагнитные реле, в которых изменение входной электрической величины вызывает механическое перемещение подвижной части — якоря, приводящее к замыканию или размыканию контактов.

## 7.2. Нейтральные электромагнитные реле постоянного тока

Реле постоянного тока подразделяются на нейтральные и поляризованные.

*Нейтральное реле* одинаково реагирует на постоянный ток обоих направлений, протекающий по его обмотке (т.е. положение якоря не зависит от направления тока в обмотке реле).

По характеру движения якоря электромагнитные нейтральные реле подразделяются на два типа: с угловым движением якоря и втяжным якорем.

На рис. 7.2 показаны схемы электромагнитных реле клапанного типа и с втягиваемым внутрь катушки якорем. Для уменьшения магнитного сопротивления рабочего воздушного зазора сердечник электромагнитного реле обычно снабжается полюсным наконечником.

При отсутствии управляющего сигнала якорь реле удален от сердечника на максимальное расстояние за счет возвратной пружины (см. рис. 7.2, а). В этом случае одна пара контактов замкнута (размыкающие контакты — РК), а другая — разомкнута (замыкающие контакты — ЗК).

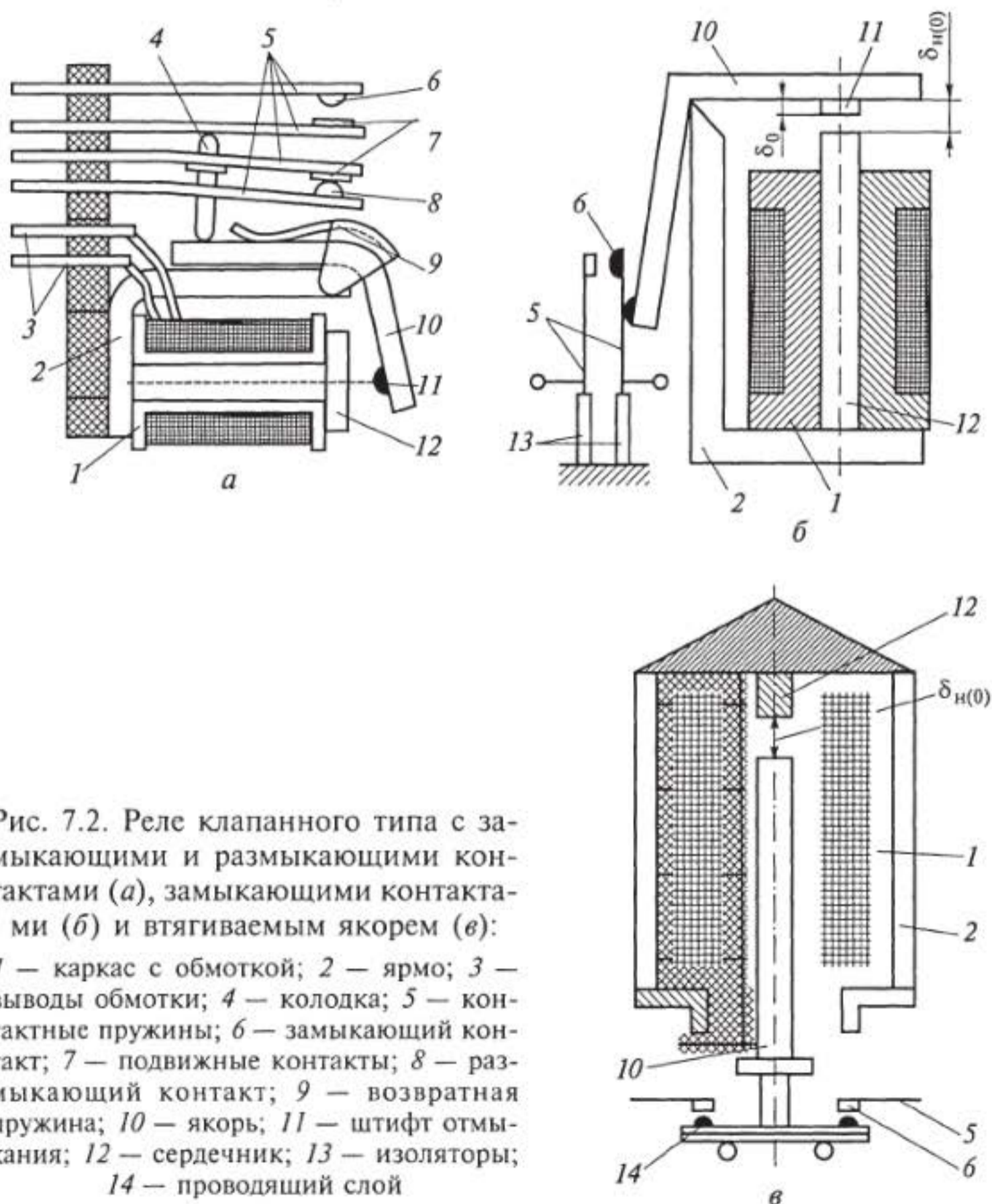


Рис. 7.2. Реле клапанного типа с замыкающими и размыкающими контактами (а), замыкающими контактами (б) и втягиваемым якорем (в):

1 — каркас с обмоткой; 2 — ярмо; 3 — выводы обмотки; 4 — колодка; 5 — контактные пружины; 6 — замыкающий контакт; 7 — подвижные контакты; 8 — размыкающий контакт; 9 — возвратная пружина; 10 — якорь; 11 — штифт отмыкания; 12 — сердечник; 13 — изоляторы; 14 — проводящий слой

Принцип действия реле, изображенных на рис. 7.2, основан на следующем: при подаче тока в обмотку (катушку) создается магнитный поток, который, проходя через сердечник, ярмо, якорь и воздушный зазор  $\delta_{н(0)}$ , создает магнитное усилие, притягивающее якорь к сердечнику.

При этом якорь, воздействуя на колодку, перемещает ее таким образом, что ЗК замыкаются, а РК размыкаются. В некоторых конструкциях реле якорь при выключении тока под действием собственного веса возвращается в исходное положение (см. рис. 7.2, в).

Рассмотрим особенности работы реле по этапам (рис. 7.3) на примере реле с угловым перемещением якоря (см. рис. 7.2, в). За счет индуктивности катушки реле ток в ней нарастает (убывает) не мгновенно, а постепенно — по какой-то кривой. При детальном рассмотрении работы реле в процессе срабатывания и отпущения можно выделить четыре этапа.

Этап I — срабатывание реле. Длительность этого этапа — время полного срабатывания  $t_{ср}$ , т. е. промежуток времени от момента подачи напряжения на катушку реле до момента надежного замыкания контактов (точка A);  $I_{тр}$  — ток трогания, при котором начинается движение якоря;  $t_{тр}$  — время, за которое ток достигает значения  $I_{тр}$  (точка a), т. е. время, соответствующее началу движения якоря;  $I_{ср}$  — ток, при котором срабатывает реле;  $t_{дв}$  — время движения якоря при срабатывании.

Таким образом, время полного срабатывания реле, отвечающее окончанию движения якоря,  $t_{ср} = t_{тр} + t_{дв}$ .

Этап II — работа реле ( $t_{раб}$  — время работы реле). После срабатывания реле ток в обмотке продолжает увеличиваться

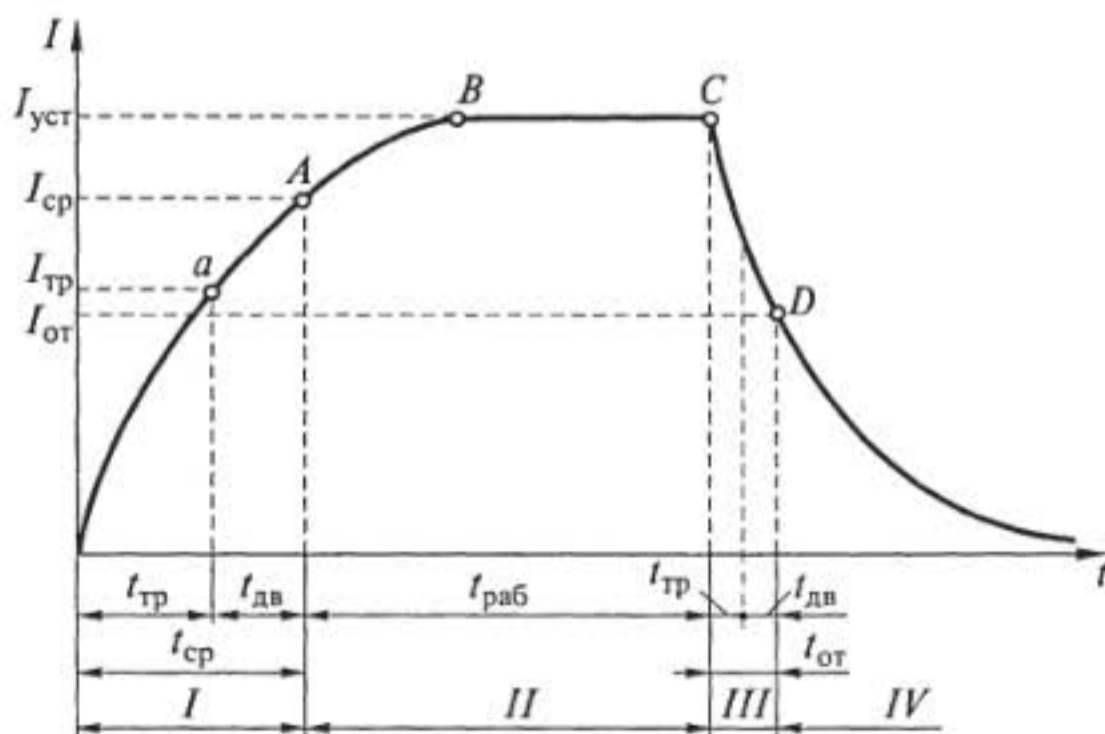


Рис. 7.3. Временная диаграмма работы реле

(участок  $AB$ ), пока не достигнет установившегося значения. Участок  $AB$  необходим для того, чтобы обеспечить надежное притяжение якоря к сердечнику, исключаящее вибрацию якоря при сотрясениях реле. Впоследствии ток в обмотке реле остается неизменным. Отношение установившегося тока  $I_{уст}$  к току срабатывания  $I_{ср}$  называется коэффициентом запаса реле по срабатыванию (т. е. коэффициентом, определяющим надежность работы реле):  $K_{зап} = I_{уст}/I_{ср} = 1,5 \dots 2$ . При этом установившийся ток  $I_{уст}$  не должен превышать значения, допустимого для обмотки реле по условиям ее нагрева.

Этап III — отпускание реле. Этот период начинается от момента прекращения момента подачи сигнала (точка  $C$ ) и продолжается до момента, когда ток в обмотке реле уменьшится до значения  $I_{от}$  (точка  $D$  — прекращение воздействия реле на управляемую цепь). При этом различают время трогания при отпускании  $t_{тр}$  и время движения  $t_{дв}$ .

Время отпускания  $t_{от} = t_{тр} + t_{дв}$ , где  $t_{тр}$  — время до начала движения якоря;  $t_{дв}$  — продолжительность перемещения якоря. Отношение тока опускания к току срабатывания называется коэффициентом возврата:  $K_{в} = I_{от}/I_{ср} < 1$ ; обычно  $K_{в} = 0,4 \dots 0,8$ .

Этап IV — покой реле. Это период от момента размыкания контактов реле (точка  $D$ ) до момента поступления нового сигнала на его обмотку. При быстром следовании управляющих сигналов друг за другом работа реле характеризуется максимальной частотой срабатывания (числом срабатываний реле в единицу времени).

### 7.3. Тяговые и механические характеристики электромагнитного реле

Электромагнитное тяговое усилие (сила притяжения якоря к катушке реле) прямо пропорционально квадрату намагничивающей силы (МДС) (т. е. оно не зависит от направления тока в управляющей обмотке) и обратно пропорционально квадрату длины  $\delta$  воздушного зазора.

В процессе срабатывания реле изменяется длина воздушного зазора, а следовательно, и электромагнитное усилие, воздействующее на якорь. Зависимость электромагнитного усилия  $F_z$  от длины воздушного зазора  $\delta$  между якорем и сердечником называется *тяговой характеристикой* электромагнитного реле (рис. 7.4).

При достаточно большом воздушном зазоре  $\delta$  электромагнитное усилие достигает минимального значения  $F_{z\min}$ , а магнитное сопротивление воздушного зазора становится значительно больше магнитного сопротивления стальных элементов магнитопровода ( $R_{м\delta} \gg R_{м.ст}$ ); однако при малых значениях зазора  $\delta$  сопротив-

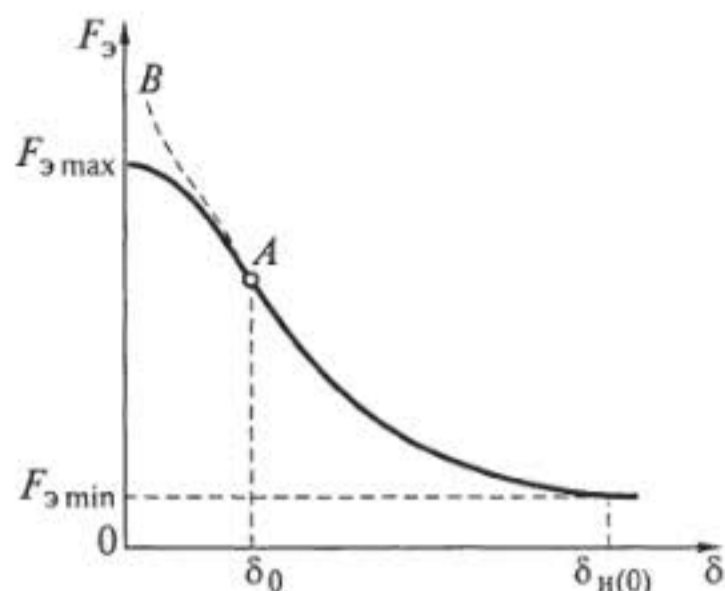


Рис. 7.4. Тяговая характеристика реле

ление  $R_{мδ}$  резко уменьшается и становится сравнимым с  $R_{м.ст}$ , т.е. электромагнитное усилие  $F_э$  не может быть бесконечно большим. Практически оно достигает некоторого значения  $F_{э \max}$ .

Так как после отключения обмотки реле части магнитопровода сохраняют некоторую намагниченность, обусловленную коэрцитивной силой, то при  $δ \rightarrow 0$  возможно «залипание» притянутого якоря под действием остаточного магнетизма стали. Для уменьшения этого притяжения,

т.е. исключения «залипания», применяют немагнитный штифт (в виде наклейки или прокладки), который закрепляется на вертикальной части якоря напротив оси сердечника (см. рис. 7.2, а, б). С помощью штифта, толщина которого  $δ_0 = 0,1$  мм, при притянута якоря обеспечивается некоторый минимальный воздушный зазор  $δ \geq δ_0$ , что облегчает отход якоря при выключении тока (так как создается достаточное магнитное сопротивление, которое уменьшает остаточный магнитный поток до минимального значения). Работа электромагнитного реле сводится к замыканию и размыканию контактных пружин, число которых в разных конструкциях реле колеблется в пределах 2... 16 и более.

Перемещению якоря по направлению к сердечнику в процессе притяжения противодействуют силы упругих элементов реле — возвратной и контактных пружин. При разных положениях якоря эти силы различны, т.е. противодействующие силы зависят от длины воздушного зазора  $δ$ . Зависимость механических (противодействующих) сил от длины воздушного зазора между якорем и сердечником  $F_м = f(δ)$  называется *механической характеристикой реле*. Силы, преодолеваемые якорем реле при его перемещении, изображаются, как правило, в виде ломаных линий.

В качестве примера рассмотрим построение механической характеристики реле с контактной группой, действующей на замыкание (рис. 7.5). В процессе работы реле якорь 3 сначала преодолевает натяжение спиральной пружины П, а затем после перемещения якоря на расстояние  $δ_1$ , являющееся холостым ходом, его плечо  $m$  производит подъем контактных пружин 1 и 2.

На горизонтальной оси механической характеристики в виде отрезка  $0a$  откладывается расстояние  $δ_{н(0)}$  — между торцом сердечника и якорем в нерабочем состоянии реле, равное сумме холостого хода якоря  $δ_1$ , его рабочего хода  $δ_2 + δ_3$ , проекций отрезков  $ef$  и  $dc$  и длины штифта отлипания  $δ_0$ . На оси ординат отклады-



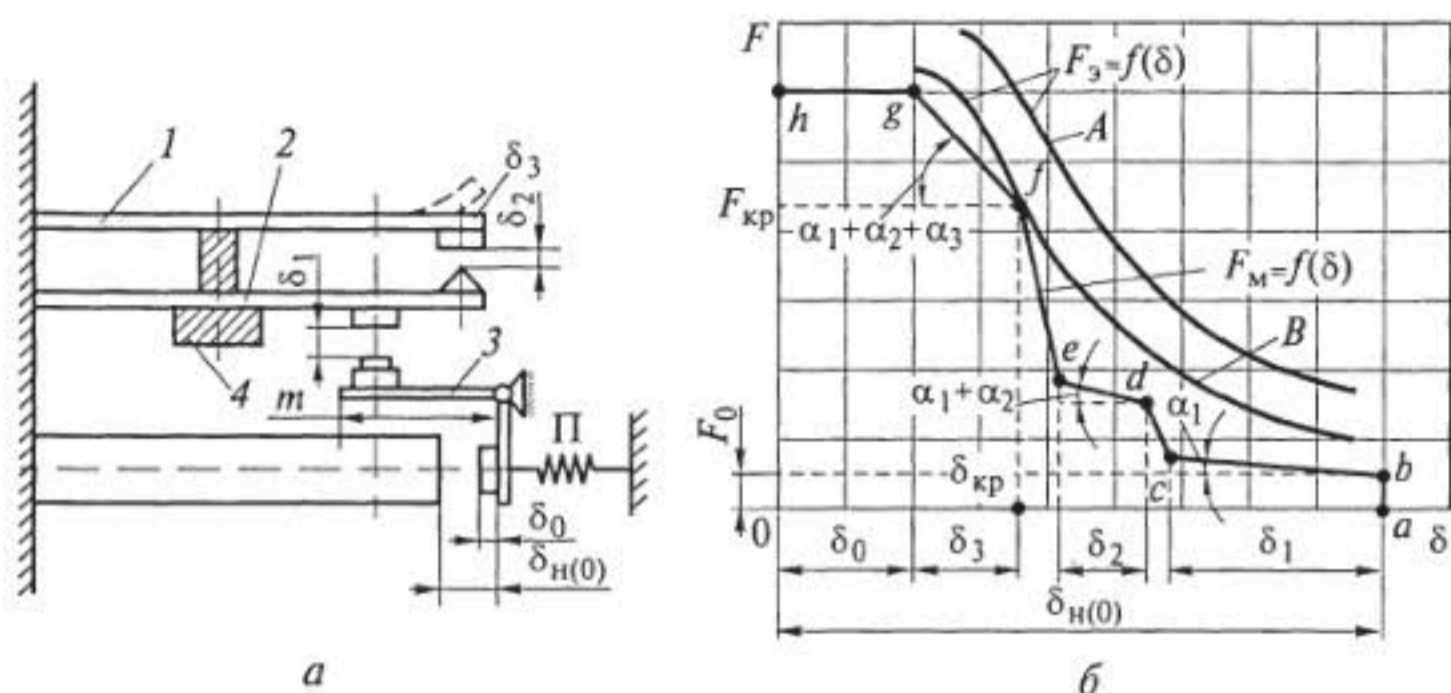


Рис. 7.5. Схема реле (а) и построение его механической характеристики (б): 1, 2 — контактные пружины; 3 — якорь; 4 — колодка; А, В — тяговые характеристики

вается сила, которую преодолевает якорь при перемещении. В отпущенном положении якорь испытывает лишь натяжение возвратной спиральной пружины (точка *b*), а контактные пружины удерживаются колодкой 4 и прижимаются к нему силой предварительного натяжения, что устраняет вибрацию контактов при обратном ходе якоря. Ордината *ab* характеризует усилие  $F_0$ , действующее на якорь в исходном положении (и необходимое для его сдвига из начального положения).

На протяжении холостого хода якоря (участок  $\delta_1$ ) происходит растяжение пружины П, причем нагрузка якоря равномерно растет — отрезок *bc*. Угол наклона  $\alpha_1$  характеризуется упругими свойствами пружины П. При соприкосновении упора, имеющегося на плече *m*, с нижней контактной пружиной 2 якорь преодолевает первоначальное натяжение этой пружины, несколько изгибая ее (участок *cd*). В точке *d* нижняя контактная пружина отходит от колодки, и якорь на участке *de* преодолевает совместное сопротивление двух пружин (возвратной спиральной и нижней контактной). Угол наклона участка *de* равен сумме двух углов  $\alpha_1 + \alpha_2$ , где  $\alpha_2$  — угол, зависящий от упругих свойств нижней контактной пружины. Перемещение якоря на этом участке характеризуется абсциссой  $\delta_2$ .

С момента снятия нижней пружины с колодки происходит ее подъем до замыкания контакта между пружинами 1 и 2. После замыкания контакта (точка *e*) якорь начинает преодолевать предварительное натяжение верхней контактной пружины — участок *ef*. В точке *f* верхняя пружина снимается с колодки, и на участке *fg* якорь преодолевает противодействие трех пружин (двух контактных и одной спиральной). Угол наклона участка *fg* определяется

суммой трех углов  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ , где  $\alpha_3$  — характеризуется упругими свойствами верхней контактной пружины. Для надежности замыкания контактов, которое теоретически произойдет в точке  $f$ , якорь должен дополнительно переместиться на расстояние  $\delta_3$  (чтобы обеспечить необходимое контактное усилие порядка  $2,6 \dots 5,1$  Н). От последней построенной точки  $g$  проводится горизонтальная прямая  $gh$ , которая определяет длину штифта отлипания  $\delta_0$ .

Из построения нетрудно понять, что отрезки ломаной линии характеризуют отдельные элементы работы пружин. Для притяжения якоря реле необходимо, чтобы электромагнитное усилие  $F_3$  на всем пути его движения было больше противодействующих сил. Для обеспечения этого условия тяговая характеристика реле (кривая  $A$  на рис. 7.5, б) должна располагаться немного выше его механической характеристики.

При расчете берут тяговую характеристику, соприкасающуюся с механической хотя бы в одной точке  $f$  (кривая  $B$  на рис. 7.5, б), координаты которой называются критическими. Намагничивающая сила  $F$ , обеспечивающая такое расположение характеристики, рассчитывается по критическому усилию  $F_{кр}$  и критическому зазору  $\delta_{кр}$ .

#### 7.4. Электромагнитные реле переменного тока

В тех случаях, когда основным источником энергии является сеть переменного тока, желательно применять реле, обмотки которых питаются переменным током. При подаче в обмотку реле переменного тока якорь будет притягиваться к сердечнику так же, как и при постоянном токе. Это объясняется тем, что электромагнитное (тяговое) усилие пропорционально квадрату намагничивающей силы, а значит, и квадрату тока в обмотке. Поэтому, хотя переменный ток и меняет периодически свое направление, знак тягового усилия остается неизменным.

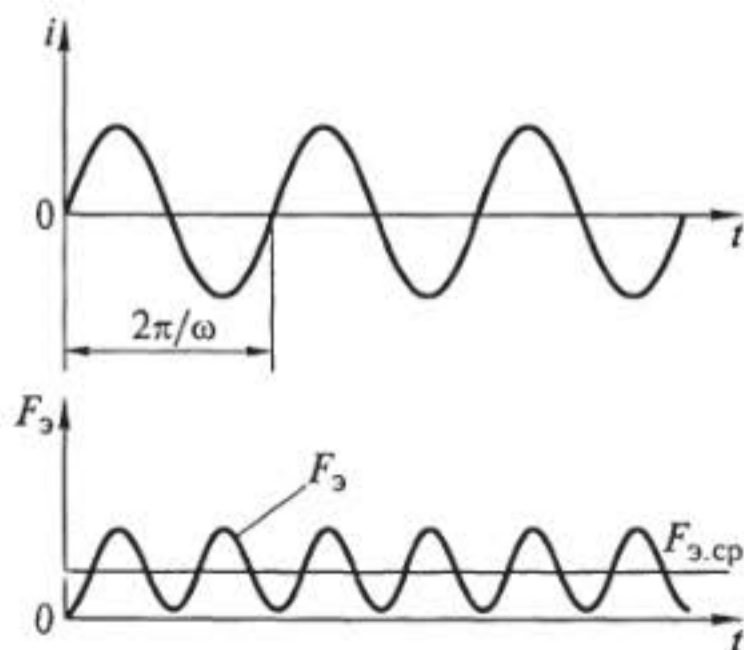
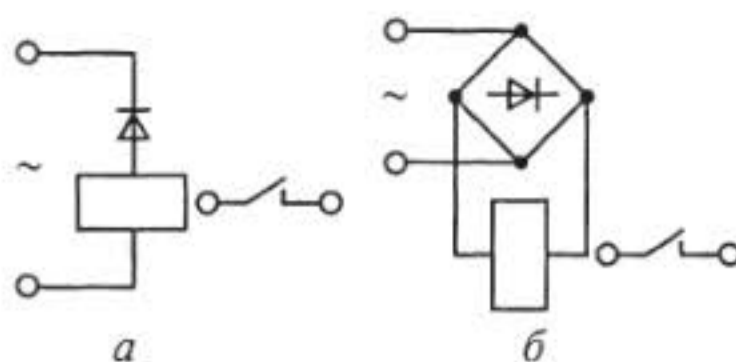


Рис. 7.6. Графики изменения тока и электромагнитного усилия в обмотке реле переменного тока

Рис. 7.7. Схемы включения реле постоянного тока в сеть переменного тока с однополупериодным (а) и двухполупериодным (б) выпрямлением



Изменение тока  $i$  в обмотке и соответствующее изменение электромагнитного усилия  $F_z$  во времени изображены на рис. 7.6. Якорь будет притягиваться к сердечнику под действием среднего значения электромагнитного усилия, т. е. его постоянной составляющей  $F_{z,ср}$ .

Несмотря на то что переменный ток является более распространенным, чем постоянный, реле постоянного тока нашли большее распространение, чем реле переменного тока. В частности, возможно включение реле постоянного тока в сеть переменного тока через выпрямительные устройства.

На рис. 7.7 изображены схемы включения реле постоянного тока в сеть переменного тока с однополупериодным и двухполупериодным выпрямлением.

## 7.5. Поляризованные электромагнитные реле

В отличие от рассмотренных ранее нейтральных электромагнитных реле у поляризованных реле направление электромагнитного усилия зависит от полярности сигнала постоянного тока в обмотке. Поляризация таких реле осуществляется с помощью постоянного магнита.

Существует много разновидностей поляризованных реле, которые классифицируются по ряду признаков. По конструктивной схеме магнитной цепи различают реле с последовательной, параллельной (дифференциальной) и мостовой цепями, по числу обмоток управления — одно- и многообмоточные, по способу настройки контактов (числу устойчивых положений якоря) — двух- и трехпозиционные.

Поляризованные реле получили большое распространение в маломощной автоматике, особенно в следящих системах при управлении реверсивными двигателями.

К числу достоинств поляризованных реле относятся:

высокая чувствительность, которая характеризуется малой мощностью срабатывания и составляет  $10^{-5}$  Вт;

большой коэффициент управления;

малое время срабатывания (единицы миллисекунд).

Недостатки по сравнению с нейтральными электромагнитными реле следующие: некоторая сложность конструкции и большие габаритные размеры, масса и стоимость.

В поляризованных реле используют дифференциальные и мостовые схемы магнитных цепей разных видов (название цепи определяется типом электрической схемы замещения электромагнитной системы). На рис. 7.8 изображено поляризованное реле с дифференциальной схемой магнитной цепи.

В этой схеме на якорь 4 реле действует два независимых друг от друга потока: поток  $\Phi_{0(n)}$ , создаваемый постоянным магнитом 3 и не зависящий от рабочего состояния схемы, в которую включено реле, и рабочий (управляющий) поток  $\Phi_{э(p)}$ , определяемый намагничивающей силой катушек 1, т. е. протекающим по их обмоткам ток. Электромагнитное усилие, действующее на якорь 4, зависит таким образом от суммарного действия потоков  $\Phi_{э(p)}$  и  $\Phi_{0(n)}$ . Изменение направления электромагнитного усилия при изменении полярности тока в рабочей обмотке происходит вследствие изменения направления рабочего потока  $\Phi_{э(p)}$  относительно поляризирующего  $\Phi_{0(n)}$ .

Поляризирующий поток  $\Phi_{0(n)}$  проходит по якорю и разветвляется на две части —  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  в соответствии с проводимостями воздушных зазоров слева и справа от якоря — ( $\delta_l$  и  $\delta_{np}$ ). В зависимости

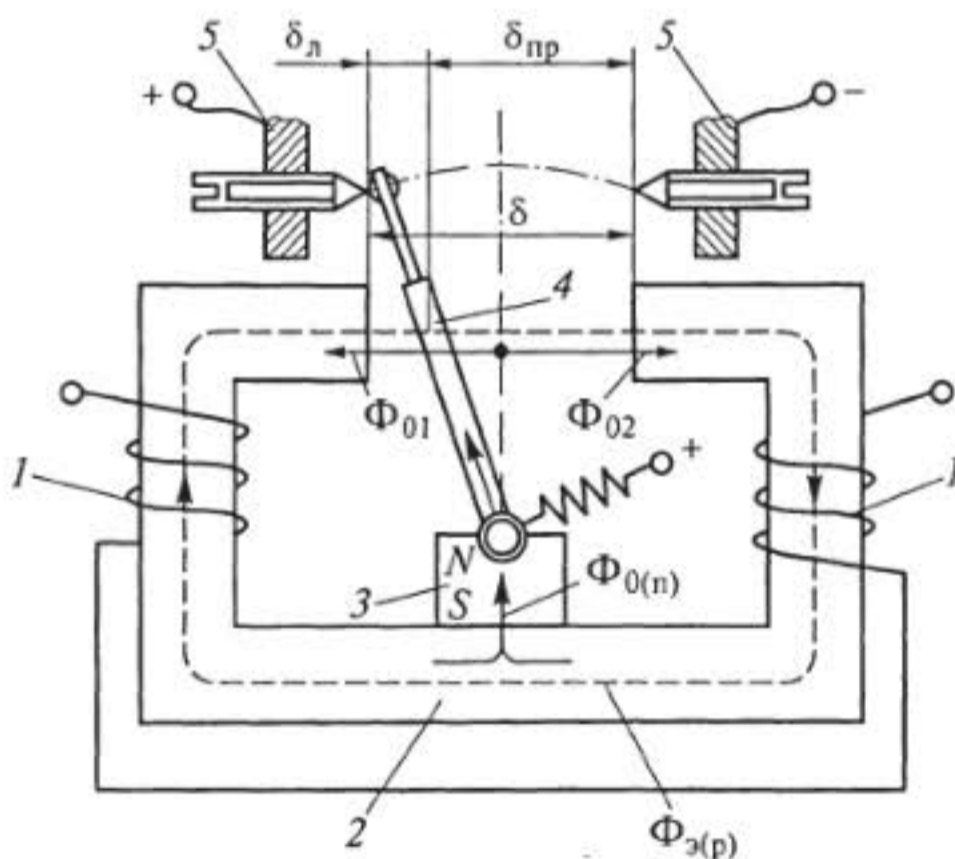


Рис. 7.8. Схема поляризованного реле с дифференциальной схемой магнитной цепи:

1 — намагничивающие катушки; 2 — ядро; 3 — постоянный магнит; 4 — якорь; 5 — неподвижные контакты

от полярности управляющего сигнала рабочий поток  $\Phi_{э(р)}$  вычитается из потока  $\Phi_{01}$  в зазоре слева от якоря и прибавляется к потоку  $\Phi_{02}$  справа от якоря, как показано на рисунке, или наоборот. В данном случае якорь перекинется из левого положения в правое.

При снятии сигнала якорь будет возвращаться в то положение, которое он занимал до его поступления. Таким образом, результирующее электромагнитное усилие, действующее на якорь, будет направлено в сторону того зазора, где магнитные потоки суммируются.

Поляризованные реле выпускаются трех видов. Реле, изображенное на рис. 7.8 является двухпозиционным. Если его неподвижные контакты 5 симметрично расположены относительно нейтральной линии (якорь отрегулирован симметрично), то при снятии управляющего сигнала якорь реле остается в том же положении, которое он занимал при наличии управляющего сигнала. Повторная подача управляющего сигнала прежней полярности не вызовет изменения положения якоря. Если изменить полярность управляющего сигнала, то якорь перебросится в другое положение, и останется в нем после снятия сигнала. Такая настройка называется *нейтральной*, или *двухпозиционной*.

Если один из контактных винтов выдвинут за нейтральную линию (рис. 7.9, а), то реле является двухпозиционным с преобладанием к одному из контактов. В показанном на данном рисунке случае при выключенном реле якорь всегда прижат к левому контакту, т.е. контакту 1 и перебрасывается вправо лишь на время протекания в управляющей обмотке тока соответствующей полярности.

Трехпозиционное реле имеет симметрично расположенные от нейтральной линии неподвижные контакты (рис. 7.9, б). Якорь

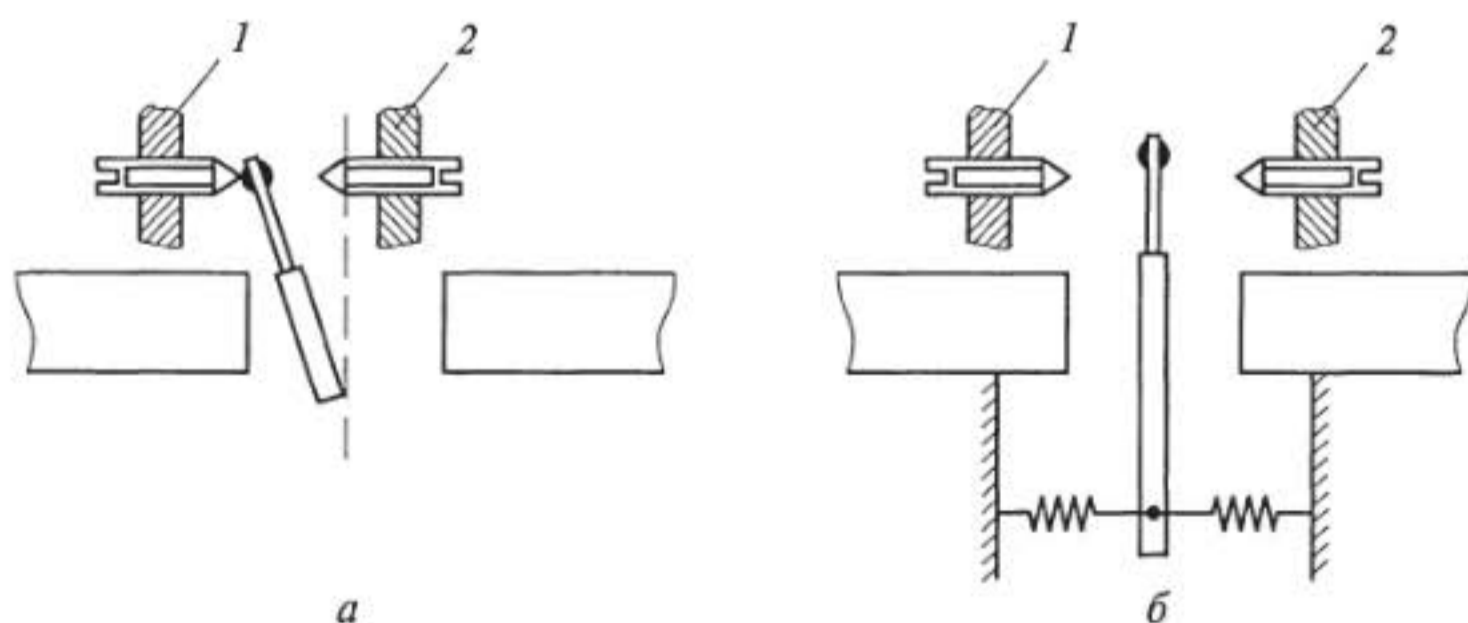


Рис. 7.9. Схемы поляризованных реле:

а — двухпозиционного с преобладанием к одному из контактов; б — трехпозиционного; 1, 2 — неподвижные контакты

при отсутствии управляющего сигнала удерживается в среднем положении с помощью специальных пружин, расположенных с двух сторон, или закрепляется на плоской пружине, упругость которой создает устойчивое положение равновесия в среднем положении. При подаче сигнала в управляющую обмотку контакт на якоре замыкается в зависимости от полярности сигнала с левым или правым неподвижным контактом и возвращается в нейтральное положение после снятия сигнала.

Поляризованные реле находят широкое применение в схемах автоматики благодаря своим характерным особенностям: наличие нескольких обмоток позволяет использовать их в качестве логических элементов, небольшая мощность срабатывания — в качестве элементов контроля небольших электрических сигналов, малое время срабатывания и чувствительность к полярности входных сигналов — в качестве амплитудных модуляторов и демодуляторов. Благодаря высокой чувствительности поляризованные реле часто используют в маломощных цепях переменного тока, включая их через выпрямитель.

## 7.6. Контакты реле. Средства дуго- и искрогашения

Контакты, являясь важнейшими элементами реле, определяют надежность и срок их службы. По характеру работы контакты подразделяются на *замыкающиеся*, которые при отсутствии сигнала в обмотке разомкнуты, а при наличии тока в управляющей обмотке замыкаются, и *размыкающиеся*, которые при отсутствии сигнала в обмотке замкнуты, а при наличии сигнала в обмотке размыкаются. В процессе работы реле контакты могут находиться в следующих состояниях: замкнутом, в процессе размыкания, разомкнутом и в процессе замыкания.

Тяжелым условиям работы контактов, т. е. при которых происходит их наибольший износ, соответствуют замкнутое состояние (через контакты течет весь ток нагрузки) и процесс размыкания (между контактами возникает дуга).

По мере увеличения усилия  $F_k$ , действующего на контакты, увеличивается площадь их соприкосновения, а переходное сопротивление уменьшается. При наличии на поверхности контактов окисной пленки необходимо, чтобы механическое напряжение в точках контакта было достаточным для ее разрушения.

Зависимость переходного сопротивления контактов от контактного усилия следующая:

$$R_k = a / (0,1 F_k)^b,$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от свойств контактного материала и шероховатости контактной поверхности;  $F_k$  — контакт-

ное усилие;  $b$  — показатель, характеризующий форму контактов.

Контакты по форме контактирующих поверхностей и в зависимости от тока, на который они рассчитаны, делятся на три основные группы (рис. 7.10):

*точечные* — в виде конуса и плоскости или полусферы и плоскости (т.е. теоретически с соприкосновением в одной точке), рассчитанные на небольшие токи;

*плоскостные* — в виде плоскости и плоскости, рассчитанные на средние токи;

*линейные* — с соприкосновением по линии, рассчитанные на большие токи.

Наиболее распространены реле малой и средней мощности с точечным контактом, обеспечивающим надежное электрическое соединение при небольшом контактном давлении. Контакты таких реле закрепляются на упругих плоских пружинах.

Существуют контакты специальных типов: *вакуумные* и *ртутные*.

К материалам, из которых изготавливаются контакты, предъявляются особые требования: они должны быть механически прочными, твердыми, иметь высокие температуры плавления, обладать хорошей тепло- и электропроводностью, легко обрабатываться, быть устойчивыми к коррозии и эрозии, а также дешевыми.

На практике при выборе материала контактов учитывают следующие соображения:

для реле, рассчитанных на малые контактные усилия  $0,01 \dots 0,03$  Н и при необходимости высокой чувствительности, используют платину;

для реле, рассчитанных на контактные усилия  $0,05 \dots 1$  Н и малую частоту срабатываний, используют серебро;

для реле, рассчитанных на контактное усилие  $0,3 \dots 1$  Н и большую частоту срабатываний, используют металлокерамику;

для реле, рассчитанных на контактное усилие свыше  $1$  Н и большую частоту срабатываний, используют вольфрам.

Основной причиной разрушения контактов, определяющей срок их службы, является газовый разряд, возникающий при раз-

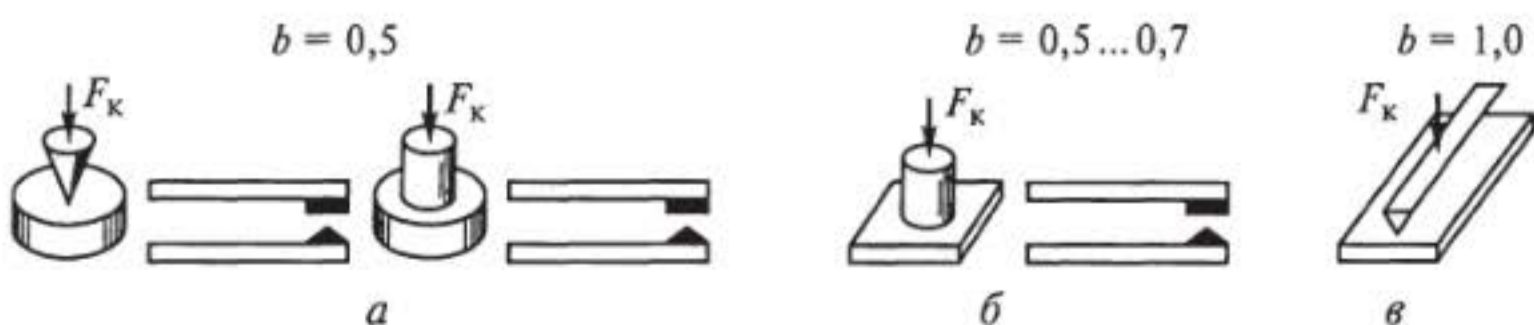


Рис. 7.10. Типы контактов реле:

$a$  — точечные;  $b$  — плоскостные;  $c$  — линейные

мыкании. Причиной интенсивного разряда является наличие в управляемой цепи реактивного сопротивления. Если оно имеет емкостный характер, то интенсивное искрение наблюдается при замыкании контактов. Если же в управляемой цепи имеется значительная индуктивность, то особенно сильный и затяжной разряд возникает при разрыве этой цепи из-за образующегося перенапряжения на контактах. В большинстве случаев управляемая цепь содержит индуктивность.

Применяются два основных метода искро- и дугогашения: шунтирование индуктивности разрываемой цепи и шунтирование контактов. В обоих случаях, пока контакты замкнуты в магнитном поле индуктивности, накапливается энергия, которая при размыкании контактов расходуется не в дуге, а в шунтирующем устройстве. Методы искрогашения сводятся к обеспечению замедленного исчезновения тока.

На рис. 7.11 изображены основные схемы искрогашения в контактах. В схеме, показанной на рис. 7.11, а, применяется метод шунтирования индуктивной нагрузки последовательным включением емкости с сопротивлением  $R_{ш}$ . В момент размыкания контактов в контуре, образованном нагрузкой и шунтом, под действием энергии, запасенной в магнитном поле, возникает ток переходного процесса, который протекает еще некоторое время после размыкания контактов, предотвращая тем самым наведение высокой ЭДС самоиндукции. Энергия магнитного поля переходит в теплоту, которая выделяется на сопротивлении шунта  $R_{ш}$ . Наличие конденсатора в схеме исключает прохождение тока нагрузки при замкнутых контактах, а следовательно, исключаются потери энергии в сопротивлении шунта.

Для того чтобы в контуре  $L_H - R_H - C - R_{ш}$  не возникли автоколебания тока, емкость выбирают из условия

$$R_H + R_{ш} \geq 2\sqrt{L_H/C}.$$

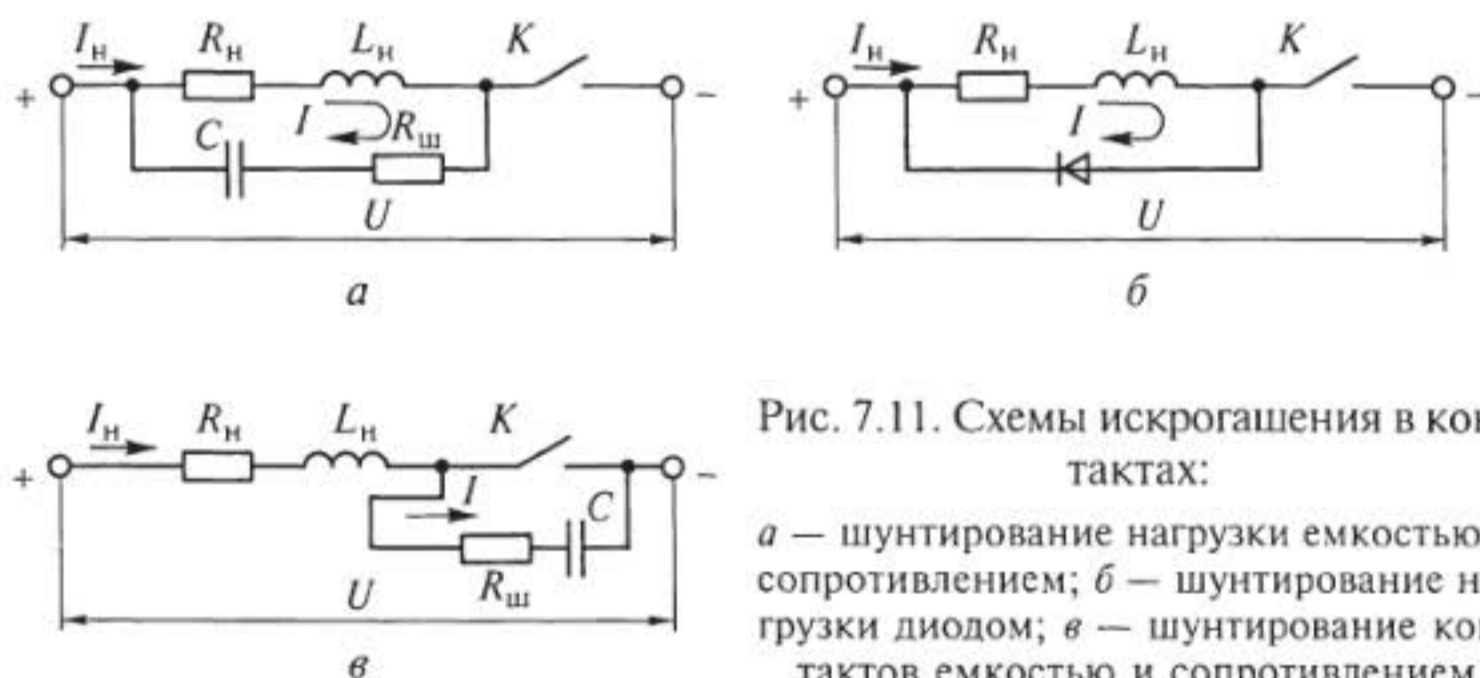


Рис. 7.11. Схемы искрогашения в контактах:

а — шунтирование нагрузки емкостью и сопротивлением; б — шунтирование нагрузки диодом; в — шунтирование контактов емкостью и сопротивлением



В схеме на рис. 7.11, б диод шунтирует индуктивную нагрузку и пропускает ток переходного процесса  $I$ , который создает ЭДС самоиндукции в момент разрыва управляемой цепи. При замкнутых контактах диод заперт напряжением сети и не пропускает ток нагрузки.

На рис. 7.11, в изображена схема шунтирования контактов емкостью с сопротивлением. Здесь емкость исключает протекание тока нагрузки в шунтирующей цепи при разомкнутых контактах. Кроме того, устраняется расход энергии как в цепи нагрузки, так и в шунтирующем сопротивлении, поскольку конденсатор не пропускает постоянный ток. Цепочка  $R_{ш}—C$  создает путь мимо контактов для убывающего после их разрыва тока нагрузки и для рассеяния энергии, запасенной в магнитном поле цепи нагрузки.

После размыкания контактов по мере зарядки конденсатора от нуля до напряжения питания  $U$  ток нагрузки постепенно уменьшается до нуля. Таким образом, перенапряжения на контактах не возникает, т. е. напряжение на контактах, как и на конденсаторе, постепенно увеличивается до значения  $U$ . Ток в этом случае проходит мимо контактов через цепочку  $R_{ш}—C$ , и дуговой разряд не возникает. Так как на практике емкость конденсатора выбирают порядка 0,5...2 мкФ, то зарядка конденсатора будет происходить медленно и, следовательно, напряжение на контактах будет также нарастать достаточно медленно по сравнению с их расхождением.

## 7.7. Реле времени

Реле времени создает регулируемую выдержку времени от момента подачи сигнала на срабатывание до момента замыкания (или размыкания) контактов. *Программные реле* — это разновидность реле времени с несколькими контактами, имеющими различные регулируемые, как правило, независимые друг от друга выдержки времени. Например, существуют реле счета импульсов, контакты которых замыкаются после отсчета заранее заданного числа импульсов, подаваемых на катушку управления. Устройство таких реле имеет много общего с шаговыми искателями.

Для обеспечения выдержки времени применяются электрический разрядный  $RC$ -контур, электромагнитные реле с короткозамкнутыми гильзами, механические механизмы (анкерный и планетарный), пневматические и др.

На рис. 7.12 дана схема *реле времени с пьезокерамическим элементом*. Пьезокерамические материалы, полученные, например, на основе титаната бария, обладают свойством изменять свои линейные размеры в электрическом поле. Пьезокерамический биморфный элемент (БЭ) состоит из двух прочно склеенных пластинок, на наружных поверхностях которых, а также в месте их

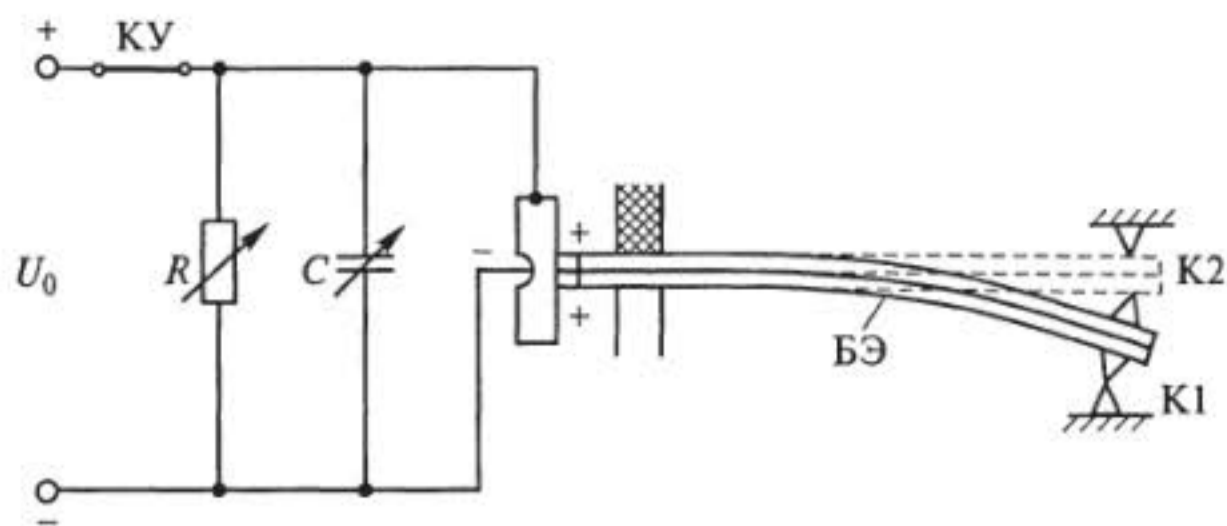


Рис. 7.12. Схема реле времени с пьезокерамическим элементом

соединения размещены металлические обкладки. Верхний слой элемента в электрическом поле удлиняется, нижний — укорачивается. В результате этот элемент, консольно закрепленный на одном конце, изгибается, что приводит к замыканию контакта К1. При снятии электрического поля с обкладок деформация биморфного элемента исчезает, контакт К1 размыкается, а контакт К2 замыкается.

При замкнутой кнопке управления (КУ) конденсатор  $C$  и обкладки БЭ заряжены до напряжения  $U_0$ , а сам БЭ деформирован. При отключении КУ начинается разряд емкости  $C$  на сопротивление  $R$ . Напряжение на обкладках БЭ постепенно снижается, и его механическая деформация также постепенно исчезает.

Широко распространены *реле времени с механическим замедлением*, в частности с часовым механизмом. В таких реле (рис. 7.13) при подаче напряжения на электромагнитный привод  $1$  растягивается пружина  $2$  и часовой механизм приходит в действие. Анкер  $4$ , поворачиваясь около оси  $O_2$ , «перепускает» зубчатый диск  $3$ , который вращается вокруг оси  $O_1$ . Перемещающийся вместе с ним рычаг  $8$  в конце пути упирается в пластинчатый контакт  $9$  и замы-

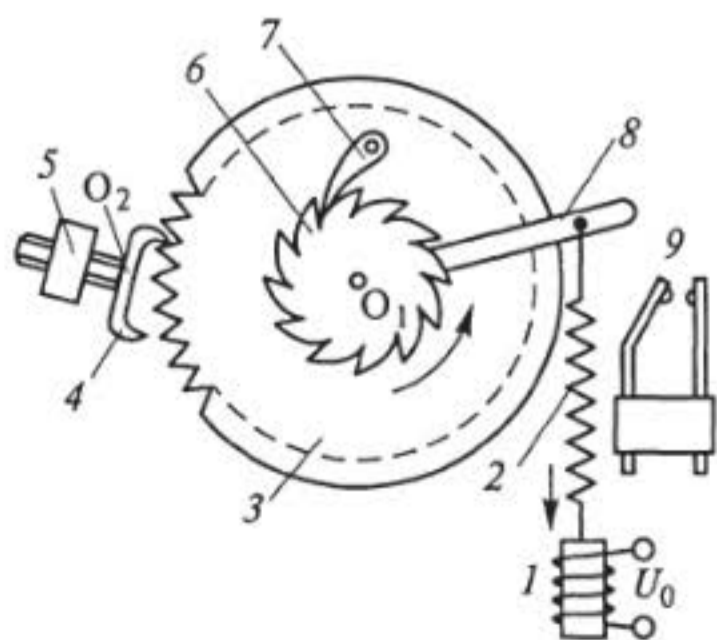


Рис. 7.13. Схема реле времени с часовым механизмом:

$1$  — электромагнитный привод;  $2$  — пружина;  $3$  — зубчатый диск;  $4$  — анкер;  $5$  — грузик;  $6$  — храповое колесо;  $7$  — собачка;  $8$  — рычаг;  $9$  — пластинчатый контакт

кает его. Храповый механизм 6, 7 дает подвижной системе реле возможность возвратиться в исходное положение, когда будет снято напряжение с электромагнитного привода  $I$ . Возврат осуществляется специальной пружиной (на рисунке не показана). Изменяя расстояние от грузика 5 до оси  $O_2$  и его массу, можно регулировать момент инерции анкера и через него — выдержку времени реле.

Выдержка времени, создаваемая реле с часовым механизмом,

$$t = \alpha n z T_a,$$

где  $\alpha$  — угол поворота подвижной системы от начала ее движения до замыкания контактов;  $n$  — передаточное число зубчатого механизма;  $z$  — число зубьев ходового колеса;  $T_a$  — период колебаний анкера,

$$T_a = 2\pi \sqrt{J \varphi (M_{дв} - M_{прд})}.$$

Здесь  $J$  — момент инерции анкера;  $\varphi$  — угол поворота анкера при колебаниях;  $M_{дв}$  — момент, создаваемый движущимися силами;  $M_{прд}$  — момент, создаваемый противодействующими силами.

В некоторых реле применяется пневматическое или гидравлическое замедление. Изменением сечения отверстия, через которое проникает воздух (или жидкость) из одного объема в другой, достигается регулировка выдержки времени. Наиболее высокие выдержки времени (до нескольких часов) достигаются в реле с планетарными механизмами.

## 7.8. Тепловые реле

Измерительным органом теплового реле является биметаллический элемент, который при нагреве изгибается и переводит систему в отключенное или включенное состояние. Биметаллический элемент представляет собой двухслойную пластинку из металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения. При нагреве слой термоактивного материала металла существенно расширяется, в то время как слой термоинертного материала почти не деформируется. Если один конец биметаллической пластинки жестко закрепить, то другой свободный конец ее будет изгибаться.

Пластинки биметаллического элемента, прочно соединенные между собой, должны иметь возможно большую разность температурных коэффициентов линейного расширения  $\alpha_1 - \alpha_2$ , что будет увеличивать чувствительность реле. Пределы упругости пластинок биметаллического элемента должны быть высокими. В этом случае большая температура нагрева не будет вызывать остаточных деформаций.

В качестве материала с низким температурным коэффициентом линейного расширения (термоинертного компонента) часто применяется сплав никеля с железом, называемой инваром. Инвар 36 Н содержит 36 % никеля, инвар 42 Н — 42 % никеля. В качестве термоактивных компонентов с высоким температурным коэффициентом линейного расширения используются различные стали, латунь, константан и др.

На рис. 7.14 изображена конструктивная схема теплового реле. Биметаллическая пластина 1 такого реле упирается в верхний конец пружины 7. Нижний конец пружины давит на выступ пластмассовой колодки 4, которая может поворачиваться вокруг оси  $O_1$ . В положении, изображенном на рисунке, движение пластины 1 и верхнего конца пружины 7 влево ограничено упором 8. Сила пружины 7 воздействует на выступ пластмассовой колодки 4 так, что она оказывается повернутой по часовой стрелке, а укрепленный на ней подвижный контакт 5 — замкнутым с неподвижным контактом 6.

При протекании повышенного тока по нагревательному элементу (НЭ) биметаллическая пластина 1 нагревается, и ее нижний конец перемещается в направлении стрелки А. В результате верхний конец пружины 7 переходит вправо, и создаваемая ею сила воздействует на колодку 4 так, что та поворачивается на некоторый угол против часовой стрелки, и контакты 5 и 6 размыкаются. Упоры 3 и 8 ограничивают перемещение нижнего конца пластины 1. Возврат реле в исходное положение может происходить самопроизвольно, когда биметаллическая пластинка остынет. В других конструкциях перевод реле в исходное положение осуществляется кнопкой ручного возврата 2.

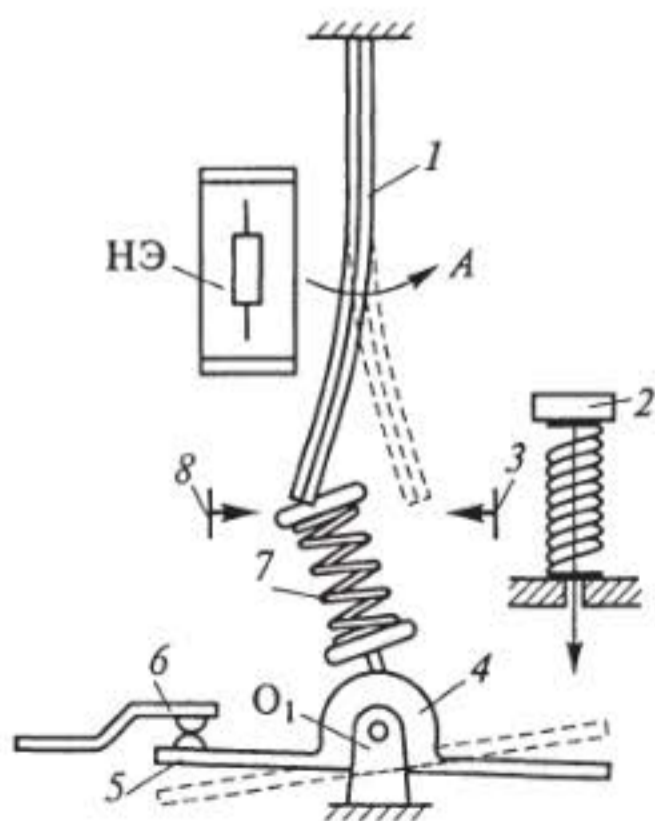


Рис. 7.14. Схема теплового реле:

1 — биметаллическая пластинка; 2 — кнопка ручного возврата; 3, 8 — упоры; 4 — пластмассовая колодка; 5 — подвижный контакт; 6 — неподвижный контакт; 7 — пружина

### Контрольные вопросы

1. Каковы основные свойства реле?
2. Как устроено и как работает нейтральное электромагнитное реле постоянного тока?
3. Какие существуют основные этапы работы реле?
4. Что представляют собой тяговые и электромеханические характеристики реле?
5. В чем состоят особенности конструкции реле переменного тока?
6. Как устроено, как работает и для чего предназначено поляризованное электромагнитное реле?
7. Какие существуют методы и средства дуго- и искрогашения на контактах реле?
8. Каковы назначение и принцип работы реле времени?
9. Для чего применяется и как устроено реле времени с механическим замедлением?
10. Как устроено и как работает тепловое реле?

## ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

## 8.1. Общие характеристики исполнительных устройств

Исполнительным устройством системы автоматического управления в большинстве случаев является привод, перемещающий регулирующий орган в соответствии с сигналом регулирующего воздействия.

В качестве исполнительных устройств (серводвигателей) в системах автоматики чаще всего применяются электродвигатели. Менее распространены гидравлический и пневматический сервоприводы.

Серводвигатель преобразует сигнал управления в перемещение. При этом перемещение может выполняться как с постоянной или переменной скоростью, так и в импульсном режиме.

В первом случае перемещение начинается при некотором отклонении входного сигнала от нулевого значения, т.е. при  $\pm x_0$  (рис. 8.1). При этом значение скорости постоянно и устанавливается скачком.

Во втором случае скорость перемещения изменяется плавно, пропорционально управляющей величине. Причем серводвигатель имеет зону нечувствительности (рис. 8.2), ограниченную значениями  $\pm x_0$ .

В третьем случае управляющий сигнал поступает в виде импульсов, разделенных во времени, каждый из которых вызывает

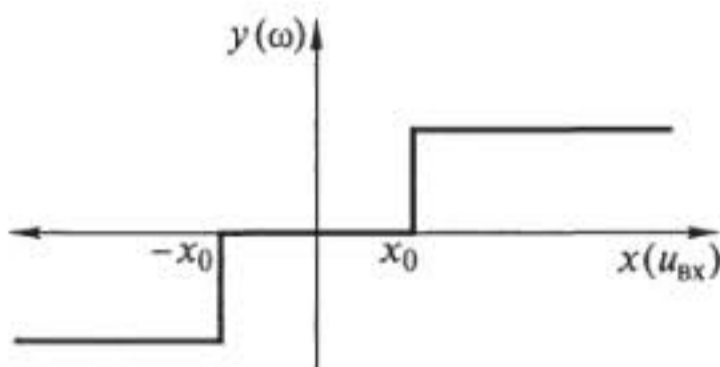


Рис. 8.1. Статическая характеристика сервопривода релейного действия

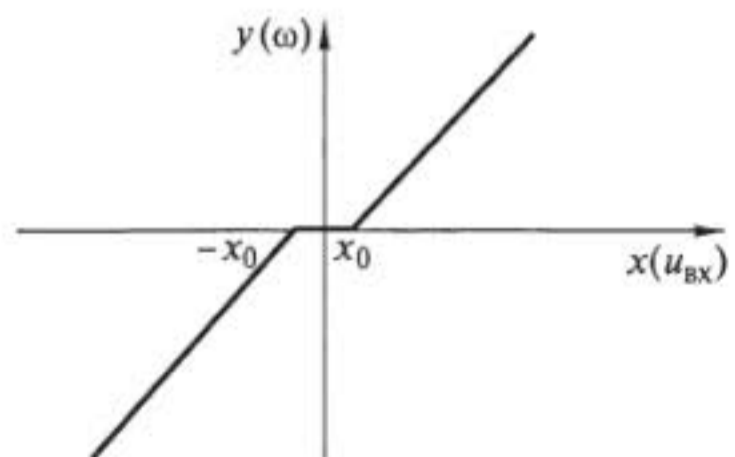


Рис. 8.2. Линейная статическая характеристика сервопривода с зоной нечувствительности

перемещение вала серводвигателя на определенную величину. Это перемещение называется шагом, а привод такого типа называется шаговым. Скорость перемещения в этом случае переменна и пропорциональна частоте следования управляющих импульсов.

Для осуществления каждого из названных режимов перемещения с помощью электрических двигателей используются специальные схемы управления, которые также относятся к устройствам сервопривода.

## 8.2. Электрические серводвигатели

Серводвигатели являются разновидностью электропривода; принцип их действия тот же, что и у силовых двигателей, но работают они в специфических условиях, определяющих некоторые специальные требования к их конструкции и схемам включения.

Серводвигатель в отличие от обычного приводного устройства непрерывно работает в переходных режимах. Следовательно, чтобы не вносить в тракт автоматического управления нежелательных запаздываний, серводвигатель должен быть быстродействующим, т.е. он должен быстро разгоняться, быстро тормозиться, быстро обрабатывать команды реверсирования. У двигателей, работающих в режиме плавного регулирования, желательно наличие возможно большего диапазона изменения скоростей.

Для уменьшения инерции ротор такого электродвигателя делают удлиненным и небольшого диаметра.

Требуемая скорость перемещения нагрузки обычно во много раз меньше скорости вращения вала серводвигателей, поэтому они, как правило, работают с редукторами и часто объединяются с ними конструктивно. Наличие редуктора, снижая до минимума влияние момента сопротивления нагрузки, также повышает быстродействие серводвигателя.

Специальные схемы включения позволяют повысить пусковой момент серводвигателя постоянного тока и тем самым повысить скорость его разгона.

### Электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением

В схеме, показанной на рис. 8.3, электродвигатель управляется по цепи якоря. Входными величинами электродвигателя являются напряжение на его щетках  $u_{вх}$  или ток в цепи якоря  $i_{я}$ . В качестве выходных величин могут быть приняты момент на валу двигателя  $M$ , угловая скорость  $\omega$  и угол поворота вала  $\alpha$ .

В установившемся режиме угловая скорость электродвигателя пропорциональна входному напряжению,  $\omega = kU_{вх}$ .

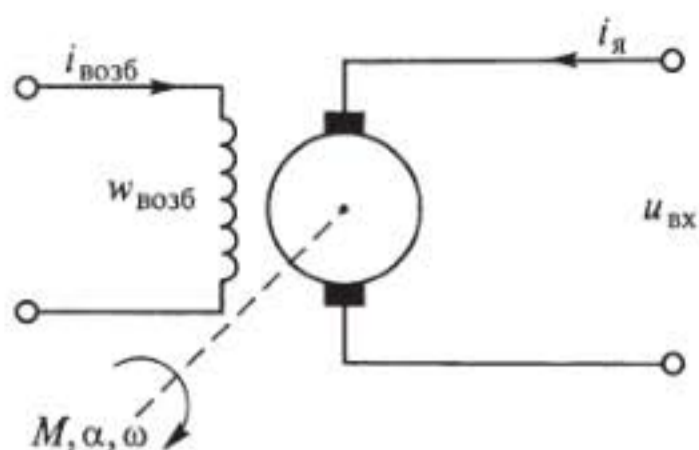


Рис. 8.3. Схема серводвигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Поскольку двигатель работает в переходных режимах, необходимо учитывать и его динамические свойства.

Инерционность серводвигателей малой мощности характеризуется постоянными времени порядка  $10^{-1} \dots 10^{-5}$  с, а большой мощности — порядка  $0,1 \dots 1$  с.

Выбор схемы управления серводвигателя постоянного тока с независимым возбуждением в значительной степени зависит от его мощности. Для электродвигателей малой мощности целесообразно использование плавного управления, улучшающего общие характеристики автоматической системы, а для более мощных электродвигателей — использование релейных схем, с помощью которых проще осуществлять коммутацию больших токов.

Для изменения направления вращения электродвигателя постоянного тока достаточно изменить направление тока только в обмотке якоря или только в обмотке возбуждения. Управление посредством изменения тока возбуждения применяется сравнительно редко, так как при этом сильно возрастает электромагнитная постоянная времени, т. е. инерционность электродвигателя, а ток якоря даже у небольших электродвигателей постоянного тока обычно довольно большой, поэтому наибольшее распространение получили схемы реверсирования с помощью реле. Повышение чувствительности схемы обеспечивается применением электронных реле.

На рис. 8.4 показана схема реверсирования серводвигателя посредством поляризованного реле. В этой схеме напряжение  $u_{вх}$ , соответствующее по знаку входной величине  $x_{вх}$ , поступает в обмот-

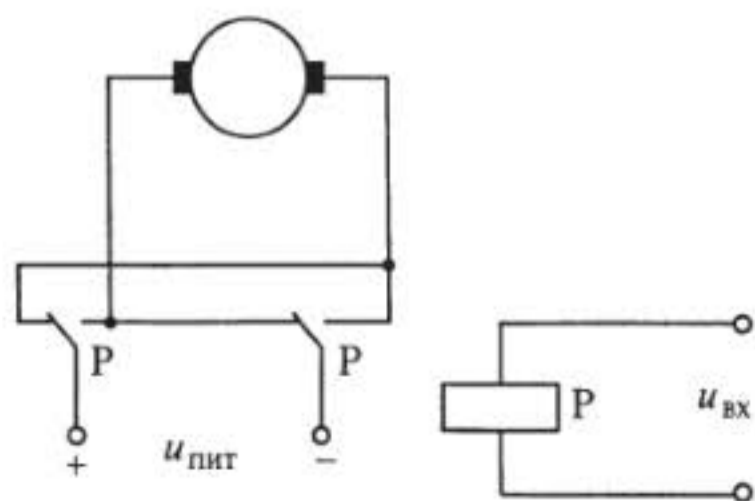


Рис. 8.4. Схема управления серводвигателем постоянного тока посредством поляризованного реле



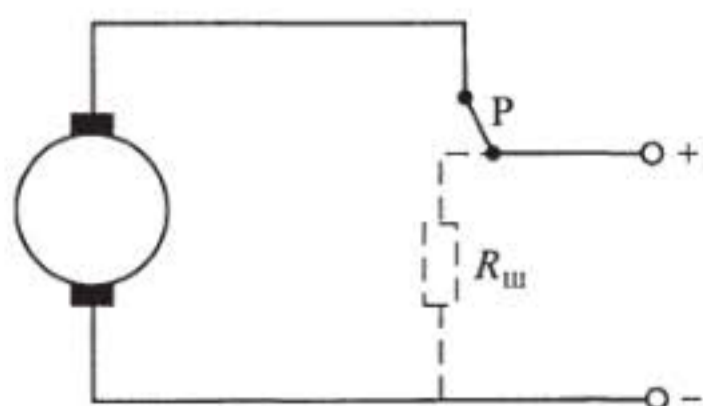


Рис. 8.5. Схема торможения серводвигателя постоянного тока

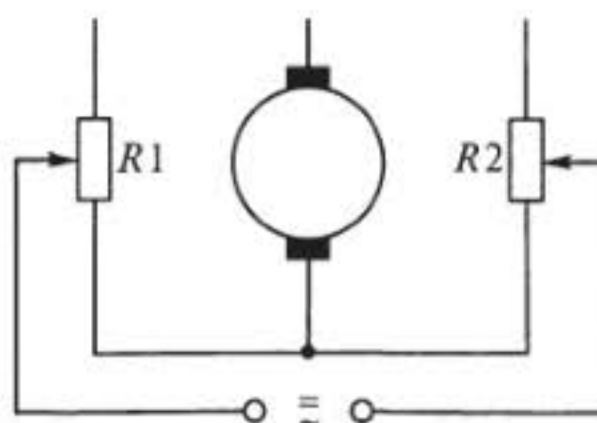


Рис. 8.6. Мостовая схема включения серводвигателя

ку реле (P), контакты которого, переключаясь из одного своего положения в другое, изменяют направление тока в якоре электродвигателя.

При выключении электродвигатель останавливается не сразу вследствие наличия инерции. В случае необходимости быстрой остановки электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением после выключения (путем размыкания цепи якоря) обмотку его якоря замыкают на небольшое шунтирующее сопротивление  $R_{ш}$ , показанное на рис. 8.5 пунктиром.

Для плавного увеличения или уменьшения скорости применяется мостовая схема включения электродвигателей (рис. 8.6) как постоянного, так и переменного тока (в последнем случае напряжение с мостовой схемы поступает на обмотку статора).

Обмотка якоря двигателя постоянного тока в этом случае питается напряжением, снимаемым с диагонали моста, образованного потенциометрами  $R_1$  и  $R_2$ . Это напряжение пропорционально перемещению движков этих потенциометров, а его полярность зависит от направления их перемещения.

### Электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением

Электродвигатели данного типа имеют две обмотки возбуждения, соединенные параллельно между собой и последовательно с обмоткой якоря, а намотанные встречно. В зависимости от желаемого направления вращения двигателя к источнику питания подключается ОВ1 или ОВ2 (рис 8.7). При переключении же этих обмоток магнитный поток возбуждения изменяет направление, а ток якоря остается прежним, т. е. знак крутящего момента изменяется на противоположный, в то время как его значение остается неизменным.

Особенность серводвигателей этого типа состоит в том, что ток в их цепи возбуждения равен току якоря и имеет максималь-

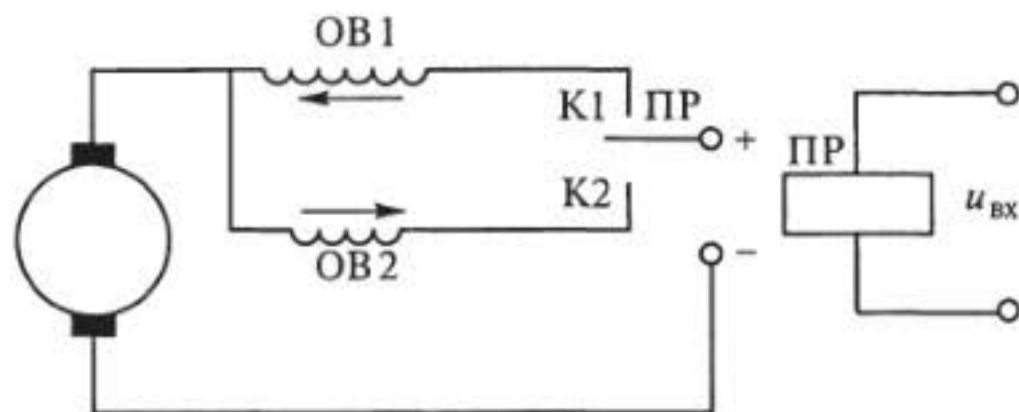


Рис. 8.7. Схема включения серводвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением

ное значение в начале разгона. Максимальному току соответствует максимальный пусковой момент, что способствует быстрому разгону двигателя, являющемуся его несомненным достоинством.

Переключение обмоток возбуждения или якоря в этих двигателях осуществляется, как правило, контактными или бесконтактными реле, которые в этом случае выполняют функции усилителя. На рис. 8.7 изображена схема включения электродвигателя с использованием поляризованного реле (ПР). В обмотку этого реле поступает управляющий сигнал, полярность которого определяет направление требуемого перемещения. При этом неважно какое значение имеет управляющий сигнал, если оно больше значения сигнала срабатывания реле.

Известно, что реле имеют нелинейную характеристику управления, т. е. схема на рис. 8.7 позволяет осуществлять только нелинейное изменение скорости (см. рис. 8.1), что и является недостатком данной схемы. Плавную (линейную) характеристику такого серводвигателя можно получить, применив схему управления с искусственной линейризацией, т. е. преобразовав нелинейную характе-

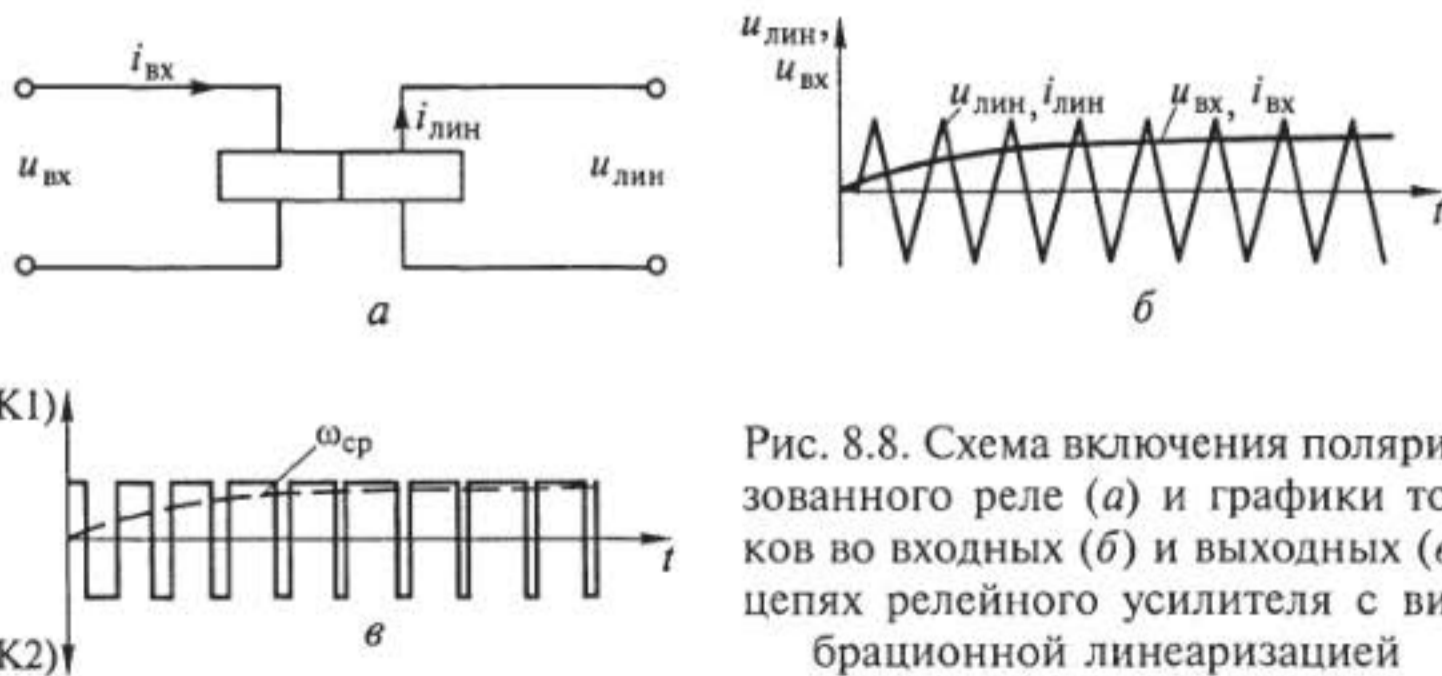


Рис. 8.8. Схема включения поляризованного реле (а) и графики токов во входных (б) и выходных (в) цепях релейного усилителя с вибрационной линейризацией

ристикой в линейную, например посредством вибрационной линеаризации. В этом случае на реле помимо тока управления будет действовать периодический сигнал  $u_{\text{лин}}$  достаточно большой частоты (но не большей, чем частота, возможная для срабатывания реле).

Вибрационную линеаризацию легко осуществить с помощью двухобмоточного поляризованного реле (рис. 8.8). Данная схема будет работать следующим образом.

Срабатывая под действием тока периодического сигнала, замыкаются поочередно контакты К1 и К2 поляризованного реле и поочередно включаются обмотки ОВ1 и ОВ2 (см. рис. 8.7). Но поскольку на реле действует и ток входного сигнала, то разность времени замкнутых состояний контактов К1 и К2 приблизительно пропорциональна входному сигналу (см. рис. 8.8), т.е. осуществляется широтно-импульсная модуляция выходных токов  $i_1$  и  $i_2$  током  $i_{\text{вх}}$ . При этом двигатель как инерционный элемент усредняет сигналы  $i_1$  и  $i_2$ . Если не принимать во внимание малые колебания якоря двигателя с частотой линеаризации, то можно сказать, что скорость его вращения  $\omega_{\text{ср}}$  будет меняться плавно, пропорционально входному сигналу, как показано на рис. 8.8, в.

### Серводвигатели переменного тока

В качестве серводвигателя переменного тока используют двухфазный асинхронный двигатель небольшой мощности с полым ротором. Схема конструкции такого электродвигателя показана на рис. 8.9, а.

Рассматриваемый двигатель имеет две обмотки на статоре, оси которых смещены относительно друг друга на  $90^\circ$  (рис. 8.9, б). Одна такая обмотка питается от независимого источника переменного тока и называется обмоткой возбуждения, а напряжение на ней является напряжением возбуждения  $U_{\text{возб}}$ . На другую обмотку, называемую обмоткой управления, подается входной сигнал  $U_{\text{упр}}$

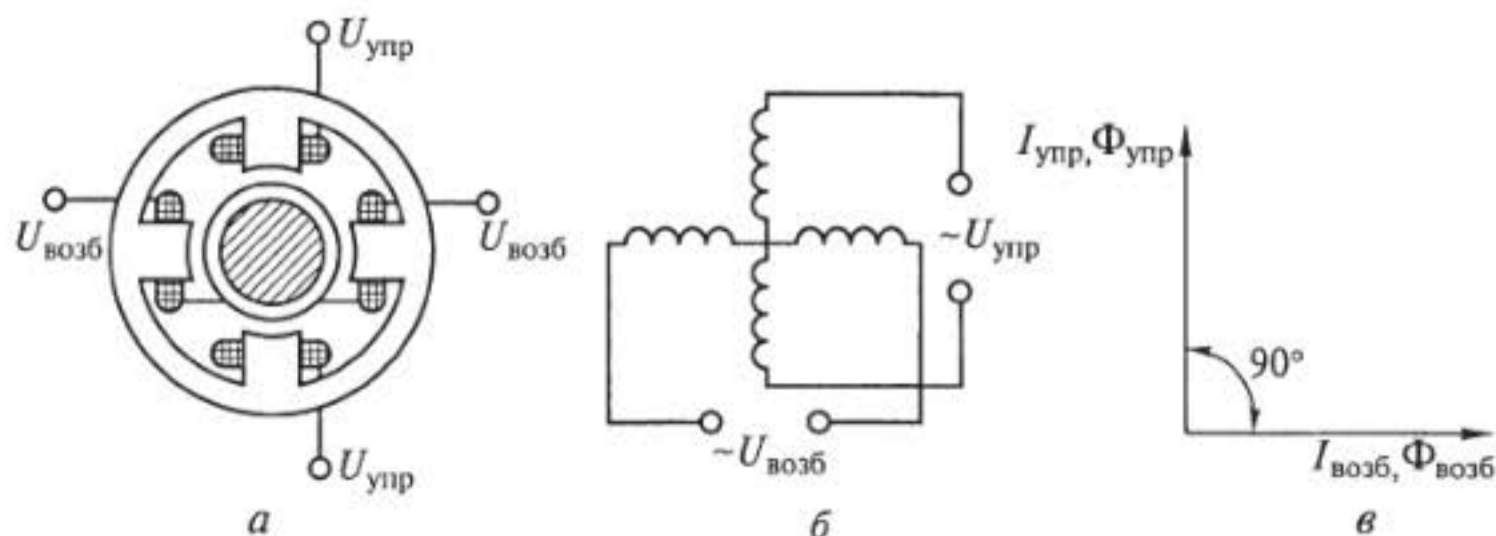


Рис. 8.9. Двухфазный серводвигатель переменного тока:

а — схема конструкции; б — расположение обмоток статора; в — векторная диаграмма магнитных потоков

переменного тока той же частоты, что и  $U_{\text{возб}}$ . Ротор, выполненный в виде тонкостенного цилиндра, вращается в зазоре между статором и неподвижным сердечником магнитопровода.

С помощью фазосдвигающей схемы осуществляется сдвиг фаз между магнитными потоками обмоток возбуждения и управления на  $\pm 90^\circ$  (рис. 8.9, в). При этом магнитные потоки обмоток создают вращающееся магнитное поле, которое наводит токи в роторе. В результате взаимодействия наведенных токов и вращающегося поля создается крутящий момент двигателя. Направление этого момента зависит от фазы управляющего сигнала, т. е. при изменении фазы на  $180^\circ$  двигатель реверсируется. Изменение амплитуды управляющего сигнала вызывает пропорциональное изменение скорости вращения двигателя.

Переходные процессы в рассматриваемом двигателе имеют такой же характер, как и в двигателях постоянного тока.

### 8.3. Гидравлические двигатели

В гидравлическом двигателе входным и выходным сигналами являются перемещения, причем их выходное перемещение усилено по мощности, т. е. гидравлический двигатель одновременно может выполнять и функции усилителя мощности.

На рис. 8.10, а представлена схема конструкции гидравлического двигателя. Входной величиной двигателя является перемещение штока 1 в корпусе 2 золотникового цилиндра. Поршни 3 и 4 золотникового цилиндра управляют клапанами подачи и слива рабочей жидкости через трубопроводы 5 и 6 из силового цилиндра 7. Выходной величиной двигателя является перемещение штока 9 силового цилиндра.

В исходном состоянии трубопроводы 5 и 6 закрыты соответственно поршнями 3 и 4. При этом поршень 8 силового цилиндра неподвижен.

При перемещении штока 1 золотникового цилиндра вверх в верхнюю полость силового цилиндра 7 поступает жидкость по трубопроводу 5. При этом давление в верхней полости цилиндра 7 будет увеличиваться, а в нижней уменьшаться, т. е. поршень 8 будет перемещаться вниз, выталкивая жидкость из нижней полости.

Скорость перемещения штока 9 силового цилиндра определяется перемещением штока 1 (в установившемся режиме), а выходное перемещение  $y$  пропорционально интегралу от входного перемещения  $x$ :

$$y = k \int_0^t x dt.$$

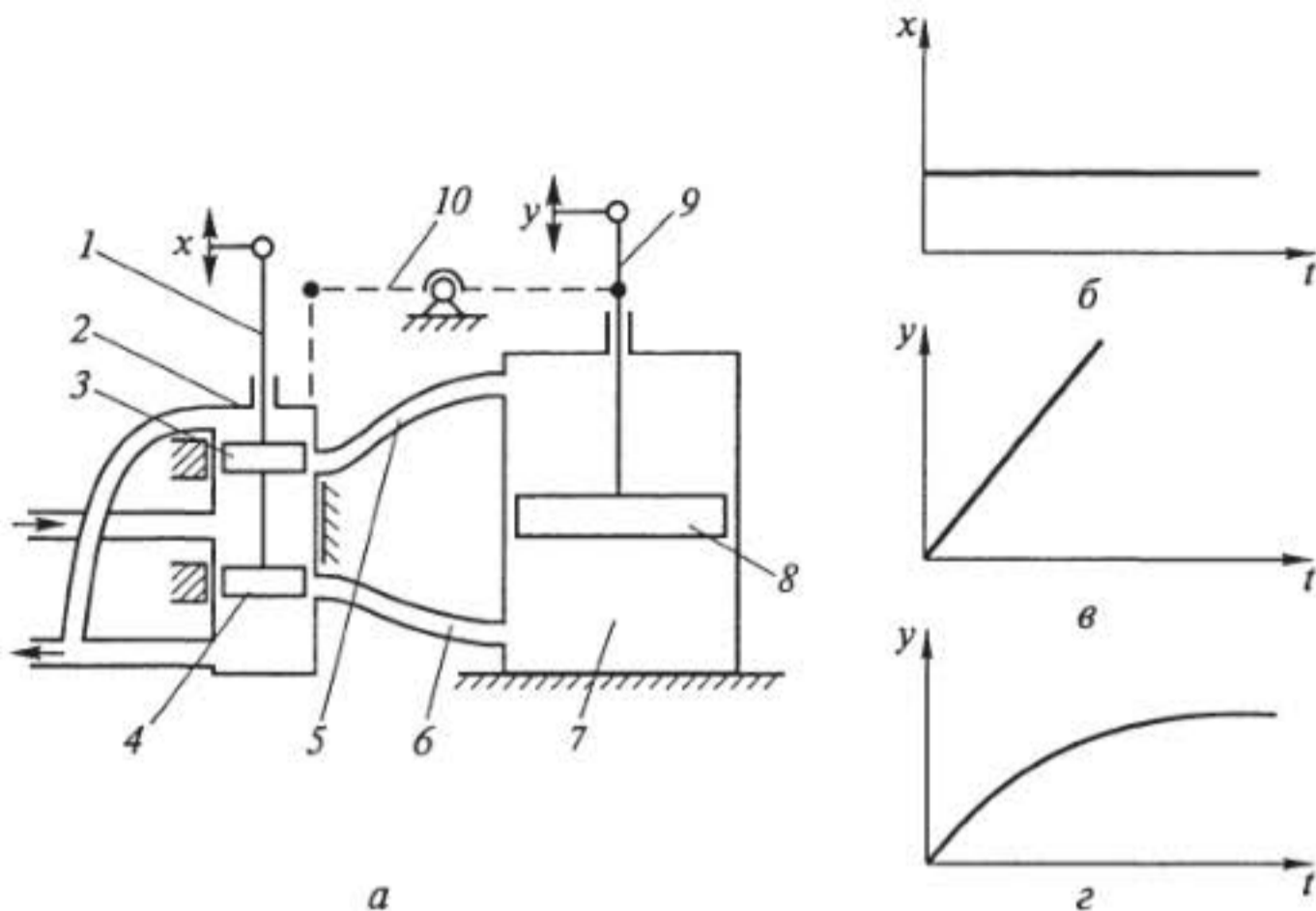


Рис. 8.10. Схема конструкции гидравлического двигателя (а) и графики его входного сигнала (б), выходного при отсутствии обратной связи (в) и выходного при наличии обратной связи (г):

1 — шток золотникового цилиндра; 2 — корпус золотникового цилиндра; 3, 4 — поршни золотникового цилиндра; 5, 6 — трубопроводы к силовому цилиндру; 7 — силовой цилиндр; 8 — поршень силового цилиндра; 9 — шток силового цилиндра; 10 — рычаг

График изменения выходного сигнала  $y$  при подаче на вход двигателя постоянного перемещения  $x = 1$  (рис. 8.10, б) приведен на рис. 8.10, в. Если соединить с помощью рычага 10 шток 9 и корпус 2 золотникового цилиндра (рычаг при этом будет выполнять функцию отрицательной обратной связи), то характер зависимости выходной величины от входной изменится: установившееся выходное перемещение  $y$  станет пропорционально входному перемещению  $x$ .

Механизм действия обратной связи заключается в следующем: одновременно с перемещением штока 9 вниз, корпус 2 золотникового цилиндра перемещается относительно поршней 3 и 4 вверх. При этом ранее открытые клапаны трубопроводов 5 и 6 постепенно закрываются, скорость движения поршня 8 уменьшается, и, отработав определенное перемещение, он останавливается.

Введение отрицательной обратной связи позволяет использовать двигатель в качестве усилителя. Переходная характеристика гидроусилителя с обратной связью показана на рис. 8.10, г.

Гидравлические усилители и двигатели широко применяются в промышленной и авиационной автоматике, так как имеют значительно меньшую массу, приходящуюся на единицу выходной

мощности, нежели электронные, магнитные и электромашинные усилители.

Инерционные свойства гидравлических усилителей незначительны вследствие малой сжимаемости жидкости и повышаются они только при наличии длинных или узких трубопроводов, а также вязкой рабочей жидкости. Скорость на выходе гидроусилителей обычно невелика, поэтому они могут работать в качестве исполнительных устройств без редукторов.

Недостатком гидроусилителей является малая надежность трубопроводов и особенно их соединений в условиях вибрации, ударов и других разрушающих воздействий, приводящая к утечкам жидкости. Гидроусилитель подвержен также влиянию окружающей температуры (жидкость может изменять вязкость и замерзать).

#### **8.4. Сервоприводы с электромагнитными муфтами**

В сервоприводе с электромагнитными муфтами для вращения выходного вала используется энергия вращающегося с постоянной скоростью двигателя. Для этой цели часто применяют наиболее простой, дешевый и широко распространенный трехфазный асинхронный двигатель.

В схеме сервопривода с электромагнитными муфтами двигатель работает непрерывно, а по управляющему сигналу с его валом соединяется выходной вал.

Схема конструкции сервопривода с муфтами представлена на рис. 8.11. Работает она следующим образом. Двигатель 1 через редуктор 2 вращает шестерни 3, а следовательно, и связанные с ними диски 4 электромагнитных муфт входной стороны. Пара дисков 5 муфт выходной стороны расположена соосно с дисками 4 муфт входной стороны.

Все диски выполнены из магнитомягкого материала. В полостях корпусов дисков 4 уложены обмотки 6 электромагнитов. Входными сигналами электромагнитных муфт (ЭММ) являются токи в обмотках электромагнитов.

При отсутствии входного сигнала между дисками 5 и 4 сцепления нет, и они не вращаются. При подаче тока в ЭММ1 ее диски 4 и 5 намагничиваются, и диск 5, имеющий свободу движения в осевом направлении, притягиваясь к диску 4, вступает в сцепление с ним через специальные фрикционные кольца. Вращение шестерни 3 передается шестерне 8 и на выходной вал 9. При выключении тока пружина 7 отжимает диск 5 от диска 4, и сцепление нарушается.

При подаче входного сигнала в ЭММ2 рабочий процесс протекает аналогично, только выходной вал в этом случае будет вращаться в другую сторону.

Кроме рассмотренной конструкции (с фрикционными дисками) существуют электромагнитные порошковые муфты. В таких муфтах промежуток между ведущей и ведомой частями механизма заполняется специальной ферромагнитной массой, состоящей из частиц карбонильного железа, взвешенных в масле либо смешанных с порошком графита или талька. При включении электромагнита ферромагнитная масса оказывается в магнитном поле; частицы железа, располагаясь по силовым линиям поля, образуют цепочки. Масса как бы загустевает и осуществляет сцепление между ведущей и ведомой частями механизма.

Когда магнитное поле снимается, на ведомую часть механизма передается только малый момент от трения в ненамагниченной массе. Сцепления в этом случае практически нет.

Сервопривод с электромагнитными муфтами имеет хорошие динамические свойства при разгоне, так как вращающийся двигатель и ведущие шестерни в момент подключения нагрузки имеют большой запас кинетической энергии. В момент отключения сцепление может сохраняться некоторое время за счет трения и оставшегося намагничивания. Для исключения запаздывания при отключении применяют торможение специальными тормозными устройствами.

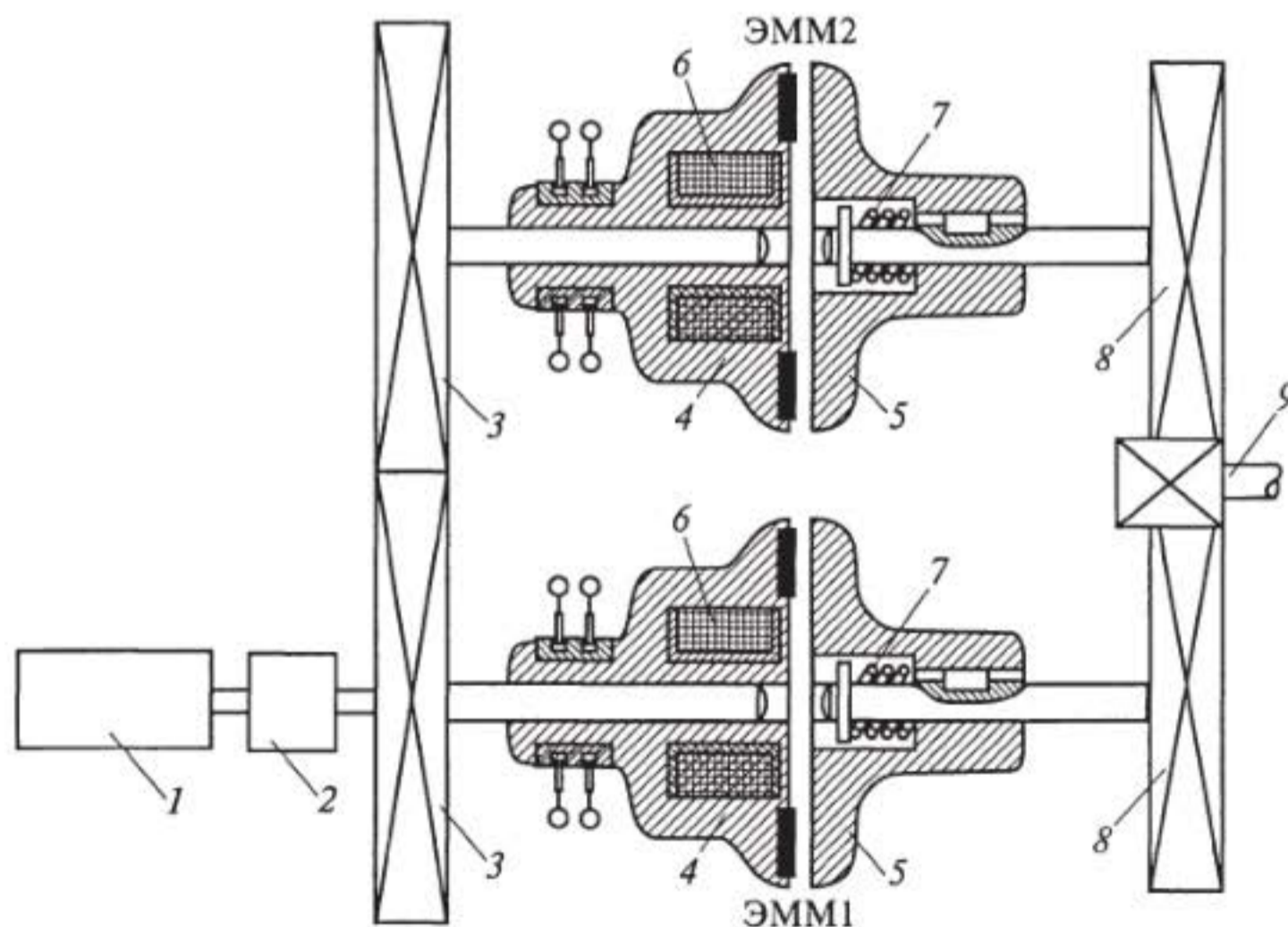


Рис. 8.11. Схема конструкции сервопривода с электромагнитными муфтами ЭММ1 и ЭММ2:

1 — двигатель; 2 — редуктор; 3, 8 — шестерни; 4 — диски муфт входной стороны; 5 — диски муфт выходной стороны; 6 — обмотки электромагнитов; 7 — пружины; 9 — выходной вал

Включение электромагнитов муфт осуществляется контактами реле.

Статическая характеристика сервоприводов с электромагнитными муфтами соответствует показанной на рис. 8.1.

## 8.5. Шаговые сервоприводы

Шаговый сервопривод был разработан для автоматических систем программного управления, в которых программа перемещений записывается в виде импульсов, дискретных во времени. При этом число импульсов соответствует требуемому числу единичных перемещений, а частота их следования — скорости перемещения.

Для шагового электропривода каждый такой импульс — это управляющий сигнал; он обрабатывает его, поворачивая ротор на определенный (единичный) угол (шаг). Значение единичного угла поворота определяется только конструкцией двигателя и не зависит ни от амплитуды управляющего сигнала, ни от его продолжительности.

На рис. 8.12 показана конструкция шагового двигателя, цилиндрический вытянутый статор *1* которого имеет четное число полюсов *2*, равномерно расположенных по окружности. По длине статора полюсы разделены на три секции — *А*, *Б*, *В*, имеющие независимое друг от друга питание обмоток. Каждая смежная пара полюсов в одной секции имеет разную полярность. В роторе двигателя столько же секций и полюсов, сколько их в статоре, но полюса его секций сдвинуты на одну треть шага относительно соседней секции. Например, когда полюса секции *А* ротора расположены напротив полюсов статора, то полюса секции *Б* сдвинуты относительно них на  $1/3$  шага по часовой стрелке, а полюса секции *В* — на  $2/3$  шага в ту же сторону или, что то же самое, на  $1/3$  шага против часовой стрелки (рис. 8.13).

Если при таком положении ротора подать питание к полюсам статора секции *А*, то ротор останется на месте, так как его поло-

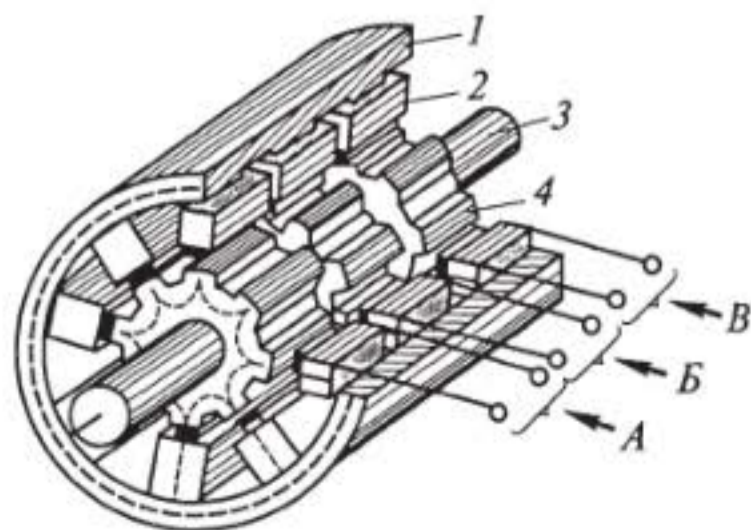


Рис. 8.12. Конструкция шагового двигателя:

*1* — статор; *2* — полюс статора; *3* — вал двигателя; *4* — полюс ротора; *А*, *Б*, *В* — секции статора



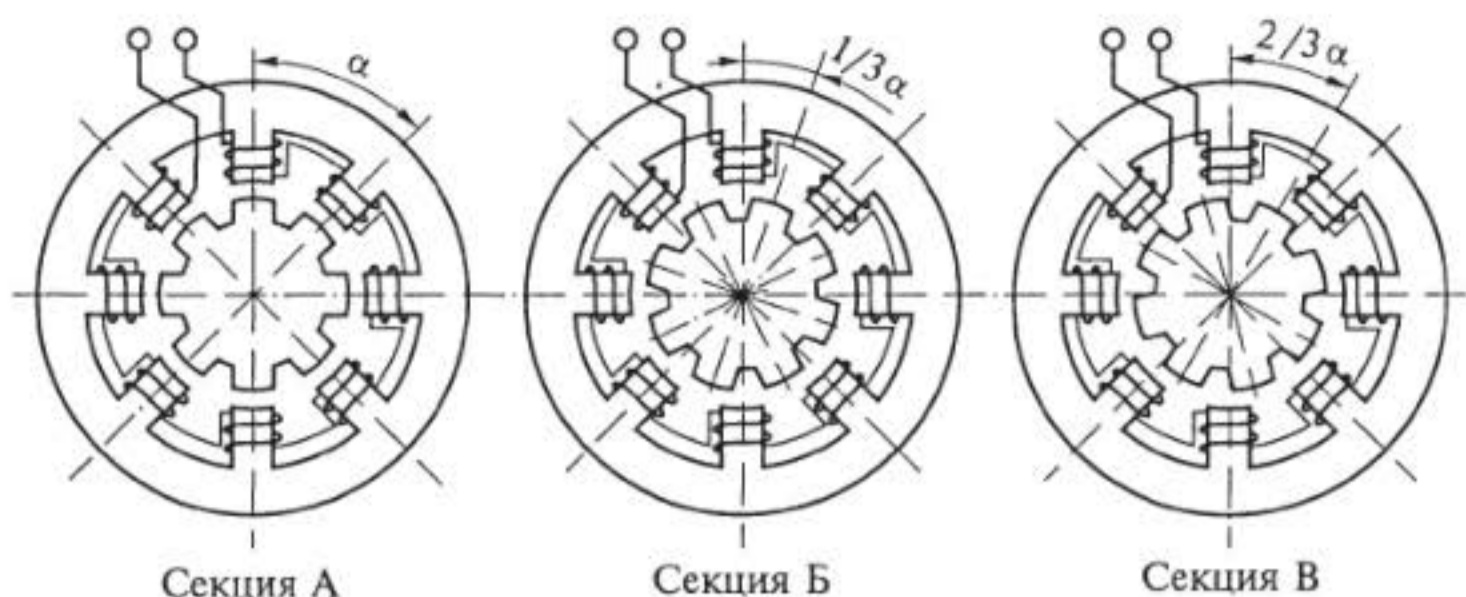


Рис. 8.13. Схемы расположения полюсов ротора и статора в секциях *A*, *B*, *B* шагового двигателя

жение соответствует минимальному магнитному сопротивлению магнитопровода.

Если подать питание на обмотки полюсов статора секции *B*, то ротор повернется против часовой стрелки на  $1/3$  межполюсного угла и остановится в таком положении. Когда полюсы секции *B* ротора будут под полюсами статора, сопротивление магнитопровода будет минимальным. Выполненный ротором поворот на  $1/3$  межполюсного угла — это один шаг двигателя.

Если после подачи управляющего импульса в секцию *B* статора следующий импульс подать в секцию *V* статора, то ротор сделает еще один шаг против часовой стрелки; если же после секции *B* возбудить секцию *A*, то шаг ротором будет сделан в противоположном направлении.

Таким образом, подача импульсов в секции статора в порядке *A*, *B*, *B* соответствует шагам ротора против часовой стрелки, а в порядке *A*, *V*, *B* — шагам ротора в противоположном направлении (рис. 8.14).

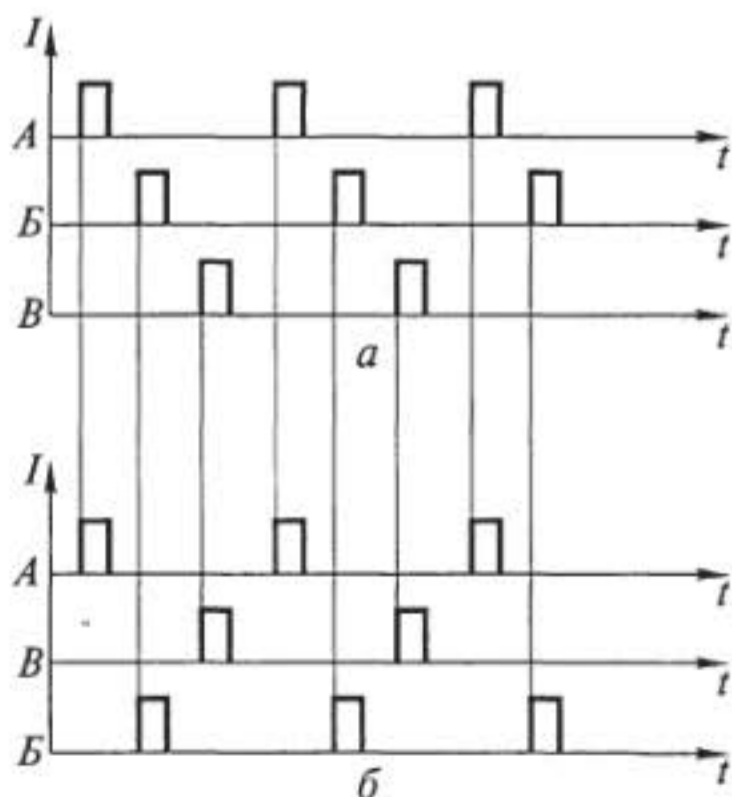


Рис. 8.14. Диаграммы управляющих импульсов шагового двигателя при движении ротора по часовой стрелке (*a*) и против часовой стрелки (*б*)

Импульсы питания обмоток статора формируются специальными кольцевыми схемами с использованием реле, тиратронов или полупроводниковых элементов. Скорость шаговых двигателей может достигать  $10^4$  шагов в секунду при плавном ее повышении и обычно порядка  $10^2$  шагов в секунду при реверсировании (или так называемой приемистости).

Динамические свойства лучше у шаговых двигателей малых мощностей, поэтому в быстродействующих системах программного управления их используют в качестве первичного сервоприводного устройства, преобразующего импульсный ход в перемещение, а затем включают усилитель перемещения (обычно гидравлический), выполняющий перемещение нагрузки.

### Контрольные вопросы

1. Изобразите статические характеристики сервоприводов релейного действия и линейную характеристику с зоной нечувствительности.
2. Поясните схемы работы, включения и реверсирования серводвигателя постоянного тока.
3. Как обеспечивается торможение серводвигателя постоянного тока и для чего применяется мостовая схема его включения?
4. Как работает схема включения серводвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением?
5. Как обеспечивается линеаризация характеристики управления серводвигателя, управляемого поляризованным реле?
6. Поясните принцип работы в качестве серводвигателя двухфазного асинхронного двигателя с полым ротором.
7. Как устроен гидравлический двигатель и в чем заключаются его преимущества?
8. Что позволяет использовать гидродвигатель в качестве гидроусилителя?
9. Чем различается работа гидродвигателей при наличии в них и отсутствии обратной связи? Какой вид имеют соответствующие переходные характеристики гидродвигателей?
10. Поясните схему конструкции и принцип работы серводвигателя с электромагнитными муфтами.
11. Что такое шаговый сервопривод и как он работает?
12. Рассказать по диаграмме управляющих импульсов, как можно изменять направление и скорость вращения шагового двигателя.

## Глава 9

### ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ САУ

#### 9.1. Режимы работы объекта. Возмущающие воздействия

При исследовании объектов управления используется метод математического моделирования. Причем объект рассматривается как простой преобразователь входного сигнала в выходной без учета физико-химической сущности процесса, протекающего в нем, т.е. целью исследования объекта управления является формирование его математической модели — уравнения взаимосвязи выходного сигнала объекта (регулируемого параметра) с входным сигналом.

Объект управления может работать в двух режимах: статическом и динамическом.

**Статический режим** — это режим работы, при котором приток энергии или вещества в объект равен оттоку, и объект находится в состоянии равновесия. Например, это движение поезда по горизонтальной плоскости с постоянной скоростью, когда сила тяги уравновешена силой трения.

**Динамический режим** — это режим работы объекта, при котором нарушено равновесие между притоком и оттоком энергии или вещества.

Математическая модель объекта или уравнение математической взаимосвязи его выходного и входного сигналов в динамическом режиме работы называется динамической характеристикой. Схема исследования объекта управления изображена на рис. 9.1.

Поскольку в динамическом режиме работы выходной и входной сигналы объекта изменяются во времени или пространстве, то его динамическая характеристика, как правило, описывается



Рис. 9.1. Схема исследования объекта управления

дифференциальным уравнением. В настоящее время дифференциальные уравнения являются основным инструментом при математическом описании всего, что изменяется во времени и пространстве: от процесса набухания почек растения до перемещения космических тел.

К сожалению, большинство дифференциальных уравнений не имеет общего решения, а частные решения (для заданных условий) с помощью численных методов Эйлера, Рунге-Кутты и других требуют много вычислений.

Если при исследовании не учитывать физико-химическую сущность технологических процессов, протекающих в объекте (т.е. рассматривать его как «черный ящик»), оказывается, что различные по своему объему, конфигурации и назначению объекты управления в динамическом режиме описываются одними и теми же типами уравнений взаимосвязи выходного и входного сигналов.

В ТАУ удачно подобраны всего шесть типов уравнений взаимосвязи выходного и входного сигналов объектов (или элементов) САУ, которые названы *типовыми динамическими звеньями* и которые составляют математический аппарат (инструмент), используемый при исследовании объектов в целях получения математических моделей.

Методика применения этого математического инструмента — совокупности шести типовых динамических звеньев (ТДЗ) заключается в следующем.

На действующий объект управления (то что объект должен уже работать, является недостатком данного метода) по входному каналу подается одно из трех типовых возмущающих воздействий (рис. 9.2):

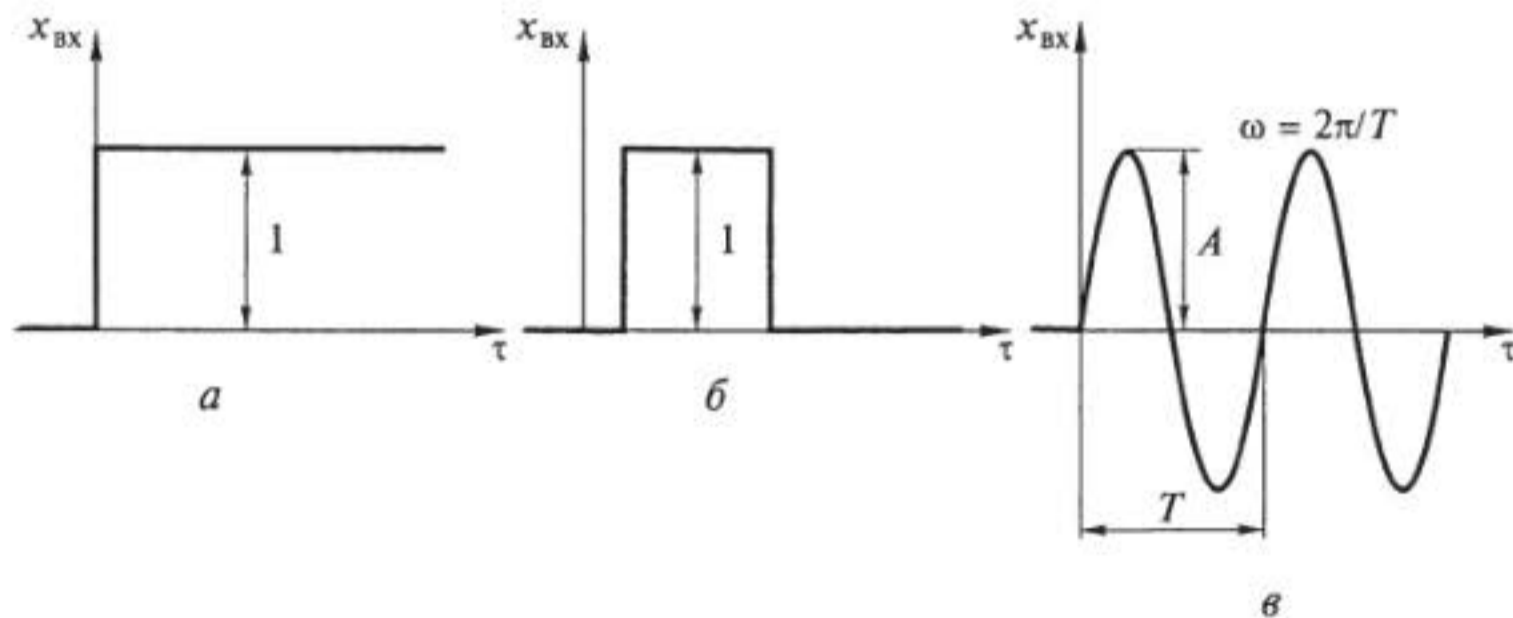


Рис. 9.2. Типовые возмущающие воздействия:

*a* — единичный скачок; *б* — единичный импульс; *в* — синусоидальные колебания

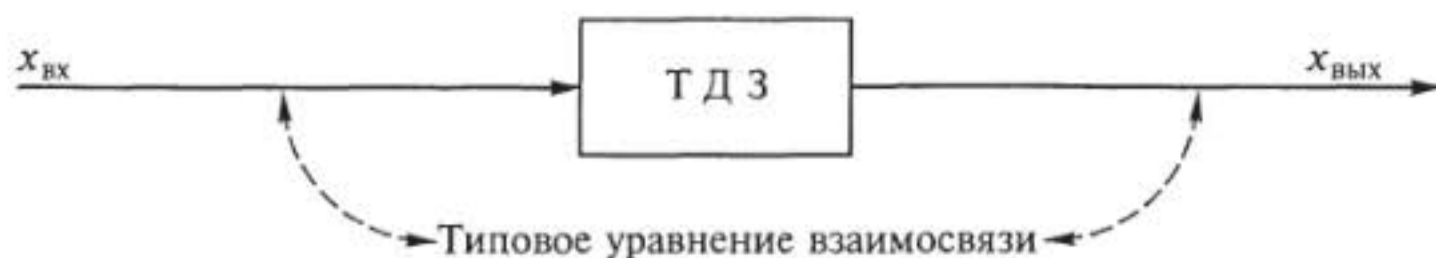


Рис. 9.3. Схема типового динамического звена

единичный скачок;  
 единичный импульс;  
 синусоидальные колебания с различными частотой ( $\omega$ ) или периодом  $T$ .

Амплитуда  $A$  синусоидальных колебаний может быть постоянной, но по значению она должна быть достаточной, чтобы выходной сигнал также был синусоидальным.

На практике чаще всего используют возмущающее воздействие в виде единичного скачка. Реакция объекта на это возмущение (график изменения во времени выходного сигнала объекта после подачи его на вход возмущения в виде единичного скачка) называется *кривой разгона*.

На рис. 9.3 схематично изображено типовое динамическое звено. Схема ТДЗ похожа на схему исследования объекта управления; принципиальное их различие состоит в том, что объект — это материальное воплощение технологического процесса, а ТДЗ — математическая абстракция, за которой нет ничего кроме типового уравнения взаимосвязи его выходного и входного сигналов.

Каждое типовое динамическое звено имеет свою типовую кривую разгона и ряд других типовых характеристик.

Полученную на действующем объекте экспериментальную кривую разгона сравнивают с набором шести кривых разгона ТДЗ и при совпадении характера изменения во времени экспериментальной и какой-либо типовой кривой разгона проводят замену (аппроксимацию) исследуемого объекта соответствующим типовым динамическим звеном.

Таким образом, типовое уравнение взаимосвязи выходного и входного сигналов ТДЗ становится уравнением взаимосвязи соответствующих сигналов объекта, или искомой математической моделью. Коэффициенты, входящие в уравнение ТДЗ, находят по экспериментальной кривой разгона объекта.

Более удобный и практичный математический аппарат, чем совокупность из шести ТДЗ, используемых в ТАУ, трудно представить, т. е. любые объекты управления можно исследовать и получить их математические модели — динамические характеристики (с достаточной для практики точностью), используя всего шесть типовых динамических звеньев.

## 9.2. Аperiodическое (инерционное, статическое) звено

Типовое дифференциальное уравнение взаимосвязи выходного и входного сигналов аperiodического ТДЗ имеет вид

$$T_0 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{d\tau} + x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}},$$

где  $T_0$  — постоянная времени;  $k$  — коэффициент передачи.

Дифференциальное уравнение является неудобной формой математической модели звена или объекта, так как решение большинства дифференциальных уравнений — это сложная вычислительная процедура. Более удобна математическая модель объекта, записанная в виде передаточной функции.

*Передаточной функцией* называется преобразованное по Лапласу исходное дифференциальное уравнение, т.е. уравнение, записанное в виде отношения преобразованных по Лапласу выходного и входного сигналов звена (объекта).

В преобразовании по Лапласу исходное дифференциальное уравнение называется *оригиналом*, а преобразованное и записанное в операторной форме уравнение — его *изображением*. Суть преобразования Лапласа заключается в замене функций вещественных переменных —  $x_{\text{ВЫХ}}(\tau)$  и  $x_{\text{ВХ}}(\tau)$  на функции комплексных переменных —  $x_{\text{ВЫХ}}(p)$  и  $x_{\text{ВХ}}(p)$ , где  $p$  — оператор Лапласа (комплексное число  $p = \pm m \pm in$ ). Эти функции связаны между собой интегралом Лапласа:

$$x_{\text{ВЫХ}}(p) = \int_0^{\infty} x_{\text{ВЫХ}}(\tau) e^{-p\tau} d\tau;$$
$$x_{\text{ВХ}}(p) = \int_0^{\infty} x_{\text{ВХ}}(\tau) e^{-p\tau} d\tau.$$

Для большинства дифференциальных уравнений, используемых в ТДЗ, чисто формальным условием перехода от оригинала к изображению будут следующие замены:

$$d/d\tau \text{ на } p; \quad d^2/d\tau^2 \text{ на } p^2 \text{ и т.д.}$$

Таким образом легко можно получить из оригинала изображение, т.е. операторную форму записи дифференциального уравнения аperiodического ТДЗ.

Дифференциальное уравнение аperiodического звена — оригинал имеет вид

$$T_0 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{d\tau} + x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}},$$

а операторная форма записи — изображение этого уравнения

$$T_0 p x_{\text{вых}}(p) + x_{\text{вых}}(p) = k x_{\text{вх}}(p).$$

Огромное преимущество такого преобразования заключается в том, что записанное в операторной форме исходное дифференциальное уравнение становится алгебраическим.

Если бы все дифференциальные уравнения можно было преобразовать по Лапласу, это была бы революция в развитии математики, так как решать алгебраические уравнения значительно проще. К сожалению, это возможно только для небольшого их числа, например для дифференциальных уравнений ТДЗ.

Поскольку уравнение изображения апериодического звена алгебраическое, его можно преобразовать следующим образом:

$$(T_0 p + 1) x_{\text{вых}}(p) = k x_{\text{вх}}(p).$$

Из этого выражения легко получить отношение  $x_{\text{вых}}(p)/x_{\text{вх}}(p)$ , которое называется передаточной функцией и для апериодического звена имеет вид

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{k}{T_0 p + 1}.$$

Каждое типовое динамическое звено имеет ряд типовых частотных характеристик: амплитудно-частотную (АЧХ); фазочастотную (ФЧХ); амплитудно-фазовую частотную АФЧХ (или АФХ); логарифмическую амплитудно-частотную (ЛАЧХ); логарифмическую фазочастотную (ЛФЧХ).

На практике чаще используют амплитудно-фазовую частотную характеристику (или АФХ).

АФХ является вектором, а график АФХ — годографом этого вектора, т. е. кривой на комплексной плоскости, которую описывает конец вектора при изменении частоты  $\omega$  от 0 до  $\infty$ . Изображение вектора на комплексной плоскости показано на рис. 9.4. Вектор характеризуют две величины: направление (градиент) и длина (скаляр, или вектор по модулю).

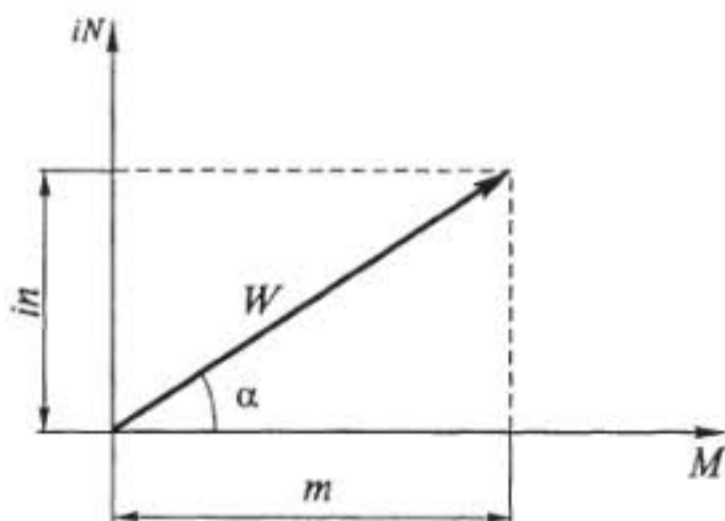


Рис. 9.4. Изображение вектора на комплексной плоскости

Вектор аналитически можно записать в виде двух проекций на действительную и мнимую оси, и выразить эти проекции через угол  $\alpha$ :

$$W = \pm m \pm in = |W| \cos \alpha + |W| i \sin \alpha = |W| (\cos \alpha + i \sin \alpha)$$

или, используя формулу Эйлера:

$$W = |W| e^{i\alpha},$$

где  $|W|$  — вектор по модулю, или длина вектора;  $e = 2,71$  — основание натуральных логарифмов;  $i$  — мнимое число,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $i^2 = -1$ ,  $i^3 = -1\sqrt{-1}$ ,  $i^4 = +1$ .

Аналитическое выражение вектора АФХ любого ТДЗ легко получить через передаточную функцию, заменив в ней оператор Лапласа  $p$  на выражение  $i\omega$ , где  $\omega$  — частота колебаний,  $\omega = 2\pi/T$ ;  $T$  — период колебаний.

Для апериодического звена АФХ имеет вид

$$W(i\omega) = \frac{k}{T_0(i\omega) + 1}.$$

Чтобы записать вектор АФХ в виде суммы проекций на действительную и мнимую оси, необходимо провести следующие преобразования:

$$\begin{aligned} W(i\omega) &= \frac{k}{T_0(i\omega) + 1} \frac{T_0(i\omega) - 1}{T_0(i\omega) - 1} = \frac{k [T_0(i\omega) - 1]}{T_0^2(i\omega) - 1} = \\ &= \frac{-k}{T_0^2(-1)\omega^2 - 1} + i \frac{kT_0\omega}{T_0^2(-1)\omega^2 - 1} = \underbrace{\frac{k}{T_0^2\omega^2 + 1}}_{m(\omega)} - i \underbrace{\frac{kT_0\omega}{T_0^2\omega^2 + 1}}_{in(\omega)}. \end{aligned}$$

Изменяя частоту  $\omega$  от 0 до  $\infty$ , можно построить на комплексной плоскости график вектора АФХ — его годограф (рис. 9.5), представляющий собой полуокружность, расположенную в четвертом квадранте комплексной плоскости, диаметр которой равен коэффициенту  $k$ .

На рис. 9.6 приведена типовая кривая разгона апериодического звена, которая называется *экспонентой*. Любая экспонента обладает одним замечательным свойством: если к любой ее точке провести касательную, а затем точку касания и точку пересечения касательной с асимптотой, к которой с течением времени приближается экспонента, спроецировать на ось времени, то получится один и тот же отрезок на оси времени. Эта проекция, называемая *постоянной времени*, соответствует коэффициенту  $T_0$  в передаточной функции и АФХ апериодического звена, а ордината



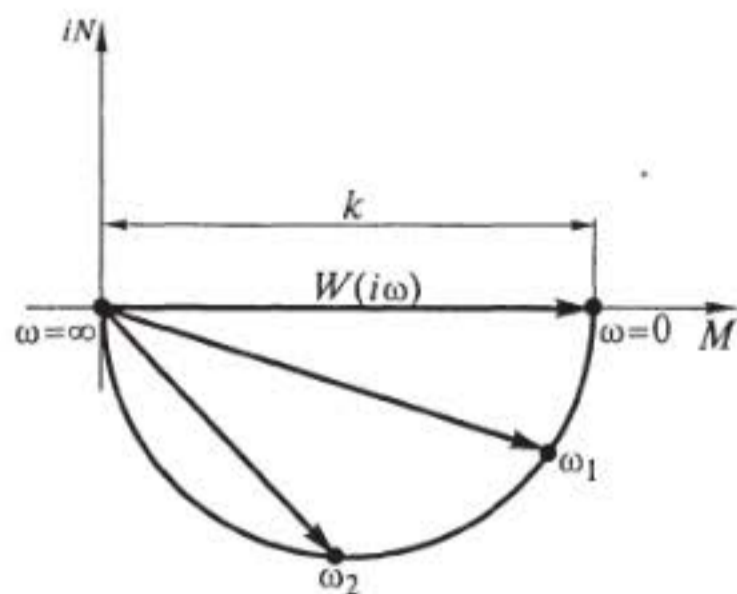


Рис. 9.5. АФХ аperiodического ТДЗ

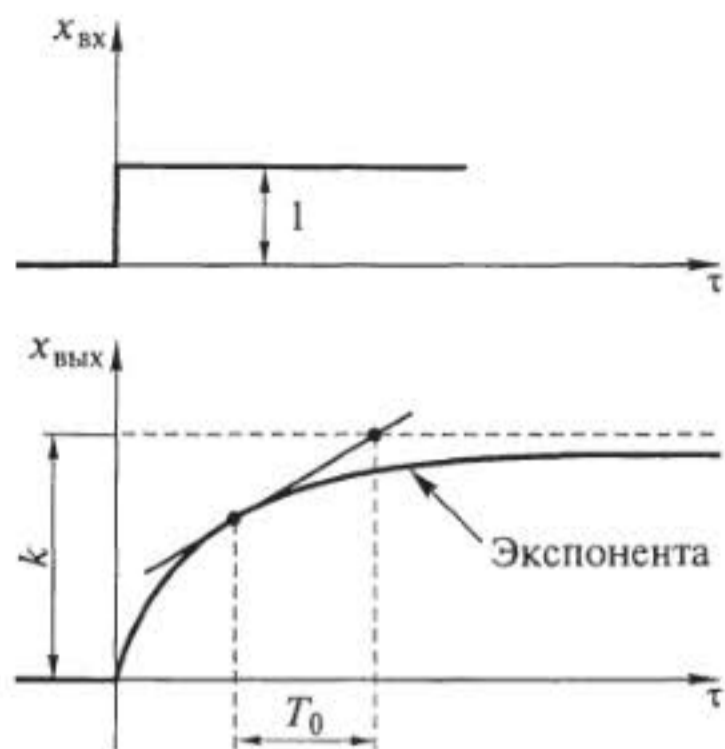


Рис. 9.6. Входной сигнал и типовая кривая разгона аperiodического звена

асимптоты, к которой стремится экспонента, — коэффициенту  $k$  в его передаточной функции. Таким образом по кривой разгона легко найти коэффициенты  $k$  и  $T_0$  в передаточной функции аperiodического звена.

Примером реализации аperiodического звена является электродвигатель небольшой мощности, который после включения в электросеть (подачи единичного скачка) набирает обороты по экспоненте.

Также примером реализации аperiodического звена может быть установка, изображенная на рис. 9.7.

В бак поступает поток воды с расходом  $Q_1$ ; из бака вытекает свободно поток воды с расходом  $Q_2$ . Регулируемый параметр  $x_{\text{вых}}$  — это уровень  $H$  воды в баке.

При подаче единичного скачка  $Q_1$  уровень  $H$  в баке повышается; при этом увеличивается гидростатическое давление и возрастает  $Q_2$ . Затем уровень воды  $H$  стабилизируется (т.е. экспонента приближается к асимптоте). Эта способность самостоятельно вос-

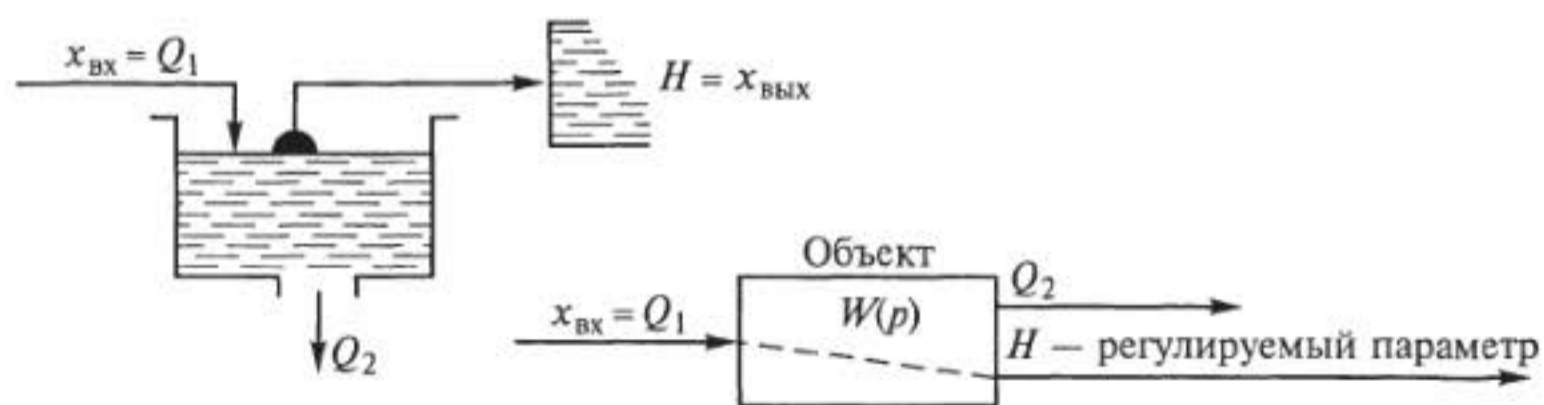


Рис. 9.7. Пример реализации аperiodического звена

становливать равновесие, присущая объектам, аппроксимируемым апериодическим ТДЗ, за счет притока или стока энергии или вещества называется самовыравниванием. Количественно самовыравнивание определяется коэффициентом  $p$ , равным обратному значению коэффициента  $k$  в передаточной функции звена, т. е.  $p = 1/k$ .

В литературе объекты с передаточной функцией апериодического звена называют статическими.

### 9.3. Астатическое (интегрирующее) звено

Типовое дифференциальное уравнение этого звена имеет вид

$$T \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{d\tau} = x_{\text{ВХ}}.$$

Это уравнение можно решить в общем виде, взяв интегралы левой и правой его частей:

$$\int T \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{d\tau} = \int x_{\text{ВХ}} d\tau \quad \text{или} \quad T x_{\text{ВЫХ}} = x_{\text{ВХ}}.$$

Посредством преобразования Лапласа получаем передаточную функцию астатического звена.

Операторная форма записи дифференциального уравнения

$$T p x_{\text{ВЫХ}}(p) = x_{\text{ВХ}}(p).$$

Передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{x_{\text{ВЫХ}}(p)}{x_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{1}{T p}.$$

Из передаточной функции легко получить аналитическое выражение вектора АФХ астатического звена путем замены оператора Лапласа  $p$  на выражение  $i\omega$ :

$$W(i\omega) = \frac{1}{T(i\omega)} = \frac{1}{T(i\omega)} \frac{i}{i} = \frac{i}{T(-1)\omega} = \underbrace{0}_{m(\omega)} - i \underbrace{\frac{1}{T\omega}}_{in(\omega)}.$$

Разделив после преобразования вектор АФХ на действительную  $m$  и мнимую  $in$  части, легко построить его годограф, изменяя частоту  $\omega$  от 0 до  $\infty$  (рис. 9.8).

Конец вектора АФХ перемещается по отрицательной мнимой полуоси комплексной плоскости, которая и будет графиком АФХ для астатического звена.

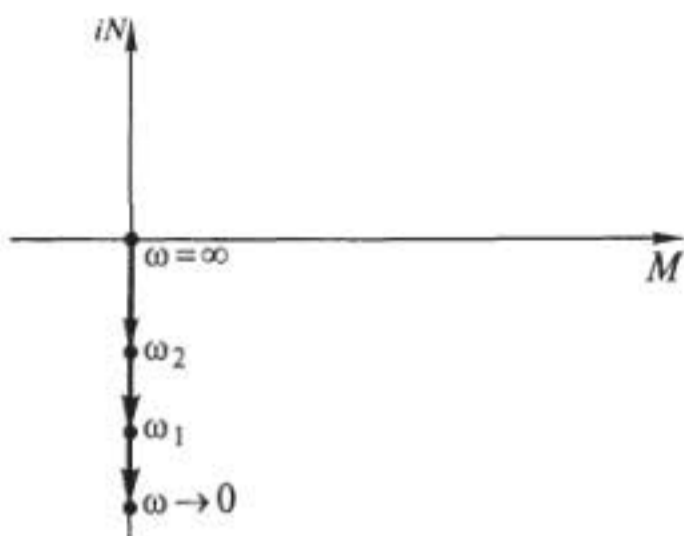


Рис. 9.8. АФХ астатического звена

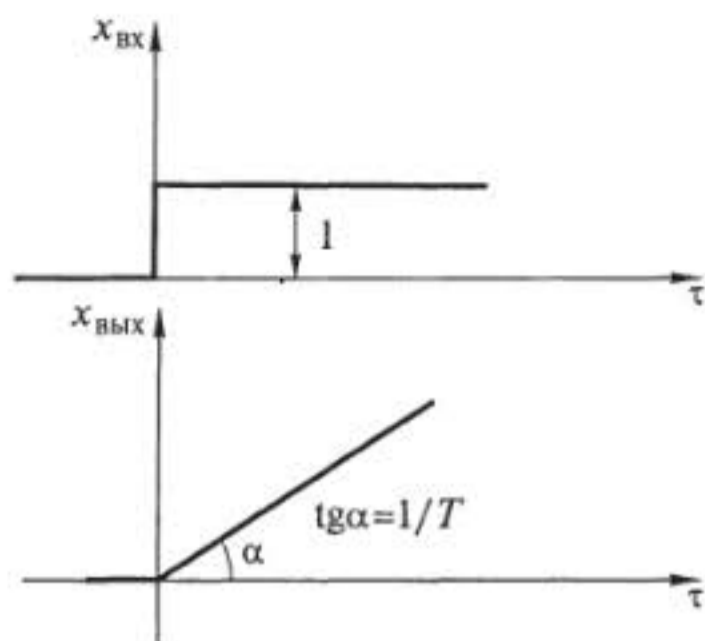


Рис. 9.9. Входной сигнал и типовая кривая разгона астатического звена

На рис. 9.9 изображена типовая кривая разгона астатического звена. По этому графику видно, что объект, аппроксимируемый астатическим ТДЗ, не обладает свойством самовыравнивания.

По кривой разгона легко определить коэффициент  $T$  в передаточной функции астатического звена:

$$T = 1/\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{arctg} \alpha.$$

В литературе передаточную функцию астатического звена иногда записывают в виде

$$W(p) = \frac{k}{p},$$

а после преобразования

$$W(p) = \frac{k}{p} = \frac{1}{\frac{1}{k}p} = \frac{1}{Tp}.$$

Примером реализации астатического ТДЗ является любой бункер-накопитель в технологической цепи машиностроительного производства.

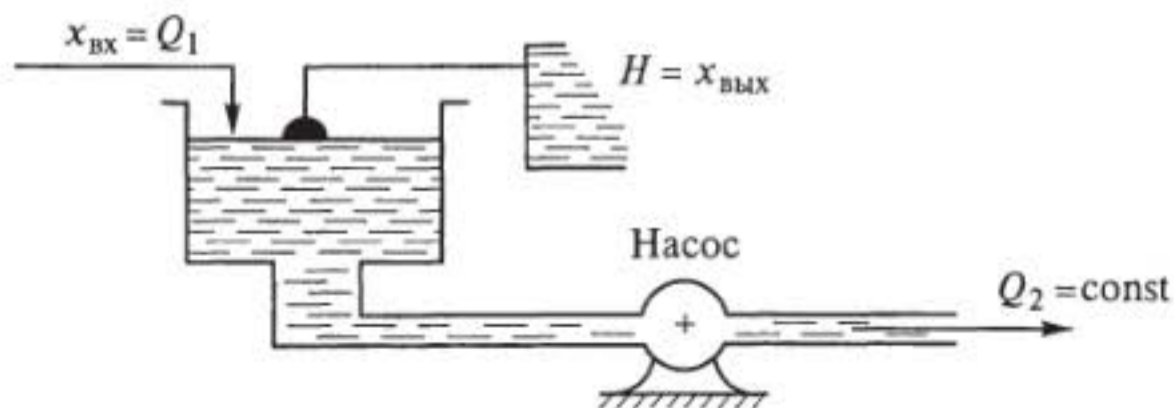


Рис. 9.10. Пример реализации астатического звена

Также примером реализации астатического ТДЗ может быть цилиндрический бак, из которого вода откачивается насосом постоянной производительности (рис. 9.10).

Равновесие в этой системе наступает только при равенстве входного потока  $Q_1$  производительности насоса  $Q_2$ . В остальных случаях будет непрерывное наполнение или опорожнение бака в соответствии с кривой разгона типового астатического звена.

Объекты, которые аппроксимируются астатическим (интегрирующим) звеном, называют *астатическими*. Такие объекты не обладают свойством самовыравнивания.

#### 9.4. Колебательное (апериодическое 2-го порядка) звено

Типовое дифференциальное уравнение этого звена имеет вид

$$T_1 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}^2}{d\tau^2} + T_2 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{d\tau} + x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}}.$$

Формально заменив  $d^2/d\tau^2$  на  $p^2$ , а  $d/d\tau$  на  $p$ , получим операторную форму записи этого дифференциального уравнения, преобразованного по Лапласу в алгебраическое:

$$T_1 p^2 x_{\text{ВЫХ}}(p) + T_2 p x_{\text{ВЫХ}}(p) + x_{\text{ВЫХ}}(p) = k x_{\text{ВХ}}(p).$$

Поскольку это уравнение алгебраическое, можно  $x_{\text{ВЫХ}}(p)$  вынести за скобки:

$$(T_1 p^2 + T_2 p + 1) x_{\text{ВЫХ}}(p) = k x_{\text{ВХ}}(p).$$

Преобразуя последнее уравнение в отношение выходного сигнала к входному, получим передаточную функцию колебательного звена:

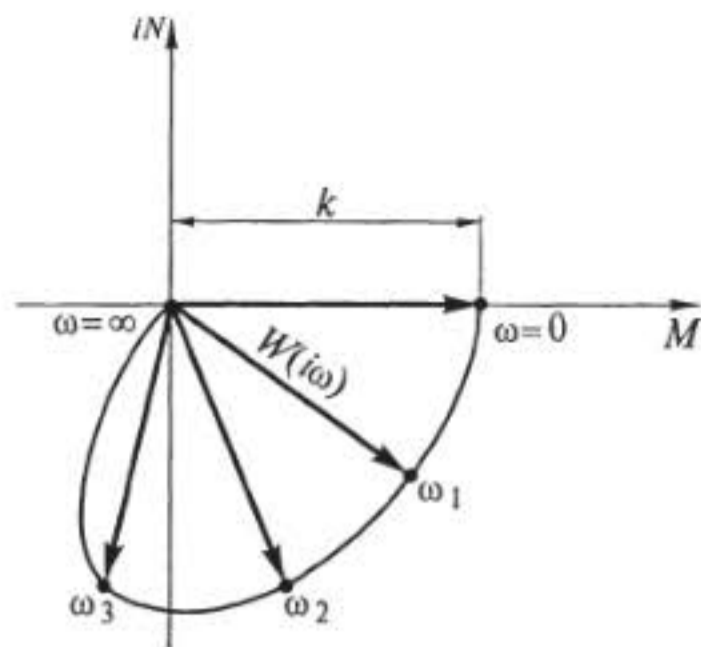
$$W(p) = \frac{x_{\text{ВЫХ}}(p)}{x_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{k}{T_1 p^2 + T_2 p + 1}.$$

Из передаточной функции можно получить аналитическое выражение вектора АФХ колебательного звена, заменив оператор Лапласа  $p$  на выражение  $i\omega$ :

$$W(i\omega) = \frac{k}{T_1 (i\omega)^2 + T_2 (i\omega) + 1}.$$

Чтобы выделить действительную и мнимую части в выражении вектора АФХ, проведем следующие алгебраические преобразования:

Рис. 9.11. АФХ колебательного (апериодического 2-го порядка) звена



$$\begin{aligned}
 W(i\omega) &= \frac{k}{T_1(i\omega)^2 + T_2(i\omega) + 1} = \frac{k}{\underbrace{1 - T_1\omega^2}_a + \underbrace{iT_2\omega}_b} \frac{a-b}{a-b} = \\
 &= \frac{k(1 - T_1\omega^2 - iT_2\omega)}{(1 - T_1\omega^2)^2 - (-1)T_2^2\omega^2} = \frac{k(1 - T_1\omega^2)}{\underbrace{(1 - T_1\omega^2)^2 + T_2^2\omega^2}_{m(\omega)}} - i \frac{kT_2\omega}{\underbrace{(1 - T_1\omega^2)^2 + T_2^2\omega^2}_{in(\omega)}}.
 \end{aligned}$$

Изменяя частоту от 0 до  $\infty$  в действительной  $m(\omega)$  и мнимой  $in(\omega)$  частях вектора АФХ данного звена, легко построить его годограф (рис. 9.11).

Типовые кривые разгона колебательного и апериодического 2-го порядка звеньев приведены на рис. 9.12. Различие приведенных кривых определяет соотношение коэффициентов  $T_1$  и  $T_2$  в исходном типовом дифференциальном уравнении: если  $T_2^2 < 4T_1$ , то система ведет себя как колебательное звено, если же  $T_2^2 \geq 4T_1$  — как апериодическое звено 2-го порядка.

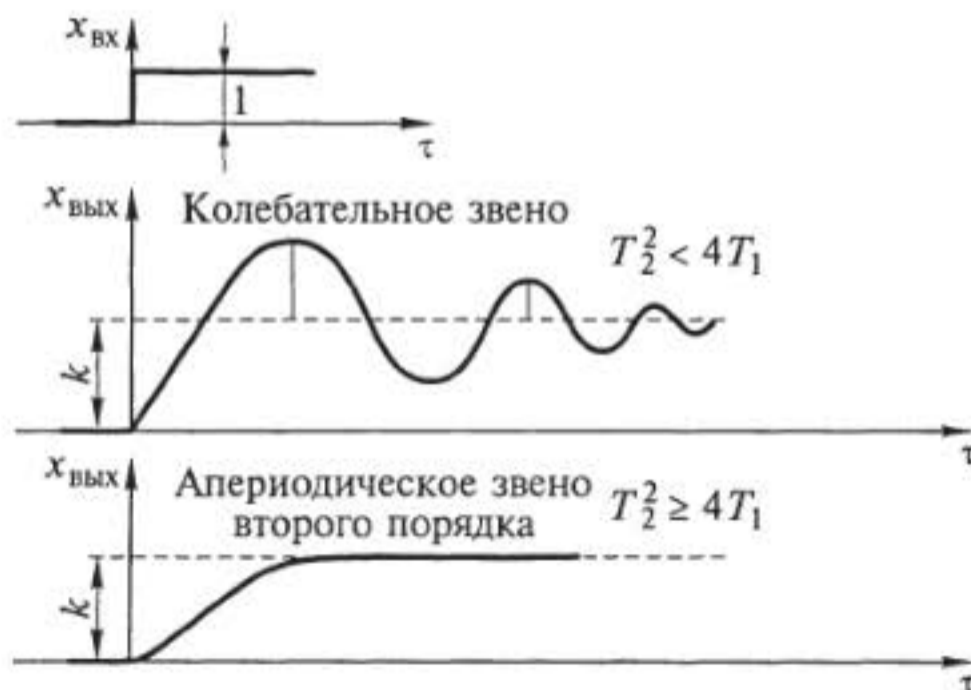


Рис. 9.12. Входной сигнал и типовые кривые разгона колебательного и апериодического 2-го порядка звеньев

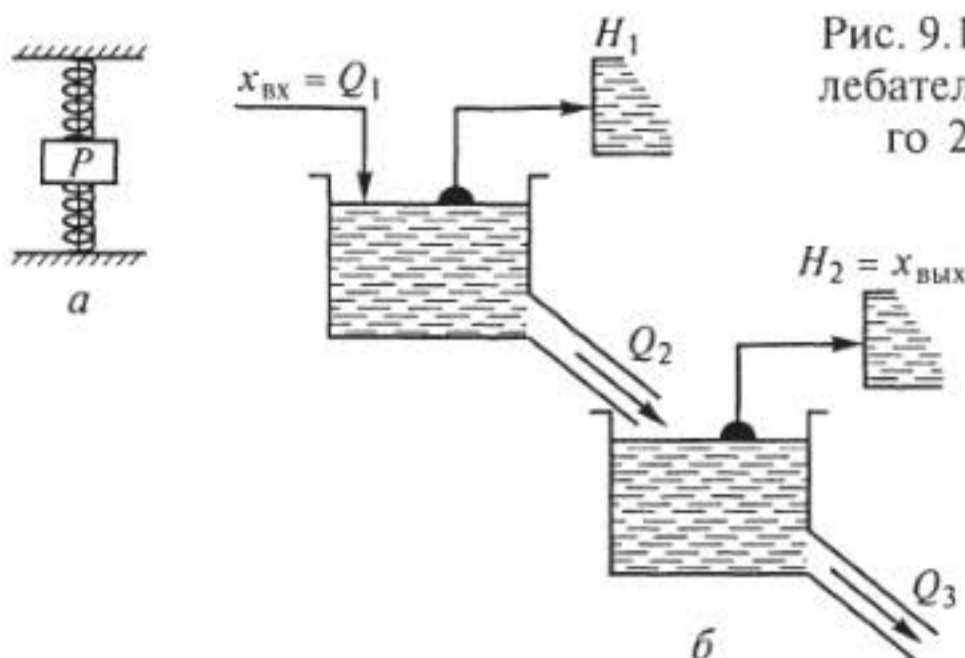


Рис. 9.13. Примеры реализации колебательного (а) и апериодического 2-го порядка (б) звеньев

Из рис. 9.12 очевидно, что объекты, аппроксимируемые колебательным или апериодическим 2-го порядка звеном обладают свойством самовыравнивания, т.е. способностью самостоятельно восстанавливать состояние равновесия после возмущающего воздействия.

Примером реализации колебательного звена может служить механическая система (колесная пара вагона), изображенная на рис. 9.13, а, а апериодического звена 2-го порядка — система из двух проточных прудов (рис. 9.13, б), в которой регулируемым параметром  $x_{\text{вых}}$  является уровень  $H_2$  воды во втором пруду.

По кривым разгона колебательного и апериодического звеньев легко найти значение коэффициента  $k$  в их передаточной функции. Определить же коэффициенты  $T_1$  и  $T_2$  значительно сложнее.

### 9.5. Пропорциональное (усилительное, безынерционное) звено

Типовое уравнение взаимосвязи выходного и входного сигналов пропорционального звена является алгебраическим, т.е. оно может служить операторной формой записи уравнения звена:

$$x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}.$$

Передаточная функция пропорционального звена имеет вид

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{x_{\text{вых}}}{x_{\text{вх}}} = k.$$

Аналитическое выражение вектора АФХ этого звена

$$W(i\omega) = k = k + i \cdot 0.$$

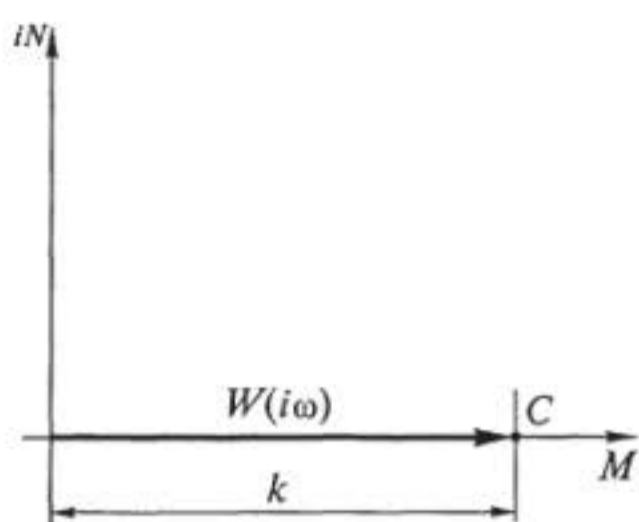


Рис. 9.14. АФХ пропорционального звена

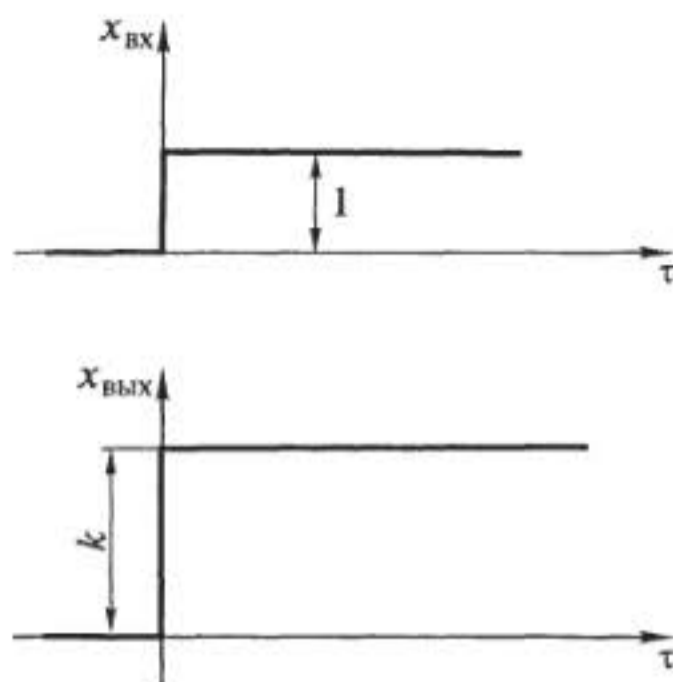


Рис. 9.15. Входной сигнал и типовая кривая разгона пропорционального звена

Поскольку АФХ пропорционального звена не зависит от изменения частоты  $\omega$ , годограф ее вектора (рис. 9.14) превращается в точку  $C$ , находящуюся на действительной положительной полуоси комплексной плоскости на расстоянии  $k$  от начала координат.

Пропорциональное звено мгновенно (без инерции) реагирует на возмущающее воздействие. По типовой кривой разгона, показанной на рис. 9.15, видно, что выходной сигнал этого звена пропорционален входному сигналу, и ордината выходного сигнала равна коэффициенту пропорциональности  $k$ .

Рис. 9.16. Пример реализации пропорционального звена



Примером реализации пропорционального звена может служить жесткий стержень, лежащий на опоре (рис. 9.16), при перемещении одного конца которого ( $x_{вх}$ ) мгновенно перемещается другой его конец ( $x_{вых}$ ).

## 9.6. Дифференцирующее звено

Различают идеальное дифференцирующее и реальное дифференцирующее ТДЗ.

Сначала рассмотрим *идеальное дифференцирующее звено*, типовое дифференциальное уравнение которого имеет вид

$$x_{\text{вых}} = k \frac{dx_{\text{вх}}}{d\tau}.$$

Операторная форма записи этого дифференциального уравнения

$$x_{\text{вых}}(p) = kp x_{\text{вх}}(p).$$

Передаточная функция идеального дифференцирующего звена

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = kp.$$

Аналитическое выражение вектора АФХ такого звена

$$W(i\omega) = k(i\omega) = \underbrace{0}_{m(\omega)} + \underbrace{ik\omega}_{in(\omega)}.$$

Изменяя частоту  $\omega$  от 0 до  $\infty$  в последнем выражении, легко построить график вектора АФХ идеального дифференцирующего звена (рис. 9.17). Конец вектора АФХ идеального дифференцирующего звена перемещается из начала координат по положительной мнимой полуоси комплексной плоскости, уходя при  $\omega = \infty$  в бесконечность.

Типовая кривая разгона идеального дифференцирующего звена своеобразна (рис. 9.18). Выходной сигнал этого звена пропорционален первой производной входного сигнала, т. е. тангенсу угла наклона вектора АФХ. В момент подачи входного воздействия этот угол равен  $+90^\circ$ , а  $\text{tg}(+90^\circ) = +\infty$ , но далее входное воздействие устанавливается равным единице, при этом угол наклона становится равным  $-90^\circ$ , а  $\text{tg}(-90^\circ) = -\infty$ .

Следовательно, выходной сигнал идеального дифференцирующего звена в момент подачи входного воздействия принимает

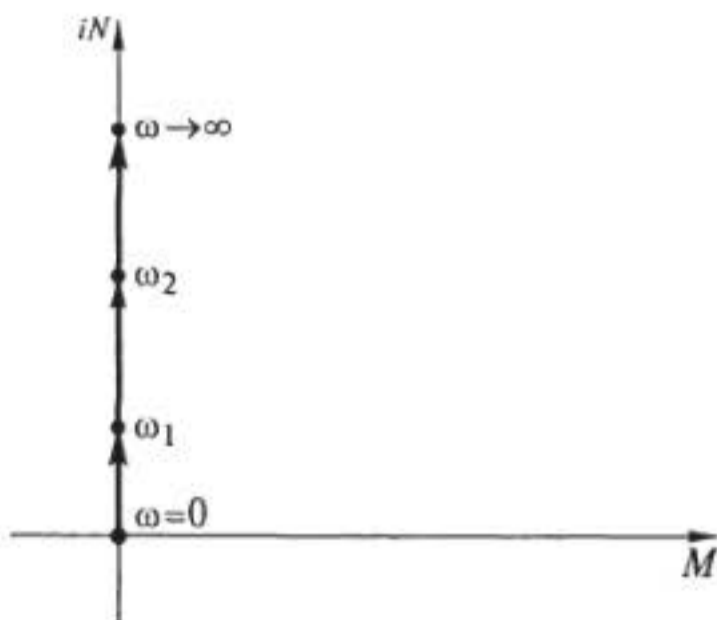


Рис. 9.17. АФХ идеального дифференцирующего звена

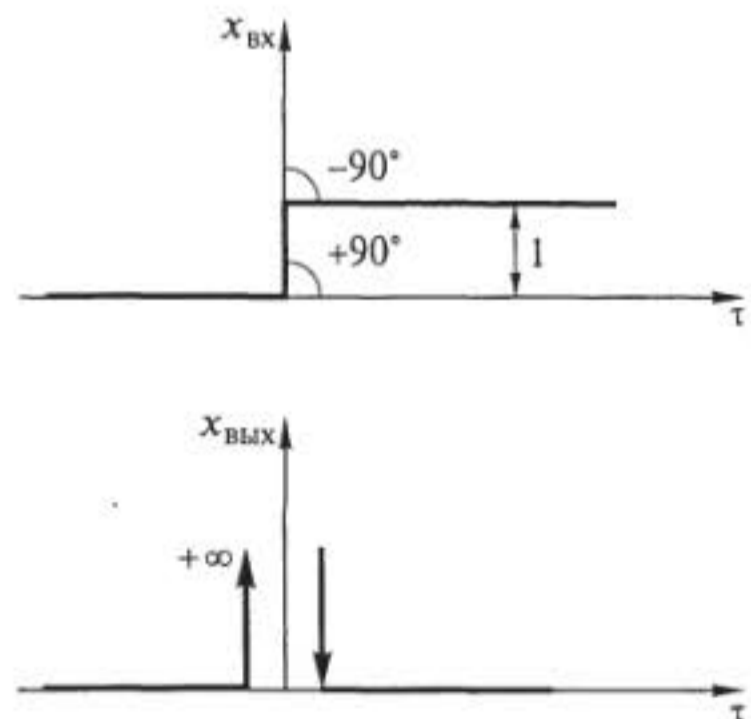
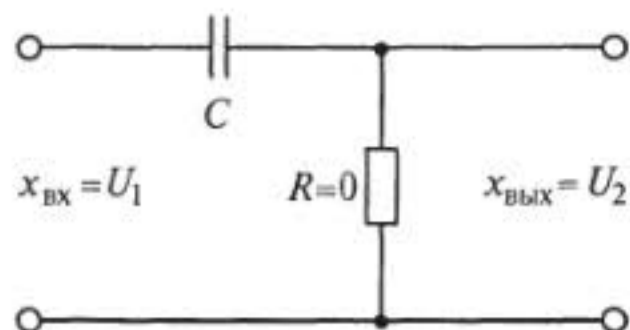


Рис. 9.18. Входной сигнал и типовая кривая разгона идеального дифференцирующего звена



Рис. 9.19. Пример реализации идеального дифференцирующего звена



значение  $+\infty$ . Тут же из  $+\infty$  вычитается  $-\infty$  и выходной сигнал возвращается в исходное нулевое состояние (см. рис. 9.18).

Примером реализации идеального дифференцирующего звена может быть электрическая цепь, состоящая из конденсатора с емкостью  $C$  и резистора  $R$ , обладающего сверхпроводимостью ( $R = 0$ ). Схема такой  $RC$ -цепи изображена на рис. 9.19.

Теперь рассмотрим реальное дифференциальное звено. Его типовое дифференциальное уравнение имеет вид

$$T_0 \frac{dx_{\text{вых}}}{d\tau} + x_{\text{вых}} = k \frac{dx_{\text{вх}}}{d\tau}.$$

Операторная форма записи этого уравнения:

$$T_0 p x_{\text{вых}}(p) + x_{\text{вых}}(p) = k p x_{\text{вх}}(p).$$

В этом алгебраическом уравнении  $x_{\text{вых}}(p)$  можно вынести за скобки:

$$(T_0 p + 1)x_{\text{вых}}(p) = k p x_{\text{вх}}(p),$$

а затем получить аналитическое выражение передаточной функции реального дифференцирующего звена:

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{k p}{T_0 p + 1}.$$

Заменив  $p$  на  $i\omega$  в передаточной функции, получим аналитическое выражение вектора АФХ данного звена:

$$\begin{aligned} W(i\omega) &= \frac{k(i\omega)}{T_0(i\omega) + 1} = \frac{k(i\omega)}{T_0(i\omega) + 1} \frac{T_0(i\omega) - 1}{T_0(i\omega) - 1} = \frac{k(i\omega)[T_0(i\omega) - 1]}{T_0^2(-1)\omega^2 - 1} = \\ &= \frac{(-1)kT_0\omega^2}{(-1)(T_0^2\omega^2 + 1)} + \frac{(-1)k(i\omega)}{(-1)(T_0^2\omega^2 + 1)} = \underbrace{\frac{kT_0\omega^2}{T_0^2\omega^2 + 1}}_{m(\omega)} + i \underbrace{\frac{k\omega}{T_0^2\omega^2 + 1}}_{in(\omega)}. \end{aligned}$$

После проведенных алгебраических преобразований, изменяя частоту  $\omega$  от 0 до  $\infty$  в действительной  $m(\omega)$  и мнимой  $in(\omega)$  частях вектора АФХ, легко построить годограф реального дифференцирующего звена (рис. 9.20).

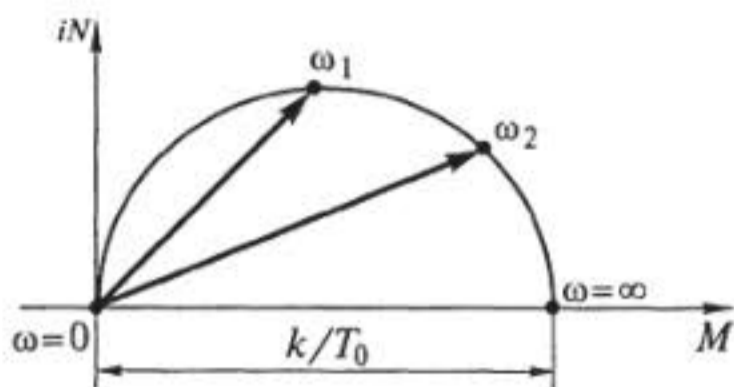


Рис. 9.20. АФХ реального дифференцирующего звена

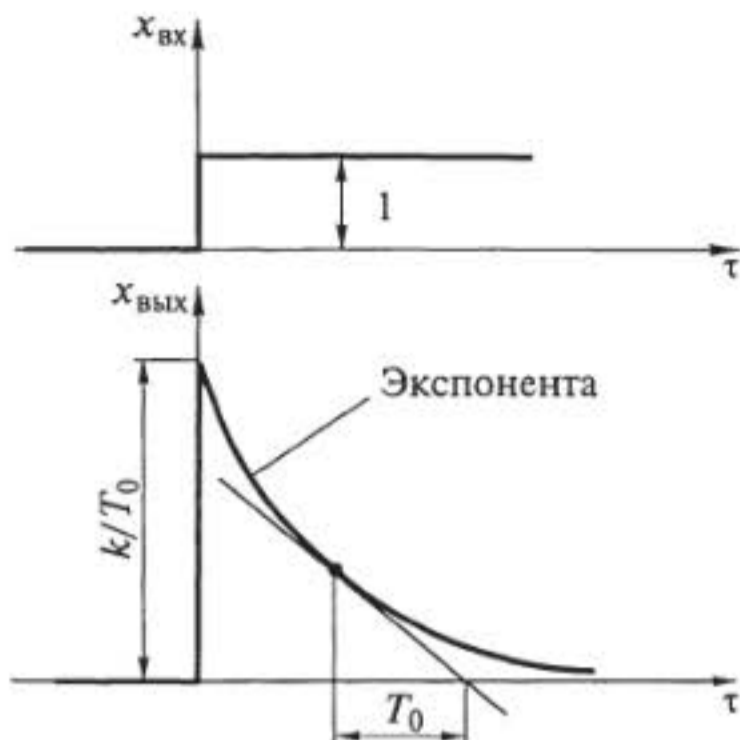


Рис. 9.21. Входной сигнал и типовая кривая разгона реального дифференцирующего звена

При  $\omega = \infty$  единицу в знаменателе  $m(\omega)$  можно отбросить. Тогда, сократив дробь

$$\frac{kT_0\omega^2}{T_0^2\omega^2},$$

получим  $m(\omega) = k/T_0$ .

Следовательно, графиком вектора АФХ этого звена является полуокружность в первом квадранте комплексной плоскости, диаметр которой равен  $k/T_0$ .

Типовая кривая разгона реального дифференцирующего звена, изображенная на рис. 9.21, показывает, что после подачи на его вход возмущения в виде единичного скачка выходной сигнал мгновенно увеличивается на величину  $k/T_0$ , а затем по экспоненте постепенно приближается к нулю. Таким образом по кривой разгона легко определить коэффициенты  $T_0$  и  $k$  передаточной функции звена, т. е. сначала с помощью касательной (см. описание апериодического ТДЗ) находят значение  $T_0$ , а затем, умножив ординату величины  $k/T_0$  на  $T_0$ , получают значение  $k$ .

Примером реализации реального дифференцирующего звена будет  $RC$ -цепь, показанная на рис. 9.19, в которой сопротивление  $R \neq 0$ , что реально имеет место.

## 9.7. Запаздывающее звено

Рассмотрение этого звена начнем с его реализации, примером которой может служить ленточный транспортер длиной  $L$ , пере-

мещающийся со скоростью  $V$  (рис. 9.22). Если расход сыпучего материала в начале такого транспортера принять  $Q_1 = x_{\text{вх}}$ , а расход ссыпающегося в конце с транспортера материала  $Q_2 = x_{\text{вых}}$ , то время движения материала  $\Delta t$  будет равно  $L/V = \tau_{\text{зап}}$  (где  $\tau_{\text{зап}}$  — время запаздывания).

Если на вход ленточного транспортера подать возмущение в виде единичного скачка (т.е. открыть подачу материала), то этот же единичный скачок появится на его выходе через отрезок времени, равный времени запаздывания. Следовательно, типовая кривая разгона будет иметь вид, показанный на рис. 9.23.

Теперь представим, что на вход транспортера подан единичный импульс. Через определенное время запаздывания мы его же получим на выходе транспортера. То же будет и при входном потоке, изменяющемся по синусоиде или какому-либо другому закону во времени. Следовательно, выходной сигнал запаздывающего звена повторяет входной сигнал, но с некоторым временем запаздывания. Исходя из этого, общее уравнение взаимосвязи входного и выходного сигналов запаздывающего звена в динамическом режиме работы можно записать в виде

$$x_{\text{вх}}(\tau) = x_{\text{вых}}(\tau + \tau_{\text{зап}}),$$

или

$$x_{\text{вых}}(\tau + \tau_{\text{зап}}) = x_{\text{вх}}(\tau).$$

В литературе, как правило, уравнение взаимосвязи входного и выходного сигналов запаздывающего звена имеет вид

$$x_{\text{вых}}(\tau) = x_{\text{вх}}(\tau - \tau_{\text{зап}}).$$

Однако трудно себе представить отрицательное время запаздывания. Время — особый фактор реальности, и движется оно от

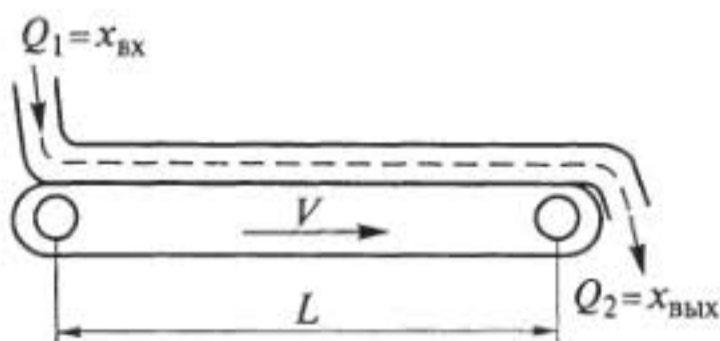


Рис. 9.22. Пример реализации запаздывающего звена

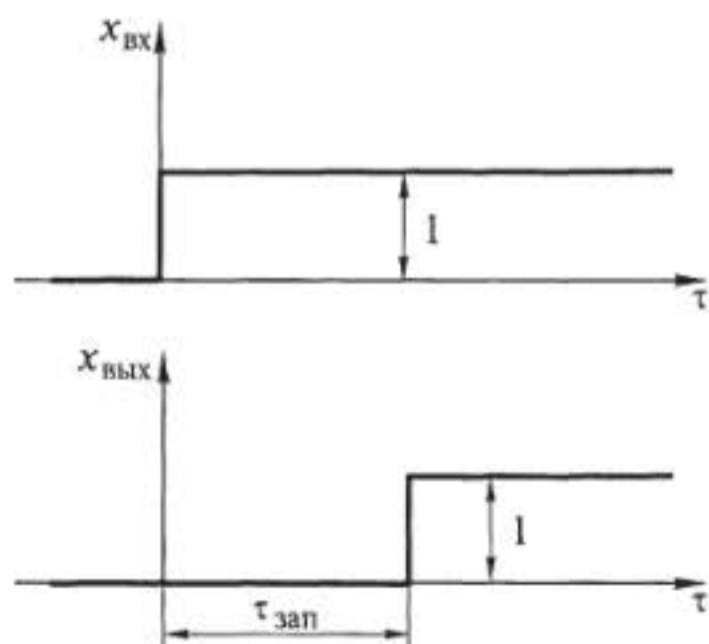


Рис. 9.23. Входной сигнал и типовая кривая разгона запаздывающего звена

нуля только вперед. Также в природе не бывает отрицательных давления и концентрации газа. Так формальная математика вступает в противоречие с законами реального мира.

Итак, типовое уравнение взаимосвязи входного и выходного сигналов запаздывающего звена имеет вид

$$x_{\text{вых}}(\tau + \tau_{\text{зап}}) = x_{\text{вх}}(\tau).$$

Для получения из этого уравнения передаточной функции запаздывающего звена в общем виде необходимо использовать интегралы Лапласа (см. характеристики апериодического звена):

$$\begin{aligned} W(p) &= \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{\int_0^{\infty} x_{\text{вых}}(\tau + \tau_{\text{зап}}) e^{-p(\tau + \tau_{\text{зап}})} d(\tau + \tau_{\text{зап}})}{\int_0^{\infty} x_{\text{вх}}(\tau) e^{-p\tau} d\tau} = \\ &= \frac{\int_0^{\infty} x_{\text{вх}}(\tau) e^{-p\tau} e^{-p\tau_{\text{зап}}} d\tau}{\int_0^{\infty} x_{\text{вх}}(\tau) e^{-p\tau} d\tau} = \frac{e^{-p\tau_{\text{зап}}} \int_0^{\infty} x_{\text{вх}}(\tau) e^{-p\tau} d\tau}{\int_0^{\infty} x_{\text{вх}}(\tau) e^{-p\tau} d\tau} = e^{-p\tau_{\text{зап}}}. \end{aligned}$$

Из аналитического выражения передаточной функции запаздывающего звена путем замены  $p$  на  $i\omega$  получим аналитическое выражение для вектора АФХ этого звена:

$$W(i\omega) = e^{-i\omega\tau_{\text{зап}}}.$$

Чтобы разделить это выражение на действительную и мнимую части, воспользуемся формулой Эйлера:

$$e^{-i\alpha} = \cos \alpha - i \sin \alpha.$$

Тогда

$$W(i\omega) = e^{-i\omega\tau_{\text{зап}}} = \underbrace{\cos(\omega\tau_{\text{зап}})}_{m(\omega)} - i \underbrace{\sin(\omega\tau_{\text{зап}})}_{in(\omega)}.$$

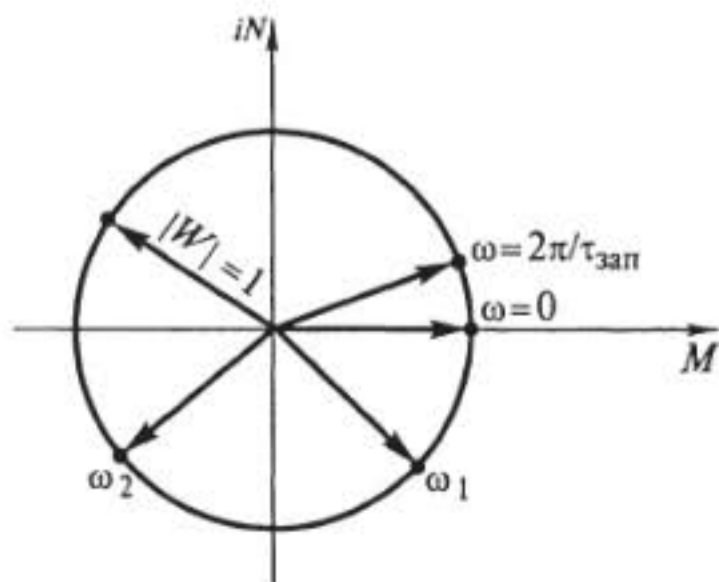


Рис. 9.24. АФХ запаздывающего звена

Изменяя частоту  $\omega$  от 0 до  $\infty$  в действительной и мнимой частях этого выражения, можно построить годограф вектора АФХ запаздывающего звена (рис. 9.24), который будет представлять собой бесконечное число окружностей с единичным радиусом вокруг начала координат комплексной плоскости. Первая окружность замыкается, когда  $\omega\tau_{зап} = 2\pi$  или при частоте  $\omega = 2\pi/\tau_{зап}$ .

### 9.8. Логарифмические частотные характеристики динамических звеньев

Удобной формой представления частотных характеристик являются логарифмические характеристики, включающие в себя логарифмическую амплитудную характеристику (ЛАХ) и логарифмическую фазовую характеристику (ЛФХ).

В теории автоматического управления при исследовании динамических свойств САУ (главным образом устойчивости) пользуются логарифмическими частотными характеристиками (ЛЧХ). Также эти характеристики широко применяются при определении структуры и параметров регуляторов, формирующих заданный переходный процесс в системах автоматического управления.

Логарифмируя левую и правую части уравнения АФЧХ, можно записать

$$\ln W(j\omega) = \ln A(\omega) + j\varphi(\omega).$$

Зависимости  $\ln A(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$  представляют собой соответственно логарифмические амплитудную и фазовую характеристики.

Для оценки отношения двух однородных величин принято использовать логарифмическую единицу децибел (дБ). Связь между числом  $L$  и числом  $A$  выражается формулой  $L = 20 \lg A$ . Например, если число  $A = 10$ , то  $L = 20 \lg A = 20$  дБ, так как  $\lg 10 = 1$ .



Рис. 9.25. ЛАХ безынерционного звена

ЛАХ и ЛФХ представляются в этом случае в виде графиков в прямоугольной системе координат. По оси абсцисс откладывается частота  $\omega$  в логарифмическом масштабе, а по оси ординат — значения амплитуд ЛАХ в децибелах и углы ЛФХ в градусах (или радианах) в равномерном масштабе.

**Безынерционное звено.** Логарифмируя АФЧХ этого звена, получим  $L(\omega) = 20 \lg k$ . Так как  $k$  от частоты не зависит, ЛАХ безынерционного звена будет представлять собой прямую, параллельную оси абсцисс (рис. 9.25).

**Апериодическое звено.** Логарифмируя АФЧХ этого звена, получим

$$L(\omega) = L_1(\omega) + L_2(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \sqrt{\omega^2 T^2 + 1};$$

$$\varphi(\omega) = -\arctg \omega T.$$

Рассмотрим вторую составляющую ЛАХ:

$$L_2 = -20 \lg \sqrt{\omega^2 T^2 + 1}.$$

Из этого выражения, полагая, что  $\omega^2 T^2 \ll 1$ , получим  $L_2(\omega) = 0$ , так как  $\lg 1 = 0$ . Если  $\omega^2 T^2 \gg 1$ , пренебрегая единицей, найдем  $L_2(\omega) = -20 \lg \omega T$ . При  $\omega T = 1$  подкоренное выражение будет равно двум, а  $L_2(\omega) = 3$  дБ. ЛАХ в этом случае можно представить в виде двух прямых (асимптот), сопряженных в точке  $\omega_s = 1/T$ . При этом частота  $\omega_s$  называется *сопрягающей*; одна из асимптот  $L_2(\omega) = 0$  совпадает с осью абсцисс, а вторая  $L_2(\omega) = -20 \lg T$  наклонена по отношению к ней.

Угол наклона второй прямой найдем на основании следующих соображений. При частоте  $\omega = \omega_1$  ордината прямой равна  $-20 \lg \omega_1 T$ , а при частоте, например,  $\omega = 2\omega_1$  она составит  $-20 \lg 2\omega_1 T$ . Найдем разность этих ординат:

$$-(20 \lg 2\omega_1 T - 20 \lg \omega_1 T) = -20 \lg \frac{2\omega_1 T}{\omega_1 T} = -20 \lg 2 = -6 \text{ дБ}.$$

Таким образом, при двухкратном изменении частоты прямая имеет наклон  $-6$  дБ на октаву. Под *октавой* понимается интервал на оси абсцисс, соответствующий двухкратному изменению частоты. Разность ординат при десятикратном изменении частоты составит:

$$-(20 \lg 10\omega_1 T - 20 \lg \omega_1 T) = -20 \lg \frac{10\omega_1 T}{\omega_1 T} = -20 \lg 10 = -20 \text{ дБ}.$$

Наклон прямой в этом случае  $-20$  дБ на декаду ( $-20$  дБ/дек.). Под *декадой* понимается интервал на оси абсцисс, соответствующий десятикратному изменению частоты. Знак «минус» показывает, что при возрастании частоты ординаты ЛАХ убывают (отрицательный наклон).

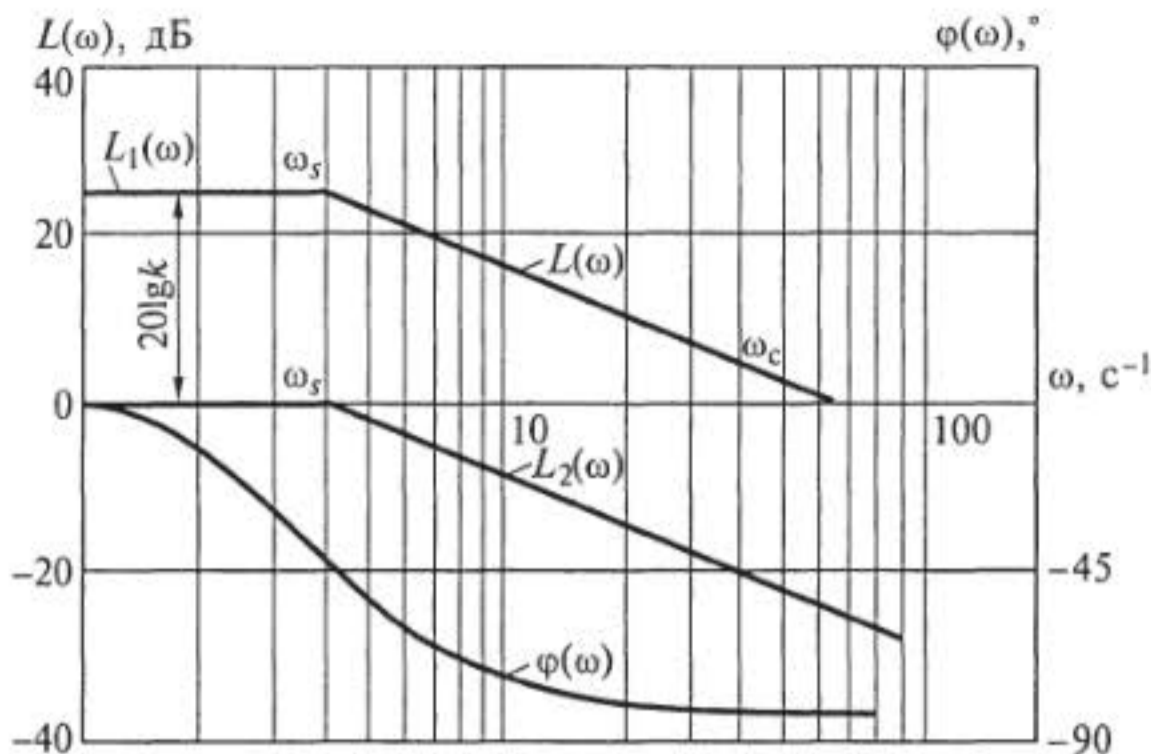


Рис. 9.26. ЛАХ и ЛФХ апериодического звена

На рис. 9.26 показано сопряжение двух асимптот. Первая представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс и отстоящую от нее на расстояние  $20 \lg k$ . Вторая наклонена по отношению к ней на  $-20$  дБ/дек. Суммируя  $L_1$  и  $L_2$ , получим результирующую ЛАХ апериодического звена  $L(\omega)$ . В окрестности частоты  $\omega_c$  сопряжение асимптот может быть произведено плавной кривой, проходящей через точку, лежащую ниже точки их пересечения на 3 дБ. Частота  $\omega_c$ , при которой ЛАХ пересекает ось абсцисс, называется *частотой среза*.

Логарифмическая фазовая характеристика  $\varphi(\omega) = -\text{arctg } \omega T$  может быть построена по точкам. Ее характерные точки:  $\varphi(0) = 0$ ;  $\varphi(\omega_s) = -45^\circ$ ;  $\varphi(\infty) = -90^\circ$ .

**Колебательное звено.** Для построения ЛАХ колебательного звена целесообразно его уравнение представить в виде

$$K(j\omega) = \frac{k\omega_0^2 \exp\left(\frac{-j \text{arctg } 2\xi\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_0\omega)^2}},$$

где  $\omega_0^2 = \frac{1}{T_1 T_2}$ ;  $\xi^2 = \frac{T_1}{2T_2}$ .

Прологарифмировав это выражение, получим уравнения логарифмических амплитудной и фазовой характеристик:

$$L(\omega) = 20 \lg k + 20 \lg \omega_0^2 - 20 \lg \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_0\omega)^2};$$

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{2 \xi \omega_0 \omega}{\omega_0^2 - \omega^2}.$$

Семейство кривых ЛАХ и АФХ для одного и того же значения  $\omega_0$  и различных значений  $\xi$ , построенное по этим уравнениям, приведено на рис. 9.27. Эти кривые построены без учета первого и второго слагаемых уравнения для  $L\omega$ , так как они являются постоянными величинами. В отличие от предыдущих графиков для придания универсальности кривым по оси абсцисс откладываются значения  $\omega/\omega_0$ .

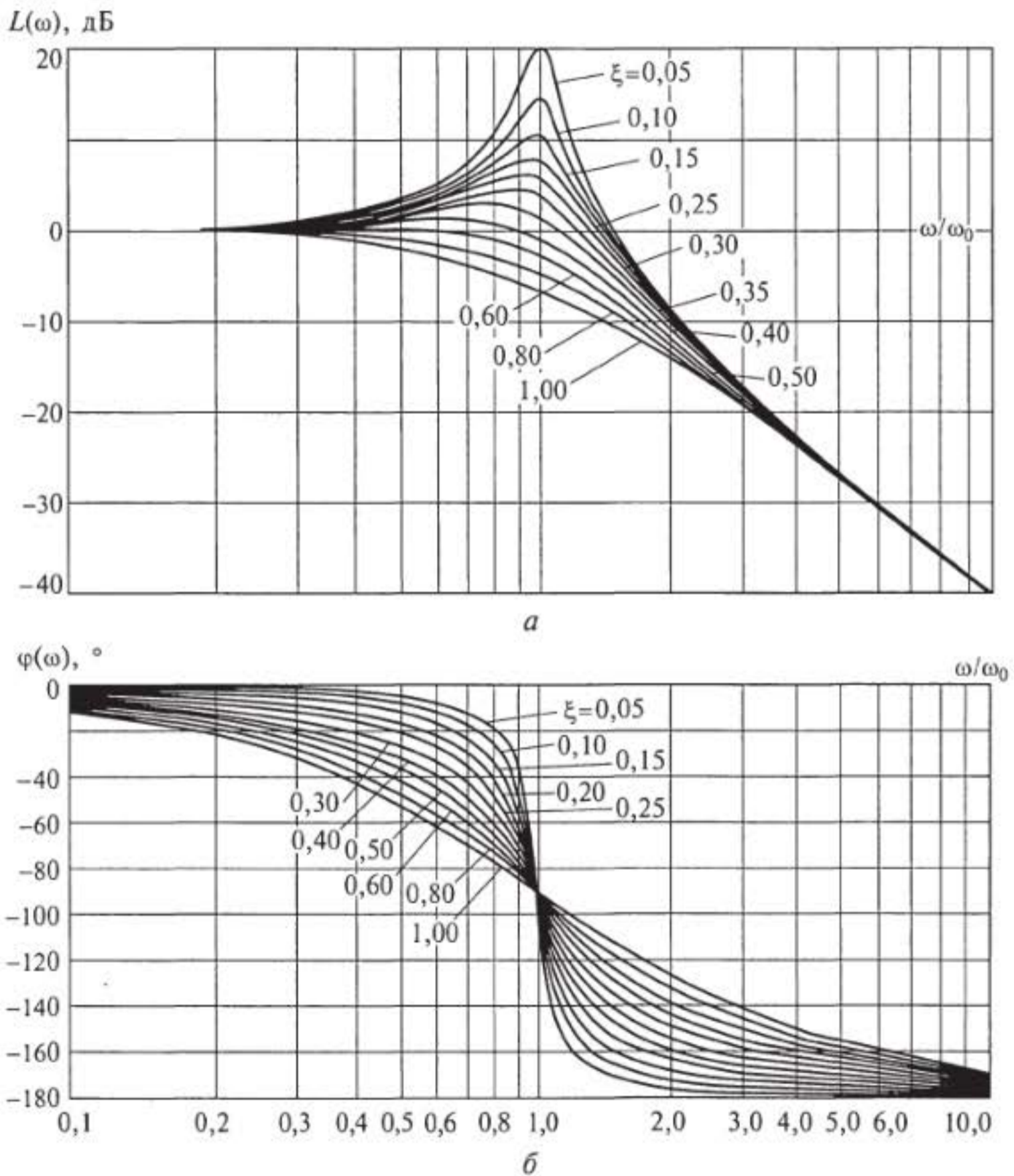


Рис. 9.27. ЛАХ (а) и ЛФХ (б) колебательного звена



При значениях  $\xi$  от 0,35 до 0,75 с достаточной точностью вместо кривых АФХ можно использовать две прямые асимптоты, сопрягающиеся в точке  $\omega/\omega_0 = 1$ . Действительно, при  $\omega/\omega_0 \ll 1$

$$20 \lg \omega_0^2 - 20 \lg \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_0\omega)^2} \approx 0;$$

при  $\omega/\omega_0 \gg 1$

$$20 \lg \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\xi\omega_0\omega)^2} = -20 \lg \omega^2.$$

Наклон второй асимптоты, определяемый уравнением  $-20 \lg \omega^2$ , составляет 12 дБ на октаву, или  $-40$  дБ/дек. При любых других значениях  $\xi$  характеристики  $L(\omega)$  необходимо строить по точкам.

**Дифференцирующее звено.** Прологарифмировав уравнение этого звена, найдем

$$L(\omega) = 20 \lg k + 20 \lg \omega T - 20 \lg \sqrt{\omega^2 T^2 + 1};$$

$$\varphi(\omega) = \arctg 1/(\omega T).$$

ЛАХ  $L(\omega)$  строится по трем составляющим (рис. 9.28). Первая составляющая  $L_1(\omega) = 20 \lg k$  — это прямая, параллельная оси абсцисс; вторая составляющая  $L_2(\omega) = 20 \lg \omega T$  — это прямая, имеющая положительный наклон 20 дБ/дек и проходящая через точку на оси абсцисс, соответствующую сопрягающей частоте  $\omega_s = 1/T$ . Третья составляющая  $L_3(\omega) = -20 \lg \sqrt{\omega^2 T^2 + 1}$  имеет две асимптоты, сопрягающиеся в точке  $\omega_s = 1/T$ , одна из которых совпадает с осью абсцисс, а вторая имеет отрицательный наклон  $-20$  дБ/дек.

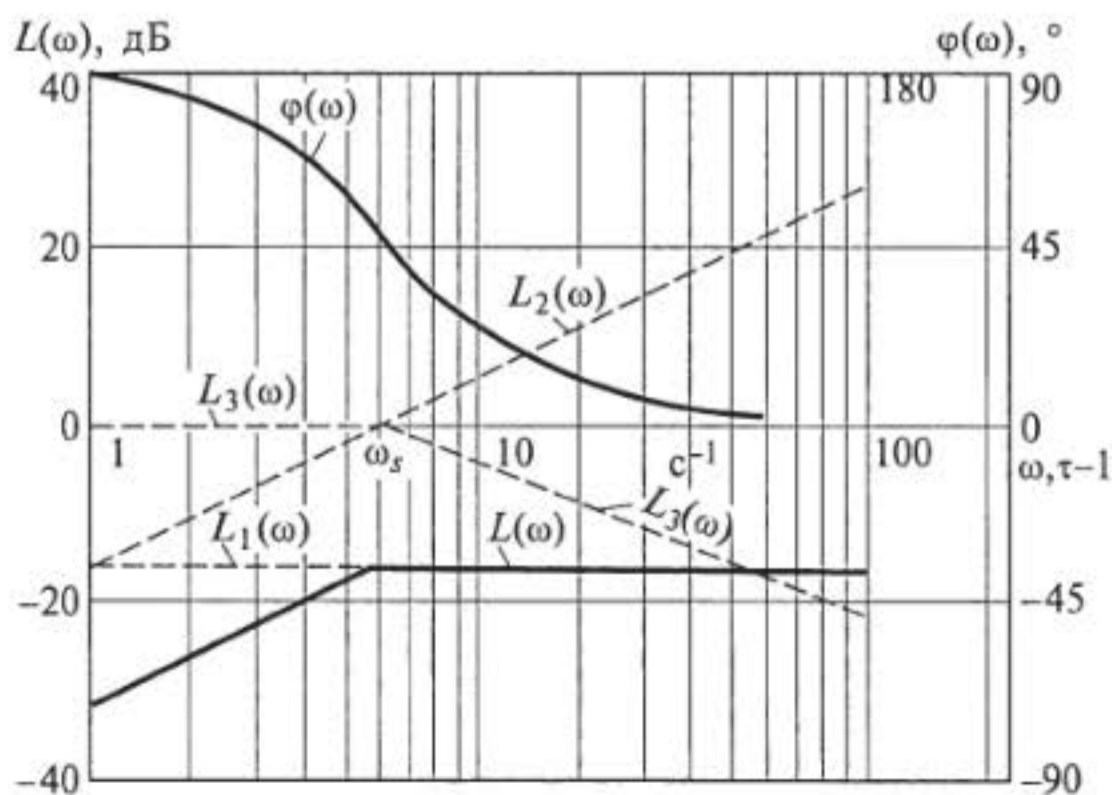


Рис. 9.28. ЛАХ и ЛФХ дифференцирующего звена

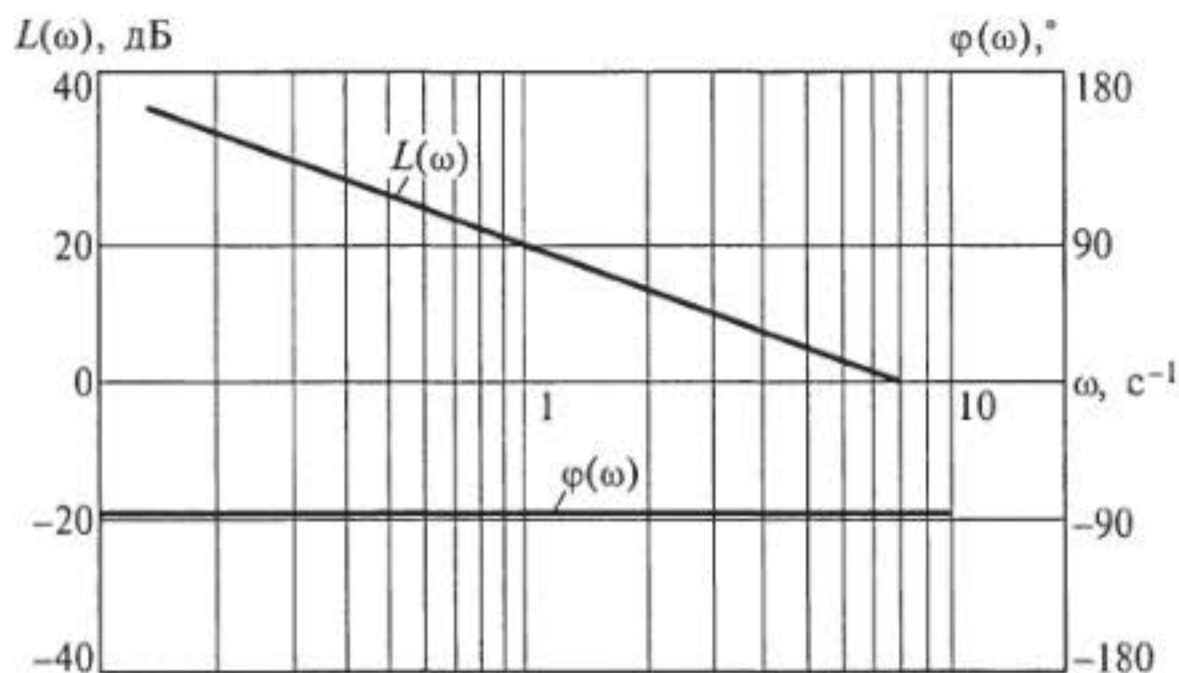


Рис. 9.29. ЛАХ и ЛФХ интегрирующего звена

Просуммировав эти три составляющие, получим результирующую ЛАХ дифференцирующего звена  $L(\omega)$ .

ЛФХ  $\varphi(\omega)$  строится по точкам. Ее характерные точки:  $\varphi(0) = 90^\circ$ ;  $\varphi(\omega_s) = 45^\circ$ ;  $\varphi(\infty) = 0$ .

**Интегрирующее звено.** ЛАХ этого звена строится по уравнению  $L(\omega) = 20 \lg k - 20 \lg \omega$ , а уравнение ЛФХ имеет вид  $\varphi(\omega) = -\pi/2$ .

ЛАХ (рис. 9.29) представляет собой прямую, проходящую через точку  $\omega = 1$  на расстоянии  $20 \lg k$  от оси абсцисс и имеющую наклон  $-20$  дБ/дек. ЛФХ выражается прямой, параллельной оси абсцисс и отстоящей от нее на расстояние  $-\pi/2$  ( $-90^\circ$ ).

**Запаздывающее звено.** Уравнения логарифмических амплитудной и фазовой характеристик этого звена соответственно имеют вид  $L(\omega) = 20 \lg k$ ;  $\varphi(\omega) = -\omega\tau$ .

Таким образом, ЛАХ запаздывающего звена аналогична ЛАХ безынерционного звена, а ЛФХ представляет собой кривую с неограниченным возрастанием угла  $\varphi(\omega)$  при изменении частоты  $\omega$  от 0 до  $\infty$ .

### Контрольные вопросы

1. Что представляют собой статический и динамический режимы работы объекта и какие существуют типовые возмущающие воздействия?
2. Какие реальные физические объекты можно представить апериодическим звеном? Что такое передаточная функция апериодического звена?
3. Что представляют собой АФХ и типовая кривая разгона апериодического звена?
4. Какие объекты можно представить как интегрирующее (астатическое) звено? Какова передаточная функция такого звена?
5. Что представляют собой АФХ и типовая кривая разгона интегрирующего звена?
6. Приведите примеры реализации колебательного и апериодического 2-го порядка звеньев. Какова передаточная функция колебательного звена?

7. Что представляет собой АФХ колебательного звена?
8. Что представляют собой типовые кривые разгона колебательного и апериодического 2-го порядка звеньев?
9. Приведите примеры реализации пропорционального звена. Каковы АФХ и типовая кривая разгона этого звена?
10. Приведите пример идеального дифференцирующего звена. Какова его передаточная функция?
11. Поясните АФХ и кривые разгона идеального и реального дифференцирующих звеньев?
12. Приведите пример реализации и поясните АФХ и типовую кривую разгона запаздывающего звена.
13. Что представляют собой логарифмические частотные характеристики динамических звеньев?
14. Поясните ЛАХ и ЛФХ безинерционного и апериодического звеньев?
15. Каковы ЛАХ и ЛФХ колебательного звена и какие факторы влияют на изменение этих характеристик?
16. Поясните ЛАХ и ЛФХ дифференцирующего и интегрирующего звеньев.

# Глава 10

## СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕНЬЕВ В САУ

### 10.1. Типовые соединения звеньев

В реальных промышленных САУ соединение элементов между собой может быть довольно сложным. Однако любую сложную схему можно разбить на отдельные блоки с одним из трех типовых соединений: последовательным, параллельно-согласованным или параллельно-встречным.

#### Последовательное соединение звеньев

Схема последовательного соединения звеньев представлена на рис. 10.1. Так как передаточная функция есть отношение преобразованных по Лапласу выходного сигнала звена к входному, т. е.

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)},$$

то можно записать

$$x_{\text{вых}}(p) = W(p)x_{\text{вх}}(p).$$

Следовательно, выходной сигнал каждого из звеньев в последовательной цепи можно выразить через его передаточную функцию:

$$x_1(p) = W_1(p)x_{\text{вх}}(p);$$

$$x_2(p) = W_2(p)x_1(p);$$

$$x_{\text{вых}}(p) = x_3(p) = W_3(p)x_2(p).$$

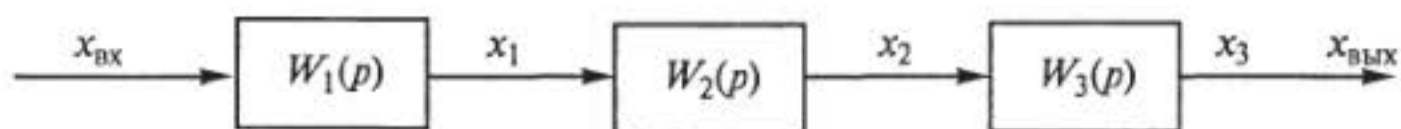


Рис. 10.1. Схема цепи с последовательным соединением звеньев

Последовательно подставляя в последнее уравнение выражения входных сигналов, получим

$$x_{3\text{вых}}(p) = W_3(p)W_2(p)W_1(p)x_{\text{вх}}(p),$$

т.е. передаточная функция цепи последовательно соединенных звеньев будет иметь вид

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = W_1(p)W_2(p)W_3(p).$$

Чтобы получить выходной сигнал цепи, нужно произведение передаточных функций ее звеньев умножить на входной сигнал. Если вместо передаточной функции использовать дифференциальные уравнения, придется каждое из них решать отдельно, получая при этом, как правило, не общее, а только частное для заданных условий решение.

### Параллельно-согласованное соединение звеньев

Схема параллельно-согласованного соединения звеньев приведена на рис. 10.2.

Для этого типового соединения принимается, что входной сигнал цепи обладает достаточной мощностью, т.е. не уменьшается при разделении его на параллельные ветви, а выходной сигнал равен сумме выходных сигналов всех звеньев:

$$x_{\text{вх}} = x_{1\text{вх}} = x_{2\text{вх}} = x_{3\text{вх}};$$

$$x_{\text{вых}} = x_{1\text{вых}} + x_{2\text{вых}} + x_{3\text{вых}}.$$

Выразим выходной сигнал каждого звена этой цепи через его передаточную функцию:

$$x_{1\text{вых}}(p) = W_1(p)x_{1\text{вх}}(p);$$

$$x_{2\text{вых}}(p) = W_2(p)x_{2\text{вх}}(p);$$

$$x_{3\text{вых}}(p) = W_3(p)x_{3\text{вх}}(p).$$

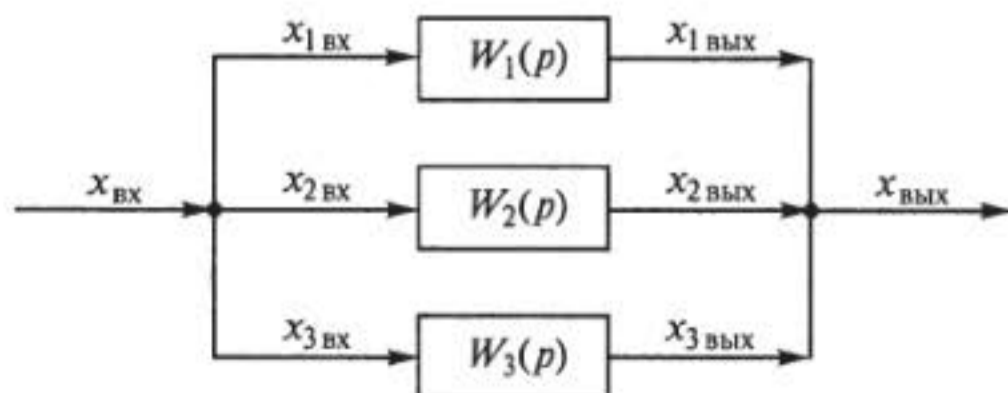


Рис. 10.2. Схема цепи с параллельно-согласованным соединением звеньев

С учетом принятых условий для этой цепи просуммируем последние три уравнения:

$$x_{1\text{вых}}(p) + x_{2\text{вых}}(p) + x_{3\text{вых}}(p) = x_{\text{вых}}(p) = \\ = [W_1(p) + W_2(p) + W_3(p)]x_{\text{вх}}(p).$$

Взяв отношение выходного сигнала цепи к входному, получим передаточную функцию цепи параллельно-согласованных звеньев:

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = W_1(p) + W_2(p) + W_3(p).$$

Опять мы убедились в том, что передаточная функция как форма записи математической модели звена или элемента очень удобна при проектировании промышленных САУ.

### Параллельно-встречное соединение звеньев

Схема цепи с отрицательной обратной связью приведена на рис. 10.3.

Из этой схемы очевидно, что  $x_{1\text{вых}} = x_{\text{вых}} = x_{2\text{вх}}$ .

При введении отрицательной обратной связи  $x_{1\text{вх}} = x_{\text{вх}} - x_{2\text{вых}}$ .

Тогда можно записать:

$$x_{1\text{вых}}(p) = x_{\text{вых}}(p) = W_1(p)x_{1\text{вх}}(p) = W_1(p)[x_{\text{вх}}(p) - x_{2\text{вых}}(p)] = \\ = W_1(p)[x_{\text{вх}}(p) - W_2(p)x_{2\text{вх}}(p)] = W_1(p)[x_{\text{вх}}(p) - W_2(p)x_{\text{вых}}(p)].$$

Раскрыв квадратные скобки, получим

$$x_{\text{вых}}(p) = W_1(p)x_{\text{вх}}(p) - W_1(p)W_2(p)x_{\text{вых}}(p),$$

или

$$x_{\text{вых}}(p) = [1 + W_1(p)W_2(p)] = W_1(p)x_{\text{вх}}(p).$$

Таким образом, передаточная функция цепи с параллельно-встречным соединением звеньев с отрицательной обратной связью будет иметь вид

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}.$$

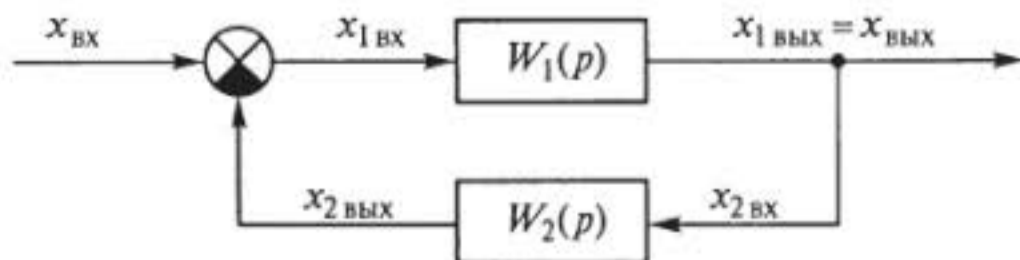


Рис. 10.3. Схема цепи с отрицательной обратной связью

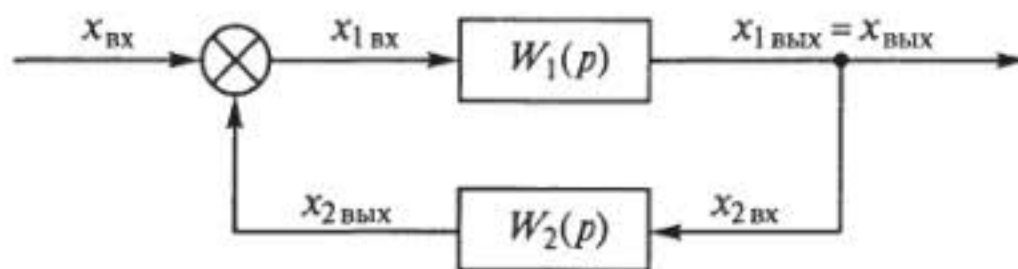


Рис. 10.4. Схема цепи с положительной обратной связью

На рис. 10.4 дана схема соединения двух звеньев с *положительной обратной связью*.

При положительной обратной связи  $x_{1\text{вх}} = x_{\text{вх}} + x_{2\text{вых}}$ .

Используя предыдущие рассуждения, получим следующую передаточную функцию цепи с параллельно-встречным соединением звеньев с положительной обратной связью:

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{W_1(p)}{1 - W_1(p)W_2(p)}$$

## 10.2. Сложные соединения звеньев

На рис. 10.5 изображена схема сложного соединения звеньев в САУ, на которой нетрудно увидеть типовые соединения. Первое и второе звенья здесь объединены в блок I с параллельно-согласованным соединением, пятое и шестое — в блок III с последовательным соединением. В блок II выделено четвертое звено, охваченное собственной положительной обратной связью. Условно можно принять, что в эту обратную связь включено пропорциональное звено с коэффициентом усиления, равным единице. Запишем передаточные функции выделенных блоков:

$$W_I(p) = W_1 + W_2(p);$$

$$W_{II}(p) = \frac{W_4(p)}{1 - W_4(p) \cdot 1};$$

$$W_{III}(p) = W_5(p)W_6(p).$$

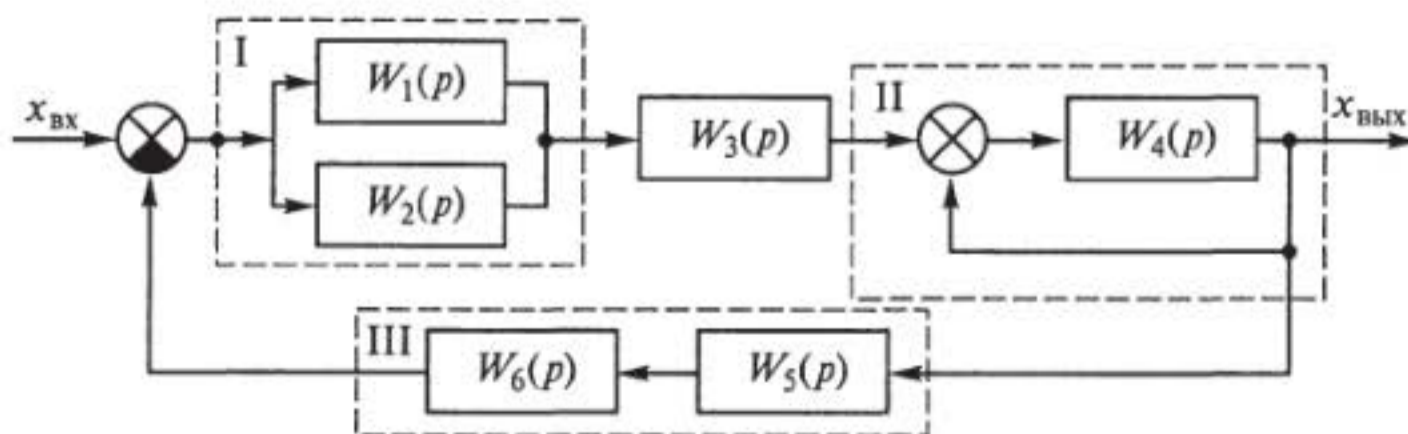


Рис. 10.5. Схема сложного соединения элементов в САУ

В свою очередь, первый блок, третье звено и второй блок соединены последовательно, а третий блок включен в цепь отрицательной обратной связи. Используя приведенные ранее формулы, запишем передаточную функцию всей САУ:

$$W_{САУ}(p) = \frac{[W_1(p) + W_2(p)]W_3(p) \frac{W_4(p)}{1 - W_4(p)}}{1 + [W_1(p) + W_2(p)]W_3(p) \frac{W_4(p)}{1 - W_4(p)} W_5(p)W_6(p)} =$$

$$= \frac{[W_1(p) + W_2(p)]W_3(p)W_4(p)}{1 - W_4(p) + [W_1(p) + W_2(p)]W_3(p)W_4(p)W_5(p)W_6(p)}$$

### 10.3. Аппроксимация сложных объектов совокупностью нескольких типовых звеньев

**Пример 1.** Предположим, что на действующем объекте получена экспериментальная кривая разгона, показанная на рис. 10.6.

По этой кривой разгона видно, что сначала на выходе объекта имеет место чистое (транспортное) запаздывание —  $\tau_{зап}^{тр}$ , а затем выходной сигнал объекта изменяется как выходной сигнал апериодического звена 2-го порядка. Известно, что определение коэффициентов  $T_1$  и  $T_2$  в передаточной функции апериодического звена 2-го порядка — довольно сложная процедура. Поэтому на

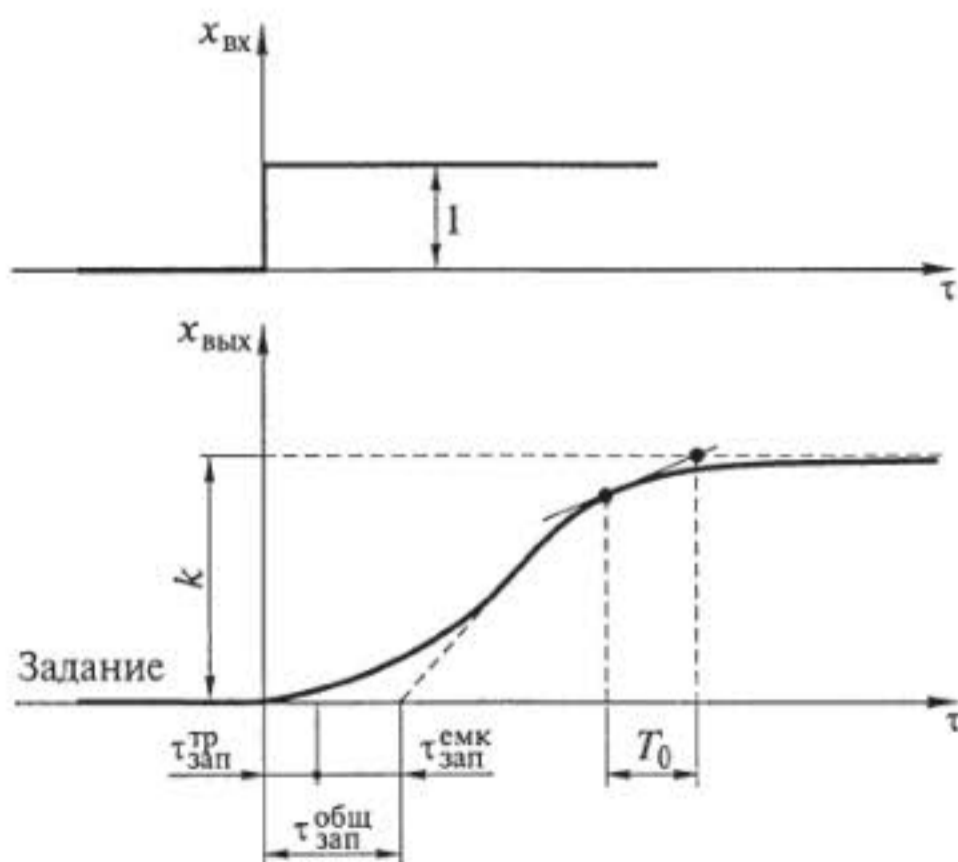


Рис. 10.6. Входной сигнал и экспериментальная кривая разгона статического объекта с запаздыванием





Рис. 10.7. Схема цепи звеньев, полученной при аппроксимации сложного статического объекта с запаздыванием

практике часто выполняют следующее упрощение: к точке перегиба кривой разгона апериодического звена 2-го порядка проводят касательную и получают на оси времени отрезок  $\tau_{\text{зап}}^{\text{емк}}$ , называемый емкостным запаздыванием; дальнейшее изменение выходного сигнала объекта аппроксимируют апериодическим звеном, коэффициенты передаточной функции которого легко определить по кривой его разгона (см. описание апериодического звена).

Таким образом, сложный объект в этом случае заменяется (аппроксимируется) цепью из двух последовательно соединенных звеньев: запаздывающего с общим запаздыванием  $\tau_{\text{зап}}^{\text{общ}} = \tau_{\text{зап}}^{\text{тр}} + \tau_{\text{зап}}^{\text{емк}}$  и апериодического (рис 10.7).

Передаточная функция данного сложного объекта будет иметь вид

$$W(p) = e^{-p\tau} \frac{k}{T_0 p + 1}.$$

Все коэффициенты передаточной функции легко определить по экспериментальной кривой разгона, показанной на рис. 10.6. Объект в данном случае называется статическим объектом с запаздыванием.

**Пример 2.** Пусть на действующем объекте получена кривая разгона, показанная на рис. 10.8.

По этой кривой разгона видно, что сначала на выходе объекта имеет место транспортное запаздывание —  $\tau_{\text{зап}}^{\text{тр}}$ , а затем кривая разгона переходит в прямую линию с углом наклона  $\alpha$  к оси абсцисс — оси времени. Продолжив до пересечения с осью вре-

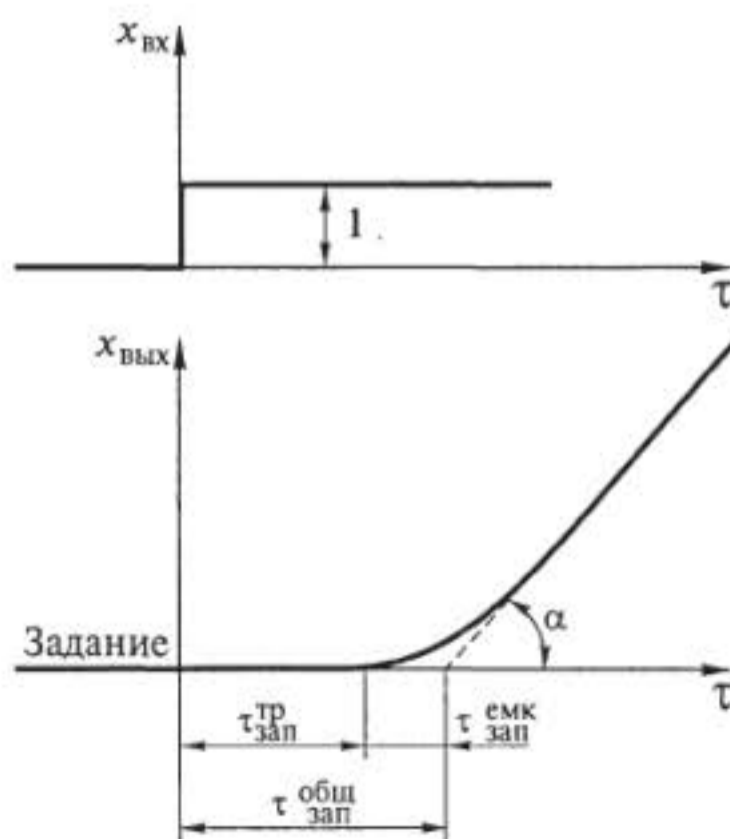


Рис. 10.8. Входной сигнал и экспериментальная кривая разгона астатического объекта с запаздыванием



Рис. 10.9. Схема цепи звеньев, полученной при аппроксимации сложного астатического объекта с запаздыванием

мени эту прямую, получим отрезок времени, который так же, как в примере 1, называют емкостным запаздыванием —  $\tau_{\text{зап}}^{\text{емк}}$ . Замена изогнутого участка экспериментальной кривой разгона на две прямые линии не приводит к большим погрешностям при аппроксимации.

Следовательно, сложный объект в этом случае можно заменить цепью из двух последовательно соединенных звеньев: запаздывающего — с общим запаздыванием  $\tau_{\text{зап}}^{\text{общ}} = \tau_{\text{зап}}^{\text{тр}} + \tau_{\text{зап}}^{\text{емк}}$  и астатического (рис. 10.9).

Передаточная функция данного сложного объекта будет иметь вид

$$W(p) = e^{-p\tau} \frac{1}{Tp}.$$

Коэффициент  $T$  полученной передаточной функции легко определить через тангенс угла  $\alpha$ :  $T = 1/\text{tg } \alpha$ .

Объект в данном случае называется астатическим объектом с запаздыванием. (Запаздывание транспортное или емкостное, а часто и то, и другое, присуще объектам большой емкости или массы.)

### Контрольные вопросы

1. Каковы выходной сигнал и передаточная функция системы с последовательным соединением звеньев?
2. Как образуется передаточная функция цепи параллельно-согласованных звеньев?
3. Как получить передаточные функции цепи с параллельно-встречным соединением звеньев при отрицательной и положительной обратных связях?
4. Как вывести уравнение передаточной функции САУ со сложным соединением элементов?
5. Как составить схему цепи звеньев САУ по имеющейся экспериментальной кривой разгона?

СИНТЕЗ САУ ИЛИ ВЫБОР ТИПА РЕГУЛЯТОРА

11.1. Структурные схемы САУ

Система автоматического управления состоит из отдельных узлов (элементов), соединенных определенным образом. На рис. 11.1 приведена типовая структурная схема промышленной САУ, в которой основным элементом является объект управления. К техническим средствам автоматизации относятся: датчик, измеряющий текущее значение выходной величины  $x_{\text{вых}}$  — регулируемого параметра объекта, регулятор с элементом сравнения (ЭС), в который поступают унифицированный выходной сигнал датчика, соответствующий текущему значению регулируемого параметра, и выходной сигнал задатчика, соответствующий заданному значению регулируемого параметра.

При несоответствии этих двух сигналов (в результате влияния возмущающих воздействий  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ ) регулятор вырабатывает управляющее воздействие — сигнал  $\mu$ , который поступает в исполнительный механизм (ИМ). Последний выполняет роль усилителя мощности управляющего сигнала регулятора. Усиленный в ИМ управляющий сигнал  $\mu^*$  поступает в регулирующий орган, который непосредственно изменяет входной поток сырья или энергии — величину  $x_{\text{вх}}$ , приводя тем самым значение регулируемого параметра —  $x_{\text{вых}}$  к заданному. Если возмущающее воздействие  $\lambda_2$  поступает на объект с входным потоком энергии (вещества), счита-

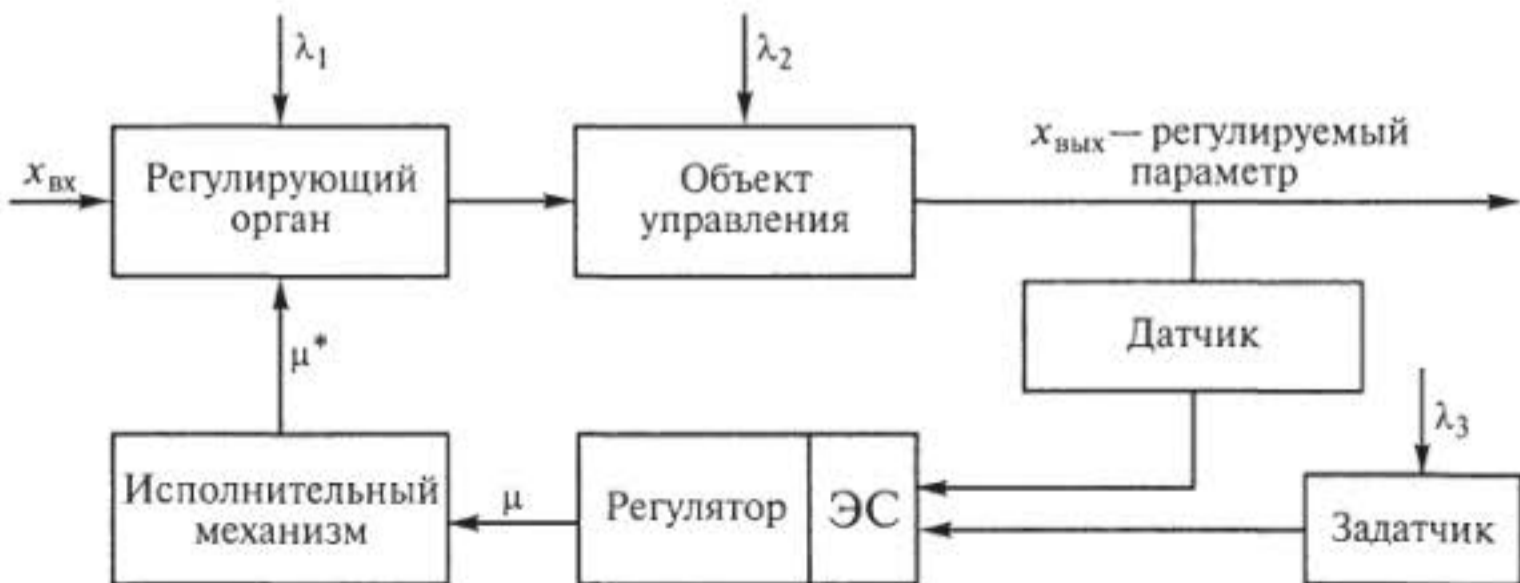


Рис. 11.1. Структурная схема САУ



Рис. 11.2. Укрупненная структурная схема САУ

ется, что это возмущение со стороны регулирующего органа. Если выходной сигнал задатчика изменяется во времени (по программе или случайным образом), то САУ воспринимает это его изменение как возмущающее воздействие  $\lambda_3$  со стороны задатчика.

При рассмотрении САУ чаще используется укрупненная структурная схема (рис. 11.2), на которой объект управления включает в себя регулирующий орган и датчик, а регулятор объединен с задатчиком и исполнительным механизмом.

На рис. 11.2 кружком с зачерненным сектором условно изображена отрицательная обратная связь. Обратная связь — важное понятие в ТАУ, рассмотрим его отдельно.

## 11.2. Понятие обратной связи

В ТАУ жестко организованную через цепочку элементов связь выходного сигнала системы с входным, при которой отклонение выходного сигнала системы (т. е. объекта) вызывает соответствующее изменение ее входного сигнала, называют обратной связью.

Различают обратную связь отрицательную и положительную.

*Отрицательная обратная связь* (ее условное изображение см. на рис. 11.2) — это такая связь выходного сигнала системы с входным, при которой отклонение выходного сигнала одного знака вызывает изменение входного сигнала противоположного знака. Например, при увеличении температуры выше заданной требуется уменьшить подачу топлива.

*Положительная обратная связь* (ее условное изображение такое же, как отрицательной, но без зачернения сектора круга) — это такая связь выходного сигнала системы с входным, при которой отклонение выходного сигнала одного знака вызывает изменение входного сигнала такого же знака.

В промышленных САУ *регулятор всегда включен в отрицательную обратную связь*. Положительная обратная связь часто используется в электронике для повышения коэффициентов усиления схем.

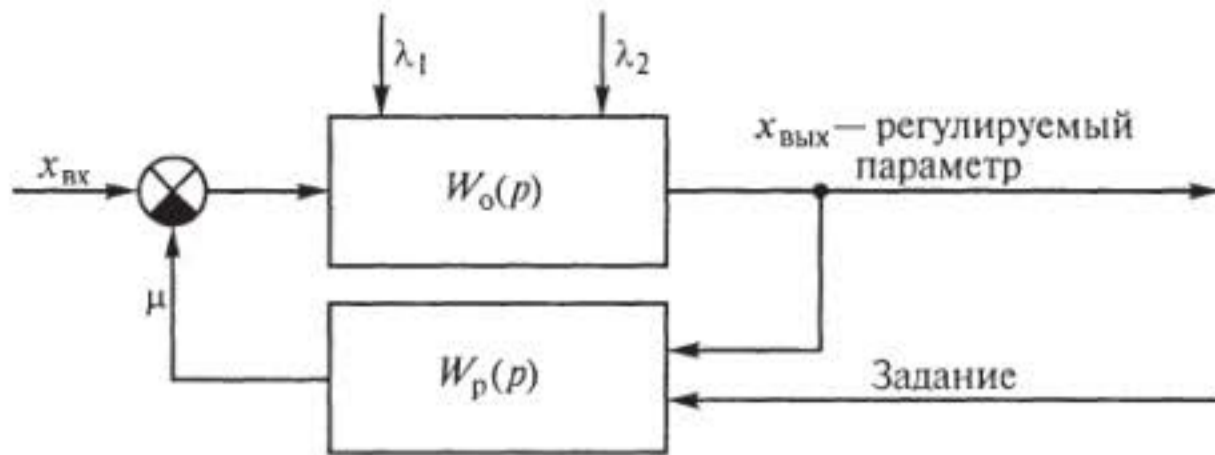


Рис. 11.3. Структурная схема САУ, состоящая из математических моделей элементов

При рассмотрении укрупненной структурной схемы САУ (см. рис. 11.2), т.е. схемы, состоящей из объекта управления и регулятора (так чаще всего изображают САУ в литературе), ее синтез сводится к выбору типа регулятора.

Принципиальное отличие математической модели САУ от укрупненной схемы состоит в том, что ко второму этапу разработки в структурной схеме вместо слов *объект управления* и *регулятор* можно записать полученные в результате исследования соответствующие передаточные функции. Тогда в структурной схеме САУ вместо реальных технических устройств и установок появляются их математические модели (рис. 11.3).

Это очень важный переход, поскольку в дальнейшем на устойчивость и качество исследуют не реальную промышленную систему, а ее математическую модель, на которой значительно проще и безопаснее задавать различные режимы работы.

Исследовать регулятор в целях получения его математической модели в виде передаточной функции не требуется, поскольку его передаточная функция полностью определяется *законом регулирования*, соответствующим данному типу регулятора. В основном производятся промышленные регуляторы, реализующие пять законов регулирования, т.е. пять типов регуляторов, имеющих различные конструктивные решения.

### 11.3. Классификация регуляторов по реализуемому закону регулирования

**Пропорциональный, или П-регулятор с одним параметром настройки.** Его передаточная функция совпадает с передаточной функцией пропорционального типового динамического звена:

$$W_{\text{П}}(p) \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = K,$$

где  $K$  — коэффициент усиления.

Коэффициенты, входящие в передаточные функции регуляторов, называются их *параметрами настройки*. В конструкциях регуляторов закладывается возможность изменения значений этих коэффициентов в широком диапазоне.

В некоторых конструкциях П-регулятора коэффициент  $K$  может изменяться в диапазоне от 0,1 до 40.

**Интегральный (астатический), или И-регулятор с одним параметром настройки.** Его передаточная функция совпадает с передаточной функцией астатического (интегрирующего) ТДЗ:

$$W_{\text{И}}(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{1}{T_{\text{и}}p},$$

где  $T_{\text{и}}$  — время интегрирования.

В некоторых конструкциях И-регулятора параметр настройки  $T_{\text{и}}$  может изменяться в диапазоне от 1 до 2000 с.

**Пропорционально-интегральный, или ПИ-регулятор с двумя параметрами настройки.** Это один из наиболее часто используемых в промышленных САУ типов регуляторов. Его передаточная функция следующая:

$$W_{\text{ПИ}}(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = K \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{и}}p} \right) = K + \frac{K}{T_{\text{и}}p}.$$

Параметрами настройки регуляторов этого типа являются коэффициент усиления  $K$  и время интегрирования  $T_{\text{и}}$ . Передаточная функция ПИ-регулятора включает в себя сумму его пропорциональной и интегральной составляющих, что соответствует параллельно-согласованному соединению элементов или звеньев, заложенному в структуре ПИ-регулятора. Следовательно, в случае отказа интегральной составляющей ПИ-регулятор будет работать как П-регулятор, что повышает надежность его работы.

**Пропорционально-дифференциальный, или ПД-регулятор с двумя параметрами настройки.** Его передаточная функция имеет вид

$$W_{\text{ПД}}(p) = \frac{x_{\text{вых}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = K (1 + T_{\text{д}}p),$$

где  $T_{\text{д}}$  — время дифференцирования.

В некоторых конструкциях ПД-регулятора параметр настройки  $T_{\text{д}}$  изменяется в диапазоне от 1 до 200 с.

**Пропорционально-интегрально-дифференциальный, или ПИД-регулятор с тремя параметрами настройки.** Его передаточная функция имеет вид

$$W_{\text{ПИД}}(p) = K \left( 1 + \frac{1}{T_{\text{и}}p} + T_{\text{д}}p \right),$$

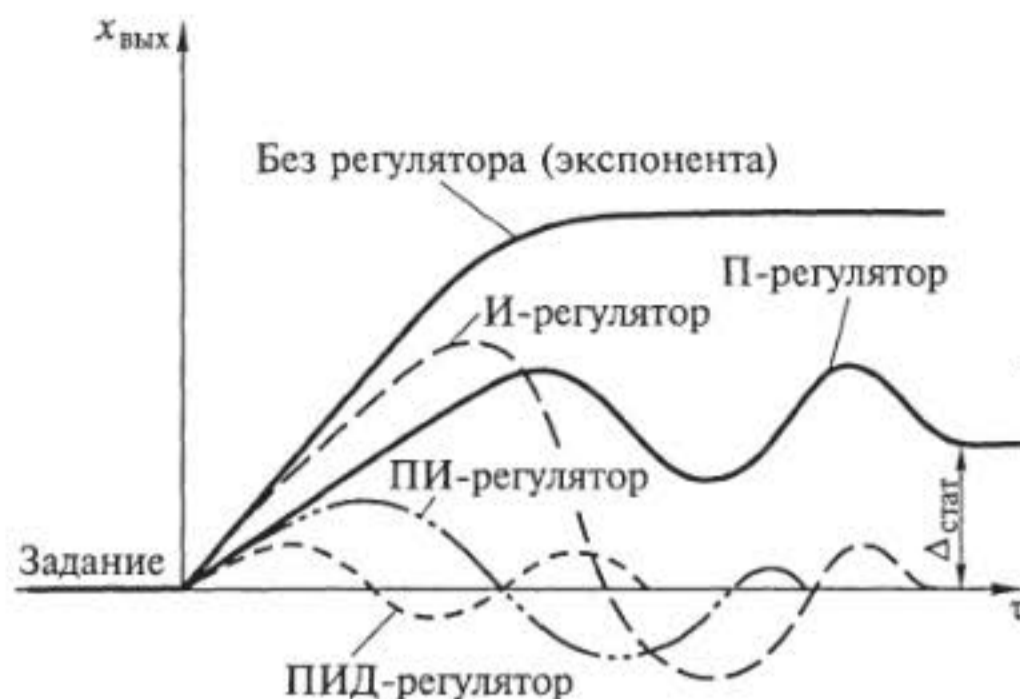


Рис. 11.4. Графики процессов регулирования параметров статического объекта в автоматических системах с регуляторами различного типа

т. е. этот регулятор имеет три параметра настройки:  $K$  — коэффициент усиления,  $T_{\text{и}}$  — время интегрирования,  $T_{\text{д}}$  — время дифференцирования.

Выбор типа регулятора или закона регулирования для конкретного объекта управления — задача не из простых. Этот выбор определяется несколькими факторами: видом передаточной функции объекта; отношением общего времени его запаздывания к постоянной времени  $T_0$  (если статический объект с запаздыванием) или к  $T$  (если астатический объект с запаздыванием), а также требованиями к качеству работы проектируемой САУ. Существует ряд диаграмм и эмпирических формул, позволяющих по передаточной функции объекта определить необходимый тип регулятора и его оптимальные параметры настройки.

Однако на практике часто используется метод проб и ошибок. Сначала предварительно выбирают тип регулятора и задают его параметры настройки, затем проверяют САУ на устойчивость и качество работы и, если полученные показатели не удовлетворяют заданным требованиям к проектируемой САУ, все начинают сначала, т. е. выбирают более сложный тип регулятора и т. д.

Что дает применение различных типов регуляторов иллюстрирует рис. 11.4, где приведены графики процессов регулирования параметров статического объекта (апериодического ТДЗ) в системах с П-, И-, ПИ- и ПИД-регуляторами.

Статический объект обладает свойством самовыравнивания, поэтому его регулируемый параметр без регулятора с течением времени по экспоненте приходит к постоянному значению. В САУ с П-регулятором имеется статическая ошибка, а в САУ с ПИД-регулятором (самым сложным и дорогим) — минимальные динамическая ошибка и время регулирования (см. рис. 11.4).

### Контрольные вопросы

1. Поясните схему и назначение основных элементов типовой промышленной САУ.
2. В чем состоит отличие укрупненной схемы САУ от типовой промышленной схемы?
3. Как изменяется работа САУ при наличии отрицательной и положительной обратных связей?
4. Для чего в САУ используются отрицательная и положительная обратные связи?
5. Как включается регулятор в САУ?
6. Какие виды регуляторов используются в промышленных САУ?
7. Что такое параметры настройки регулятора?
8. Каковы графики процессов регулирования параметров статического объекта в системах с П-, И-, ПИ- и ПИД-регуляторами?



## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И КАЧЕСТВА РАБОТЫ САУ

### 12.1. Понятие устойчивости САУ

В САУ (см. рис. 1.12), работающих по отклонению (по принципу И.И.Ползунова), регулятор изменяет управляющий сигнал только после отклонения регулируемого параметра от заданного значения. Следовательно, он должен не только компенсировать возмущающее воздействие, но и свести к нулю отклонение регулируемого параметра от заданного значения, т.е. регулятору предстоит форсированная работа. При этом возможны следующие варианты.

1. Регулятор вырабатывает управляющий сигнал недостаточной мощности. При этом скорость нарастания отклонения регулируемого параметра от заданного значения уменьшается, но само отклонение продолжает расти. График процесса регулирования — изменения во времени выходного сигнала системы после подачи на нее возмущающего воздействия в этом случае будет расходящийся, а работа САУ — неустойчивой (рис. 12.1).

2. Регулятор вырабатывает управляющий сигнал избыточной мощности, который не только компенсирует возмущающее воздействие и сводит к нулю отклонение регулируемого параметра от заданного значения, но и вызывает новое отклонение, противоположное по знаку и большей амплитуды (рис. 12.2). График

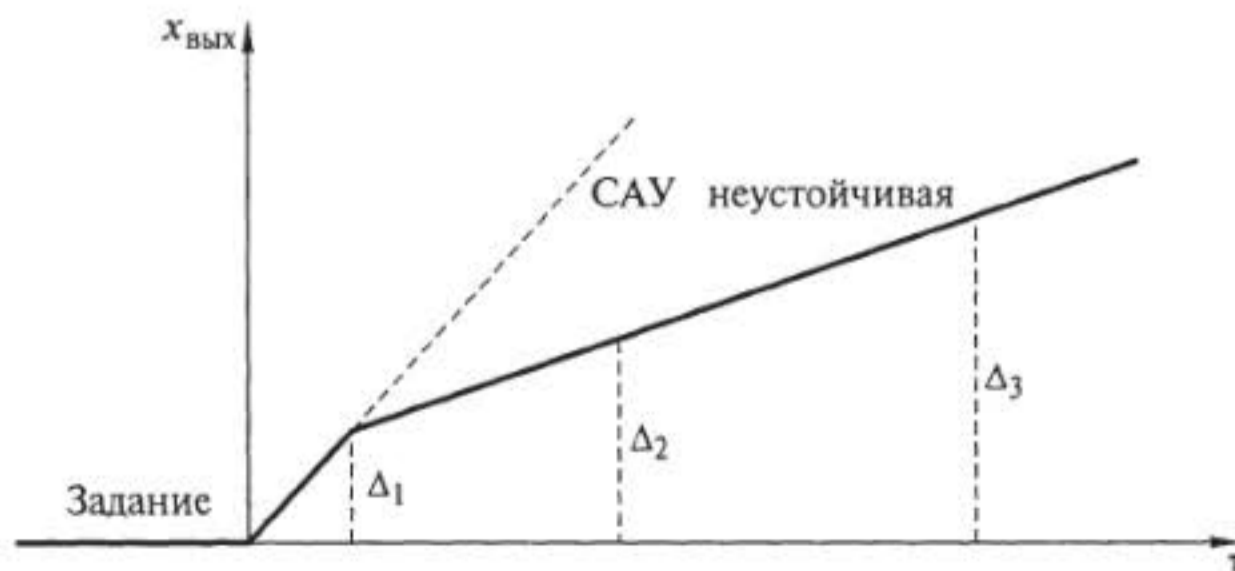


Рис. 12.1. График процесса регулирования в САУ с выходным сигналом регулятора недостаточной мощности

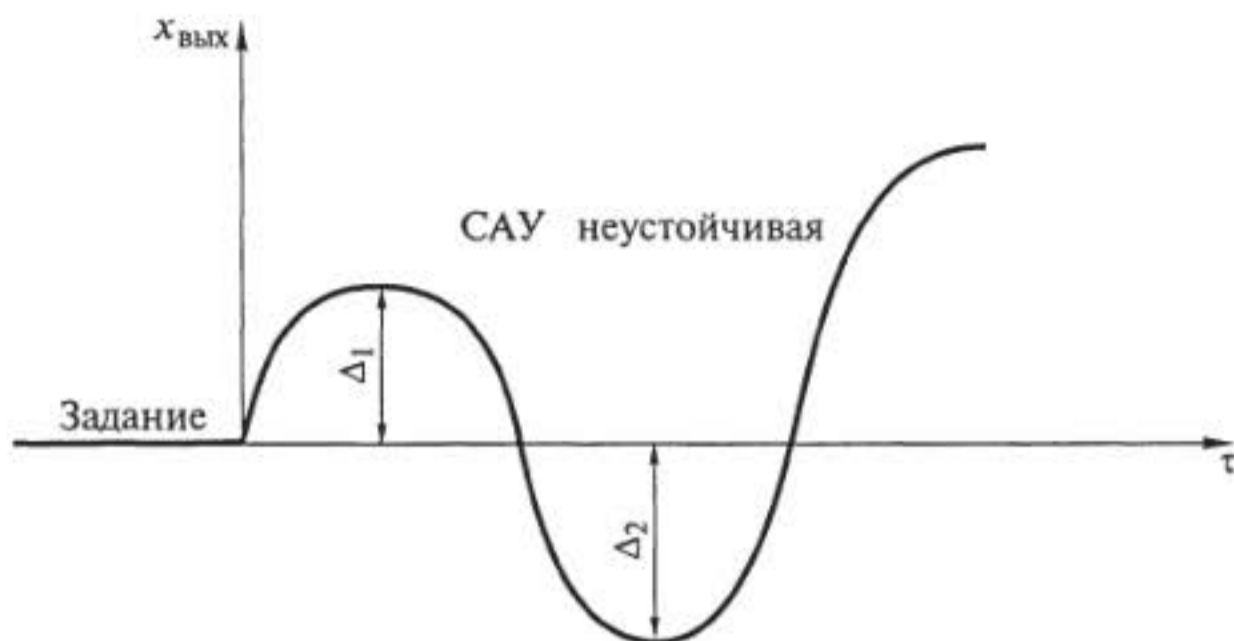


Рис. 12.2. График процесса регулирования в САУ с выходным сигналом регулятора избыточной мощности

процесса регулирования в такой САУ также будет расходящийся (расходится с заданием), а работа САУ — неустойчивой.

3. Регулятор вырабатывает управляющий сигнал необходимой мощности. При этом регулируемый параметр возвращается к заданному значению или плавно (при апериодическом процессе регулирования), или через колебания уменьшающейся амплитуды (при колебательном процессе регулирования). Графики процессов регулирования в такой САУ — сходящиеся, а работа САУ — устойчивая (рис. 12.3).

Проектируемые промышленные системы прежде всего должны быть устойчивыми, так как неустойчивые системы неработоспособны. Но кроме устойчивости проектируемые САУ должны отвечать требованиям по качеству работы, которое оценивается по соответствующим показателям.



Рис. 12.3. Графики колебательного и апериодического процессов регулирования в САУ с выходным сигналом регулятора необходимой мощности

## 12.2. Показатели качества работы САУ

Значения показателей качества работы системы легко определяются по графику процесса регулирования устойчивой САУ. По одному из показателей качества — статической ошибке можно судить о принципиальном различии статических систем, в которых  $\Delta_{\text{стат}} \neq 0$ , и астатических, в которых  $\Delta_{\text{стат}} = 0$ .

На рис. 12.4 приведен график процесса регулирования в статической САУ, а на рис. 12.5 — в астатической.

*Статическая ошибка*  $\Delta_{\text{стат}}$  — это разность значений регулируемого параметра в состояниях исходного и конечного (после окончания процесса регулирования) равновесия системы.

В астатической системе статическая ошибка равна нулю, т.е. такая система после окончания процесса регулирования возвращается в состояние исходного равновесия.

*Динамическая ошибка*  $\Delta_{\text{дин}}$  — это максимальное в процессе регулирования отклонение регулируемого параметра от конечного состояния равновесия.

В астатических САУ конечное и исходное состояния равновесия совпадают с заданием, поэтому в них динамическая ошибка

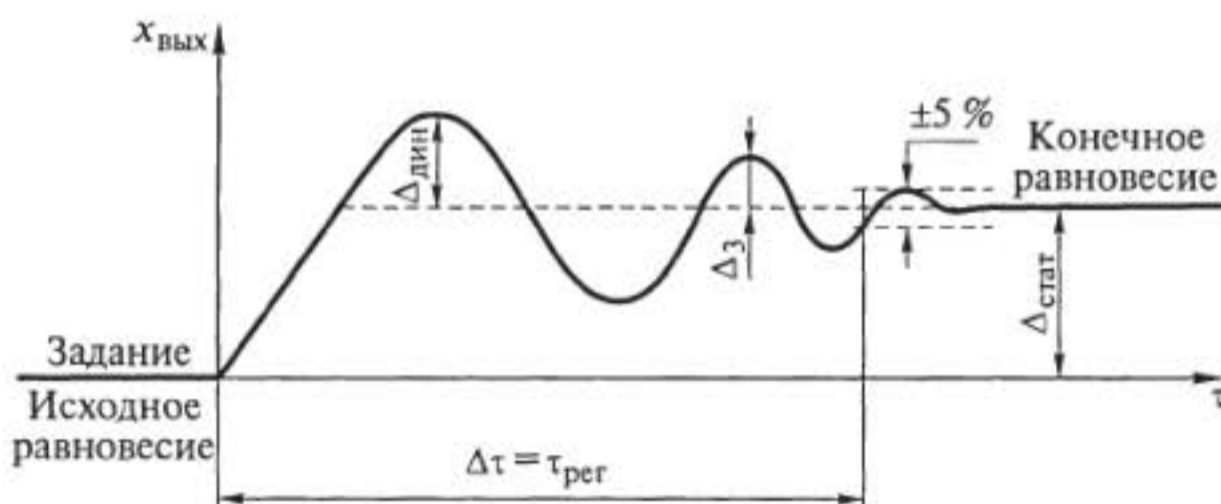


Рис. 12.4. График процесса регулирования в статической САУ

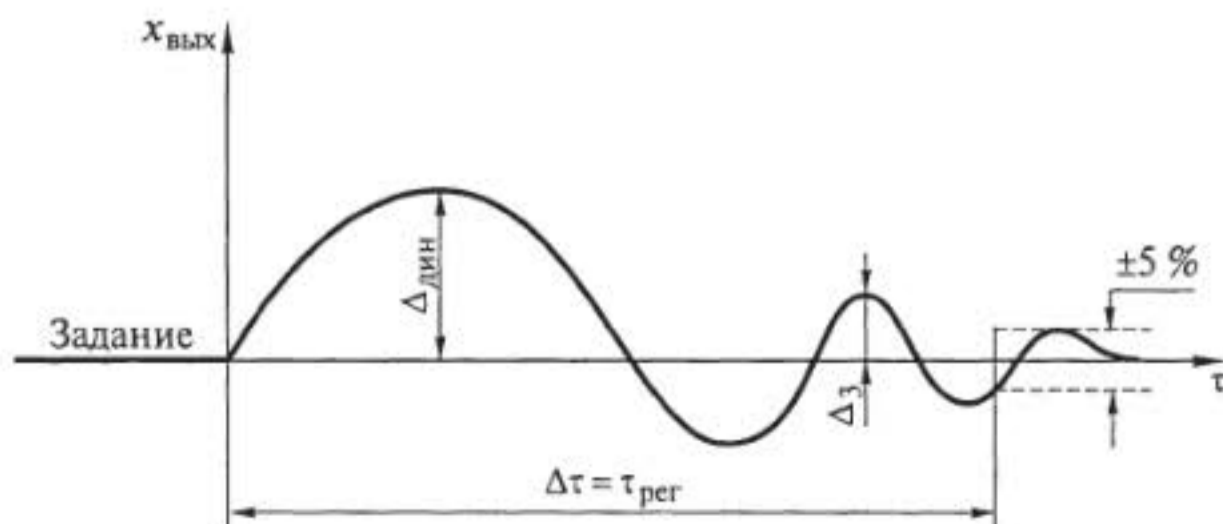


Рис. 12.5. График процесса регулирования в астатической САУ

равна максимальному отклонению параметра в процессе регулирования (см. рис. 12.4 и 12.5).

*Время регулирования*  $\tau_{\text{рег}}$  — это отрезок времени с момента подачи в замкнутую САУ возмущающего воздействия до момента, по истечении которого регулируемый параметр в состоянии конечного равновесия или отличается от заданного значения не более чем на  $\pm 5\%$ . Если заданное значение равно нулю (как на рис. 12.4 и 12.5), то  $\pm 5\%$  берется от значения динамической ошибки.

*Перерегулирование*  $\sigma$  — это динамическая ошибка, отнесенная к номинальному значению регулируемого параметра в процентах.

Так как использование динамической ошибки, имеющей размерность регулируемого параметра (градус, метр, микрон и т.д.), не всегда удобно (например, динамическая ошибка в  $\pm 2^\circ\text{C}$  для уровня температуры в  $1000^\circ\text{C}$  — маленькая, а для температуры тела человека ( $36,6^\circ\text{C}$ ) — большая), перерегулирование вычисляют по формуле

$$\sigma = \frac{x_{\text{вых макс}} - x_{\text{вых ном}}}{x_{\text{вых ном}}} 100 = \frac{\Delta_{\text{дин}}}{x_{\text{вых ном}}} 100.$$

*Степень затухания*  $\psi$  — это показатель качества, который характеризует, на сколько процентов уменьшается амплитуда выходного сигнала системы за один период колебаний.

Степень затухания определяется по формуле

$$\psi = \frac{\Delta_{\text{дин}} - \Delta_3}{\Delta_{\text{дин}}} 100,$$

где  $\Delta_3$  — амплитуда колебаний третьего периода (см. рис. 12.4 и 12.5).

Если  $\Delta_3 = 0$ , то  $\psi = 100\%$ .

*Обобщенный интегральный среднеквадратичный показатель качества*  $J$  определяется интегралом (площадью подинтегральной фигуры) изменения в процессе регулирования выходного сигнала системы за период времени регулирования:

$$J = \int_0^{\tau_{\text{рег}}} (\Delta x_{\text{вых}})^2 d\tau.$$

Здесь  $\Delta x_{\text{вых}}$  берется в квадрате, чтобы можно было просуммировать как положительные, так и отрицательные отклонения выходного сигнала.

Естественно, чем меньше динамическая, статическая ошибки и время регулирования, тем меньше показатель  $J$ , а следовательно, выше качество работы САУ.

### 12.3. Оптимальные процессы регулирования

Часто на практике требования к качеству работы проектируемой САУ задают не в виде значений отдельных показателей качества, а в виде требования реализации одного из трех оптимальных процессов регулирования. Рассмотрим эти процессы.

*Апериодический процесс регулирования* показан на рис. 12.6.

Данный график показывает, что регулируемый параметр после отклонения плавно возвращается к заданному значению. Этот процесс характеризуется минимальным временем регулирования, но имеет максимальную динамическую ошибку.

*Процесс регулирования с 20%-м перерегулированием* условно показан на рис. 12.7.

Для этого процесса характерны меньшая, чем в апериодическом процессе, динамическая ошибка, но большее время регулирования. Перерегулирование здесь не должно превышать 20 %.

*Процесс регулирования с минимальным интегральным показателем качества* представлен на рис. 12.8.

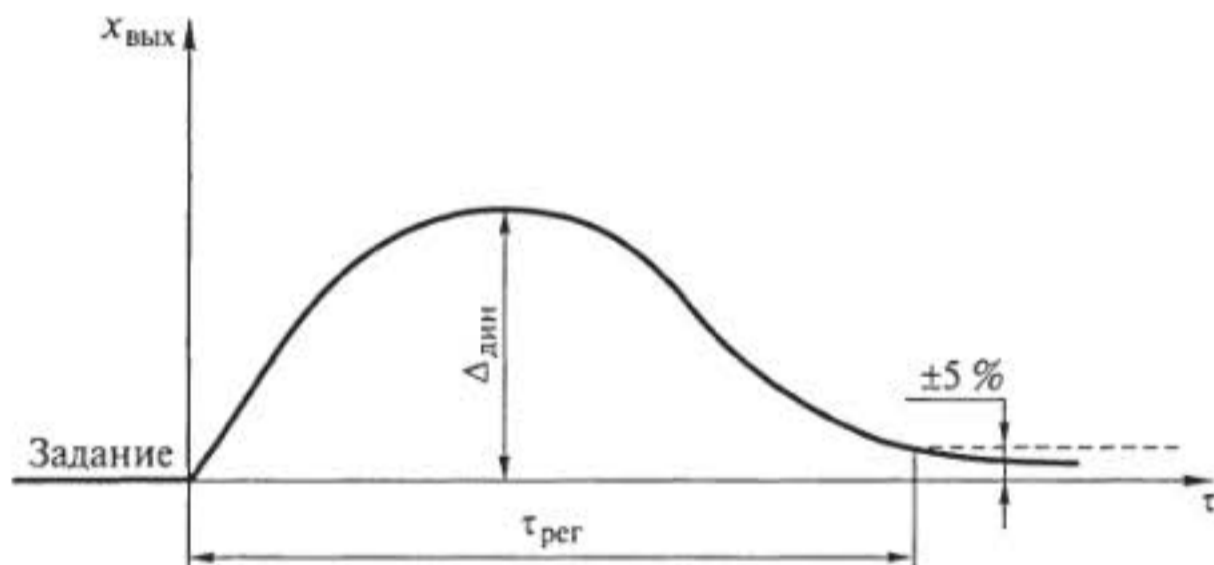


Рис. 12.6. График апериодического процесса регулирования

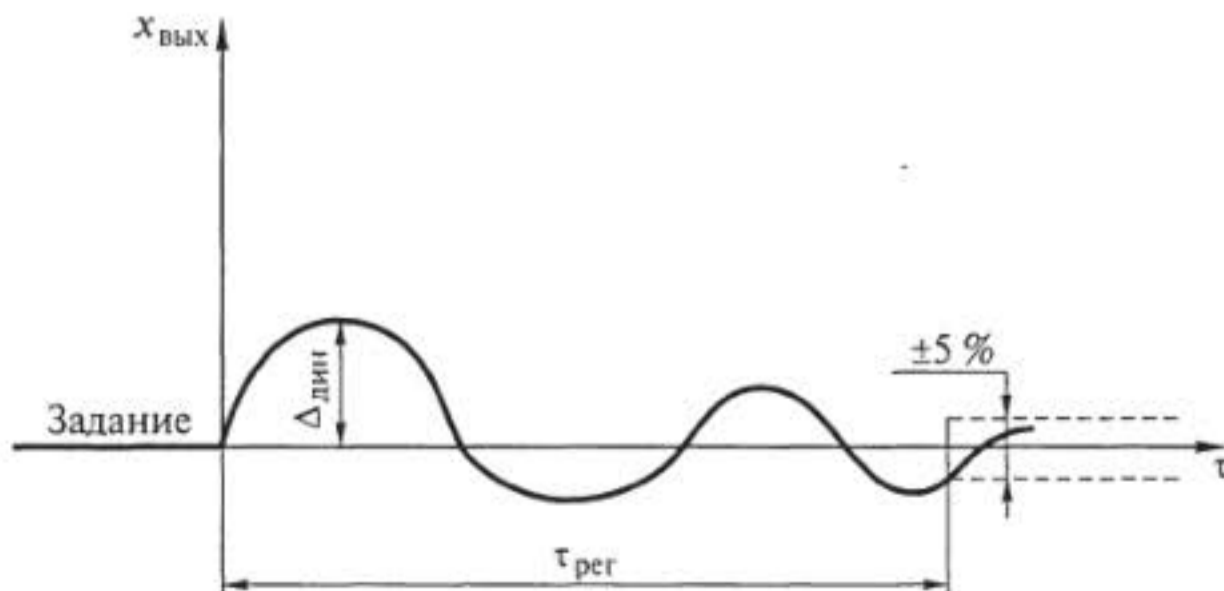


Рис. 12.7. График процесса регулирования с 20%-м перерегулированием

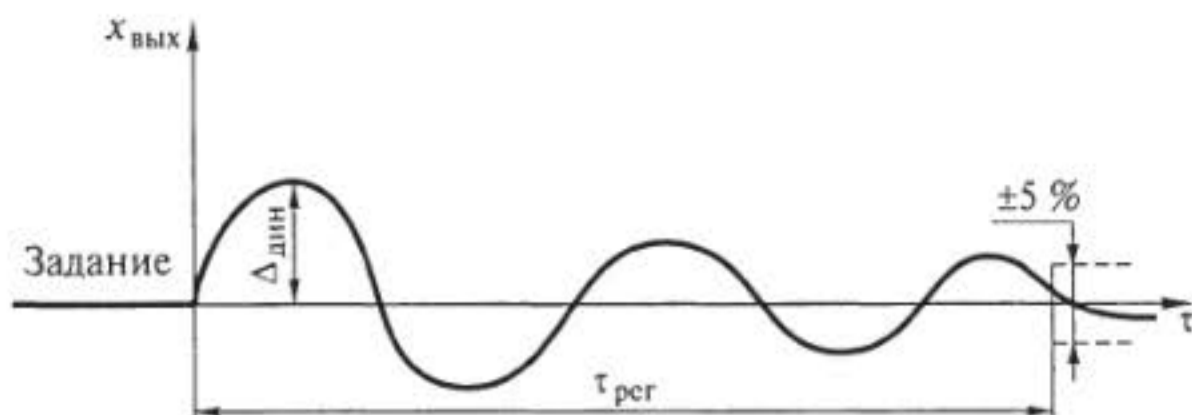


Рис. 12.8. График процесса регулирования с минимальным интегральным показателем качества

Для этого процесса регулирования, где интегральный показатель качества сведен к минимуму:

$$J = \int_0^{\tau_{\text{рег}}} (\Delta x_{\text{вых}})^2 d\tau \rightarrow \min,$$

характерны минимальная динамическая ошибка и максимальное время регулирования.

Трудно ответить на вопрос: «Какой из трех оптимальных процессов регулирования самый оптимальный?» Выбор необходимого оптимального процесса регулирования определяется видом управляемого технологического процесса. Например, для некоторых процессов кратковременная большая динамическая ошибка может быть очень опасна (как при управлении давлением пара в барабане котла). Следовательно, для таких объектов апериодический процесс регулирования не самый лучший.

Из всего сказанного можно сделать вывод о том, что общей задачей, решаемой ТАУ, является проектирование промышленных САУ, во-первых, устойчивых, а во-вторых, отвечающих определенным требованиям по качеству работы.

#### 12.4. Анализ устойчивости замкнутой системы

Замкнутую САУ (регулятор которой подключен к объекту в цепи отрицательной обратной связи) сначала проверяют на устойчивость при заданных значениях параметров настройки регулятора. Неустойчивая система неработоспособна, и нет смысла анализировать качество ее работы.

При исследовании замкнутой системы на устойчивость рассматривают ее так называемое свободное движение, т.е. движение, которое появляется в системе после подачи и снятия возмущающего воздействия.

Рис. 12.9. Структурная схема САУ, движущейся свободно



Русский математик А. М. Ляпунов доказал, что если система, движущаяся свободно, будет устойчивой, то будет устойчивой и система с вынужденным движением, на которую возмущение действует постоянно. Математический анализ на устойчивость системы, движущейся свободно, значительно проще анализа системы с вынужденным движением.

Таким образом, замкнутая система будет устойчивой, если после подачи и снятия возмущающего воздействия она через конечный промежуток времени возвращается в состояние равновесия. Примером свободного движения являются свободные колебания маятника, который качнули.

При свободном движении входной сигнал системы — возмущающее воздействие после снятия отсутствует. Объект и регулятор в свободном движении замкнуты только друг на друга.

Структурная схема САУ, движущейся свободно, изображена на рис. 12.9. На этой схеме  $x$  — сигнал связи регулятора с объектом. Для анализа на устойчивость замкнутой системы, движущейся свободно, разорвем ее (см. на схеме место разрыва системы), после чего получим цепь из последовательно соединенных объекта и регулятора. Передаточная функция этой разомкнутой САУ, движущейся свободно, будет иметь вид

$$W_{\text{раз}}(p) = W_o(p)W_p(p) = \frac{x_{\text{вых.р}}(p)}{x_{\text{вх.о}}(p)}.$$

Для лучшего понимания последующих математических действий и выводов рассмотрим для примера систему, в которой объект аппроксимирован апериодическим звеном, а регулятор имеет ПИ-закон регулирования, тогда

$$W_o(p) = \frac{K_o}{T_o p + 1};$$

$$W_{\text{ПИ}}(p)K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right) = \frac{K_p(T_i p + 1)}{T_i p}.$$

Следовательно, для данного примера

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{K_o}{T_o p + 1} \frac{K_p (T_i p + 1)}{T_i p} = \frac{x_{\text{вых.р}}(p)}{x_{\text{вх.о}}(p)}.$$

Если раскрыть эти отношения, получим дифференциальное уравнение свободного движения разомкнутой системы, записанное в операторной форме:

$$(T_o p + 1) T_i p x_{\text{вых.р}}(p) = K_o K_p (T_i p + 1) x_{\text{вх.о}}(p).$$

Теперь замкнем систему, движущуюся свободно. При замыкании, поскольку регулятор работает в цепи отрицательной обратной связи, имеет место следующее равенство:

$$x_{\text{вых.р}}(p) = -x_{\text{вх.о}}(p).$$

Следовательно, дифференциальное уравнение свободного движения данной замкнутой системы будет имеет вид

$$(T_o p + 1) T_i p x_{\text{вых.р}}(p) = K_o K_p (T_i p + 1) [-x_{\text{вх.о}}(p)],$$

или

$$(T_o p + 1) T_i p x_{\text{вых.р}}(p) + K_o K_p (T_i p + 1) x_{\text{вх.о}}(p) = 0.$$

Однако  $x_{\text{вых.р}}(p)$  и  $x_{\text{вх.о}}(p)$  — это сигнал  $x$  (см. рис. 12.9), поэтому предыдущее дифференциальное уравнение свободного движения данной замкнутой системы можно записать следующим образом:

$$[(T_o p + 1) T_i p + K_o K_p (T_i p + 1)] x = 0,$$

или после преобразования

$$[T_o T_i p^2 + (T_i + K_o K_p T_i) p + K_o K_p] x = 0.$$

В общем виде дифференциальное уравнение свободного движения замкнутой САУ по аналогии можно записать следующим образом:

$$[a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0] x = 0.$$

Если полином в квадратных скобках дифференциального уравнения свободного движения замкнутой системы приравнять к нулю, получим *характеристическое уравнение замкнутой системы*.

Для данной системы характеристическое уравнение будет иметь вид

$$T_o T_i p^2 + (T_i + K_o K_p T_i) p + K_o K_p = 0.$$



Характеристическое уравнение замкнутой системы в общем виде следующее:

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

Характеристическое уравнение, видимо, потому и названо характеристическим, что его корни «характеризуют», будет замкнутая система устойчивой или нет. Для системы, движущейся свободно, неважно в какой точке разомкнули (разорвали) кольцо из объекта и регулятора, т. е. можно записать, что сигнал  $x = x_{\text{вых.о}}$  — регулируемый параметр.

Общим решением дифференциального уравнения свободного движения замкнутой системы будет выражение

$$x = x_{\text{вых}}(\tau) = \sum_{k=1}^n C_k e^{\rho_k \tau},$$

$\tau$  — текущее время;  $C_k$  — постоянные интегрирования, зависящие от начальных условий свободного движения системы (мощности первоначального возмущающего воздействия);  $e = 2,71$ ;  $\rho_k$  — корни характеристического уравнения замкнутой системы;  $n$  — количество постоянных интегрирования.

Поскольку характеристическое уравнение замкнутой системы получено из дифференциального уравнения свободного движения замкнутой системы, записанного в операторной форме (преобразованного по Лапласу), оно является алгебраическим.

Корни алгебраического уравнения (характеристического) могут быть действительными, комплексными, положительными и отрицательными. Рассмотрим эти варианты.

1. Все корни характеристического уравнения замкнутой системы действительные и отрицательные.

В этом случае решение дифференциального уравнения свободного движения замкнутой системы можно записать следующим образом:

$$x_{\text{вых}}(\tau) = \sum_{k=1}^n C_k e^{-\rho_k \tau} = \sum_{k=1}^n C_k \frac{1}{e^{\rho_k \tau}}.$$

При  $\tau \rightarrow \infty$  (от нуля, без отрицательных  $\tau$ ) в дроби  $1/e^{\rho_k \tau}$  к бесконечности стремится знаменатель  $e^{\rho_k \tau}$ , а сама дробь стремится к нулю.

Следовательно, с течением времени к нулю стремится и каждое из  $n$  слагаемых суммы, а также  $x_{\text{вых}}(\tau)$  — значение регулируемого параметра в замкнутой системе, движущейся свободно. Значит, после подачи и снятия возмущающего воздействия система с течением времени приходит в состояние равновесия, т. е. такая замкнутая система — устойчивая.

2. Один корень характеристического уравнения замкнутой системы положительный ( $\rho_1 > 0$ ), остальные — отрицательные ( $\rho_k < 0$  для  $2 < k < n$ ).

В этом случае решение дифференциального уравнения свободного движения замкнутой системы запишем следующим образом:

$$x_{\text{вых}}(\tau) = C_1 e^{\rho_1 \tau} + \sum_{k=2}^n C_k e^{-\rho_k \tau}.$$

В этом случае сумма  $\sum_{k=2}^n C_k e^{-\rho_k \tau}$  с течением времени стремится к нулю, но слагаемое  $C_1 e^{\rho_1 \tau}$  непрерывно возрастает.

Следовательно, непрерывно растет и  $x_{\text{вых}}(\tau)$  — регулируемый параметр, т.е. замкнутая система будет неустойчивой.

3. Один корень характеристического уравнения равен нулю ( $\rho_1 = 0$ ), остальные — отрицательные ( $\rho_k < 0$  для  $2 \leq k \leq n$ ).

Разобьем сумму на два слагаемых:

$$x_{\text{вых}}(\tau) = C_1 e^{0 \cdot \tau} + \sum_{k=2}^n C_k e^{-\rho_k \tau}.$$

Здесь второе слагаемое  $\sum_{k=2}^n$  при  $2 \leq k \leq n$  с течением времени стремится к нулю, а первое слагаемое  $C_1 e^{0 \cdot \tau} = C_1 \cdot 1 = C_1$ .

Следовательно, выходной сигнал — регулируемый параметр в такой системе с течением времени приобретает вид незатухающих синусоидальных колебаний с амплитудой  $C_1$ , т.е. теоретически замкнутая система находится на границе устойчивости, а практически она неустойчивая.

4. Корни характеристического уравнения замкнутой системы — комплексные числа ( $\rho_k = \pm m_k \pm i n_k$ ).

В этом случае решение дифференциального уравнения свободного движения замкнутой системы будет иметь вид

$$\begin{aligned} x_{\text{вых}}(\tau) &= \sum_{k=1}^n C_k e^{(\pm m_k \pm i n_k) \tau} = \sum_{k=1}^n C_k e^{\pm m_k \tau} e^{\pm i n_k \tau} = \\ &= \sum_{k=1}^n C_k e^{\pm m_k \tau} [\cos(n_k \tau) \pm i \sin(n_k \tau)]. \end{aligned}$$

Из предыдущих вариантов ясно, что если все действительные части ( $m_k$ ) всех комплексных корней характеристического уравнения замкнутой системы отрицательные, то такая система будет устойчивой. Мнимые части комплексных корней ( $\pm i n_k$ ) характеристического уравнения на устойчивость влияния не оказывают, так как  $\cos(n_k \tau)$  и  $\sin(n_k \tau)$  изменяются в пределах от +1 до -1. Однако

от мнимых частей комплексных корней характеристического уравнения зависит колебательность процесса регулирования: с возрастанием  $n_k$  быстрее изменяется угол  $\varphi = n_k \tau$  и, следовательно, выше частота колебаний процесса регулирования.

Для анализа устойчивости замкнутой САУ удобно корни характеристического уравнения разместить на комплексной плоскости (рис. 12.10). Если все корни (действительные и комплексные) располагаются в левой полуплоскости, то система устойчивая; если хотя бы один корень характеристического уравнения попадает в правую полуплоскость — система неустойчивая; если действительный корень равен нулю или есть чисто мнимые корни — система находится на границе устойчивости, т.е. практически она неустойчивая. Также чем ближе отрицательный действительный корень к мнимой оси комплексной плоскости, тем меньшим запасом устойчивости обладает замкнутая система, и чем меньше действительная часть комплексного корня характеристического уравнения, тем меньше запас устойчивости.

Как правило, комплексные корни характеристического уравнения замкнутой САУ сопряженные, т.е.  $\rho_k = m_k + in_k$ ;  $\rho_{k+1} = m_{k+1} - in_{k+1}$ .

Следовательно, большая мнимая часть ( $n_k$ ) комплексных корней характеристического уравнения определяет колебательность или частоту колебаний процесса регулирования, т.е. чем больше угол  $\varphi$  (см. рис. 12.10), тем больше колебаний совершает система, приходя в равновесное состояние.

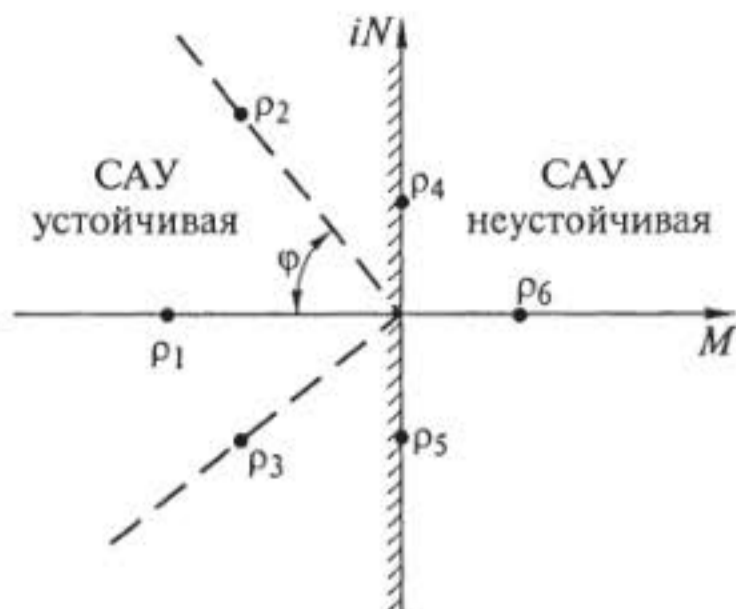


Рис. 12.10. Расположение корней характеристического уравнения на комплексной плоскости

## 12.5. Вывод характеристического уравнения замкнутой системы из передаточных функций объекта и регулятора

Для исследования замкнутой системы на устойчивость необходимо знать математические модели — передаточные функции всех элементов САУ. Для укрупненной структурной схемы САУ — это передаточные функции объекта и регулятора. Выясним, как, используя передаточные функции объекта и регулятора, определить характеристическое уравнение замкнутой системы, через корни которого можно оценить устойчивость проектируемой САУ. Это можно сделать двумя способами.

**Первый способ.** Запишем передаточную функцию замкнутой САУ через передаточные функции объекта и регулятора с параллельно-встречным соединением звеньев с отрицательной обратной связью (см. рис. 10.3 и 11.2):

$$W_{\text{замСАУ}}(p) = \frac{W_o(p)}{1 + W_o(p)W_p(p)}$$

Используем передаточные функции объекта и регулятора, полученные при выводе характеристического уравнения замкнутой САУ (см. рис. 12.9):

$$\begin{aligned} W_{\text{замСАУ}}(p) &= \frac{\frac{K_o}{T_0p + 1}}{1 + \frac{K_o}{T_0p + 1} \frac{K_p(T_{иp} + 1)}{T_{иp}}} = \frac{K_o T_{иp}}{(T_0p + 1)T_{иp} + K_o K_p (T_{иp} + 1)} = \\ &= \frac{K_o T_{иp}}{T_0 T_{иp} p^2 + (T_{и} + K_o K_p T_{и})p + K_o K_p} \end{aligned}$$

Теперь, если после проведенных алгебраических преобразований знаменатель передаточной функции замкнутой САУ приравнять нулю, получим характеристическое уравнение замкнутой системы. Следует отметить, что последнее выражение есть передаточная функция замкнутой системы с возмущающим воздействием  $\lambda_1$  (см. рис. 11.2) со стороны регулирующего органа. В общем виде она будет иметь вид

$$W_{\text{замСАУ}}^{\lambda_1}(p) = \frac{W_o(p)}{1 + W_o(p)W_p(p)} = \frac{\frac{A(p)}{B(p)}}{1 + \frac{A(p)C(p)}{B(p)D(p)}} = \frac{A(p)D(p)}{B(p)D(p) + A(p)C(p)},$$

где  $A(p)$ ,  $B(p)$ ,  $C(p)$ ,  $D(p)$  — полиномы.

Запишем в общем виде передаточную функцию замкнутой системы с возмущающим воздействием  $\lambda_3$  (см. рис. 11.2) со стороны задатчика:

$$W_{\text{замСАУ}}^{\lambda_3}(p) = \frac{W_o(p)W_p(p)}{1 + W_o(p)W_p(p)} = \frac{\frac{A(p)C(p)}{B(p)D(p)}}{1 + \frac{A(p)C(p)}{B(p)D(p)}} = \frac{A(p)C(p)}{B(p)D(p) + A(p)C(p)}$$

Сравнив знаменатели  $W_{\text{замСАУ}}^{\lambda_1}(p)$  и  $W_{\text{замСАУ}}^{\lambda_3}(p)$ , можно сделать вывод, что характеристические уравнения замкнутых САУ с воз-

мушающим воздействием  $\lambda_1$  со стороны регулирующего органа и возмущающим воздействием  $\lambda_3$  со стороны задатчика будут одинаковыми.

Недостаток рассмотренного способа вывода характеристического уравнения замкнутой САУ состоит в том, что при алгебраических преобразованиях четырехэтажной дроби передаточной функции легко ошибиться и, следовательно, получить с ошибками после преобразований знаменатель обычной дроби. Этому недостатка лишен другой способ.

**Второй способ.** С помощью передаточных функций объекта и регулятора запишем передаточную функцию выбранной разомкнутой системы:

$$W_{\text{разСАУ}}(p) = W_o(p)W_p(p) = \frac{K_o}{T_0p + 1} \frac{K_p(T_n p + 1)}{T_n p}.$$

Затем суммируем знаменатель и числитель полученной обычной дроби и полученную сумму приравняем к нулю. В результате получим характеристическое уравнение замкнутой системы:

$$(T_0 p + 1)T_n p + K_o K_p (T_n p + 1) = 0,$$

или

$$T_0 T_n p^2 + (T_n + K_o K_p T_n) p + K_o K_p = 0.$$

Запишем передаточную функцию разомкнутой САУ в общем виде:

$$W_{\text{раз САУ}}(p) = W_o(p)W_p(p) = \frac{A(p)}{B(p)} \frac{C(p)}{D(p)}.$$

Выражение  $B(p)D(p) + A(p)C(p) = 0$  и есть характеристическое уравнение замкнутой САУ.

Однако после получения характеристического уравнения замкнутой САУ возникают новые трудности. Дело в том, что современная математика не позволяет решать в общем виде алгебраические уравнения (а характеристические уравнения замкнутой САУ — это алгебраические уравнения) выше третьего порядка (в которых неизвестное  $p$  в третьей степени), тогда как для реальных промышленных систем, состоящих из множества элементов (см. рис. 11.1), часто требуется решение уравнений четвертого, шестого и выше порядков. Поэтому в ТАУ разработаны косвенные методы (ТАУ — это практическая, инженерная теория), позволяющие определить знаки всех корней характеристического уравнения замкнутой САУ без решения самого уравнения. Эти методы называли критериями устойчивости.

## 12.6. Критерии устойчивости САУ

### Алгебраический критерий устойчивости Рауса-Гурвица

В этом случае исходным при анализе замкнутой САУ на устойчивость является характеристическое уравнение замкнутой САУ:

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

По критерию Рауса-Гурвица необходимым условием устойчивости замкнутой САУ (в которой все действительные корни характеристического уравнения отрицательные, а у комплексных корней — отрицательная действительная часть) являются положительные коэффициенты  $a_n \dots a_1$  и свободный член  $a_0$  исходного характеристического уравнения. Это условие является также достаточным для систем с характеристическим уравнением 1 и 2-го порядков. Естественно, при  $n = 1$  характеристическое уравнение имеет вид

$$a_1 p + a_0 = 0,$$

т.е. если  $a_1 > 0$  и  $a_0 > 0$ , то корень  $p < 0$ , и САУ устойчивая.

При  $n = 2$  уравнение имеет вид

$$a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0.$$

В этом случае, если  $a_1^2 < 4a_2 a_0$ , корни могут быть комплексные, но действительная их часть  $\left(-\frac{a_1}{2a_2}\right)$  всегда будет отрицательной, если  $a_2, a_1, a_0 > 0$ .

Для систем выше второго порядка при сохранении необходимого условия устойчивости  $a_n \dots a_0 > 0$  достаточным условием будут положительные знаки определителей Гурвица, т.е. главного определителя матрицы и ее диагональных миноров, которые составляются по определенному правилу из коэффициентов  $a_n \dots a_1$  и свободного члена  $a_0$  характеристического уравнения замкнутой САУ.

Для системы третьего порядка с характеристическим уравнением

$$a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0$$

определитель такой матрицы

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = a_2 a_1 - a_3 a_0.$$

При этом если  $\Delta_1 > 0$ , то САУ устойчивая.

Для системы четвертого порядка с характеристическим уравнением

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

должен быть положительным главный определитель Гурвица:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & a_0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} > 0,$$

а также определитель диагонального минора:

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ a_4 & a_2 \end{vmatrix} > 0.$$

Следовательно,

$$\Delta_1 = a_3 a_2 a_1 - a_4 a_1^2 - a_3^2 a_0 > 0;$$

$$\Delta_2 = a_3 a_2 - a_4 a_1 > 0.$$

Данный алгебраический критерий устойчивости для систем выше пятого порядка, как правило, не применяется, поскольку тогда вычисление определителей Гурвица становится сложной задачей. Для таких систем можно применить частотные критерии устойчивости Михайлова и Найквиста.

### Частотный критерий устойчивости Михайлова

Исходным при анализе замкнутой системы на устойчивость по критерию А. В. Михайлова (русский математик, разработавший этот критерий в 1930 г.) также является характеристическое уравнение замкнутой САУ:

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

Заменив в этом уравнении оператор Лапласа  $p$  на выражение  $i\omega$  в соответствующей степени, получают аналитическое выражение вектора Михайлова, который делят на действительную и мнимую части:

$$a_n (i\omega)^n + a_{n-1} (i\omega)^{n-1} + \dots + a_1 (i\omega) + a_0 = M(i\omega) = m(\omega) + in(\omega).$$

Далее строят годограф вектора Михайлова — кривую, которая описывает конец этого вектора на комплексной плоскости при изменении частоты  $\omega$  от 0 до  $\infty$ .

*Определение:* замкнутая система будет устойчивой, если годограф вектора Михайлова (при  $\omega = 0$ ), начиная свое движение с

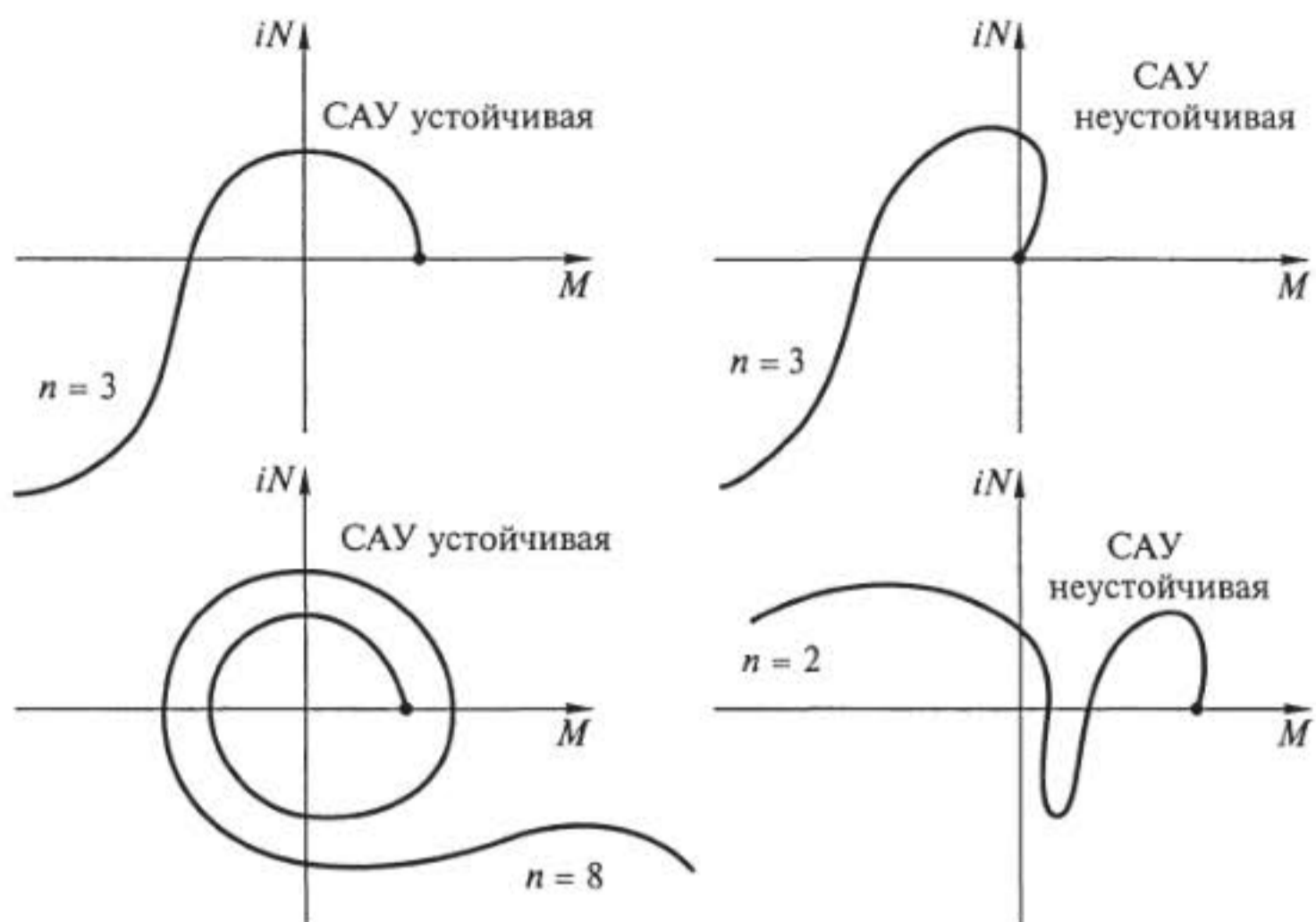


Рис. 12.11. Примеры годографов Михайлова, соответствующих устойчивым и неустойчивой САУ

положительной действительной полуоси комплексной плоскости ( $a_0 > 0$ ), двигаясь против часовой стрелки и нигде не обращаясь в нуль, последовательно обходит столько квадрантов комплексной плоскости, каков порядок исходного характеристического уравнения замкнутой системы, и уходит в последнем квадранте в бесконечность.

На рис. 12.11 даны примеры годографов Михайлова, соответствующих устойчивым и неустойчивым САУ.

Критерий устойчивости Михайлова удобно применять для систем высокого порядка, т. е. с  $n = 6, 8, 10$ . При делении аналитического выражения вектора Михайлова на действительную и мнимую части в первую — попадают члены с четной степенью, так как  $i^2 = -1, i^4 = +1, i^6 = -1$ , а в последнюю — с нечетной, так как  $i^1 = i, i^3 = -i, i^5 = i$ . При построении годографа Михайлова, задавая значения  $\omega < 1$ , можно учитывать члены с низкими степенями, а задавая значения  $\omega > 1$ , — с высокими.

### Частотный критерий устойчивости Найквиста

Особенность этого критерия заключается в том, что устойчивость замкнутой системы определяют, используя амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ или АФХ) разомкнутой системы.



Следует отметить, что разомкнутая система практического смысла не имеет. При размыкании связи объекта с регулятором или регулятора с объектом нарушается взаимодействие элементов системы, и объект становится неуправляемым. Однако в методическом плане в ТАУ разомкнутая система используется часто. Передаточная функция разомкнутой САУ имеет вид

$$W_{\text{разСАУ}}(p) = W_o(p)W_p(p).$$

Заменив оператор Лапласа  $p$  в передаточных функциях объекта и регулятора на выражение  $i\omega$ , получим аналитическое выражение вектора АФХ разомкнутой системы:

$$W_{\text{разСАУ}}(i\omega) = W_o(i\omega)W_p(i\omega) = m(\omega) + in(\omega).$$

Разделив вектор АФХ разомкнутой САУ на действительную и мнимую части, строят его годограф, изменяя частоту  $\omega$  от 0 до  $\infty$ .

*Определение:* замкнутая система будет устойчивой, если АФХ разомкнутой САУ на комплексной плоскости не охватывает точку  $E$  с координатами  $[-1; i0]$  (рис. 12.12, кривая 1).

Если АФХ разомкнутой системы проходит через точку  $E$ , то замкнутая система теоретически будет на границе устойчивости, а практически она неустойчивая. Чем правее от точки  $E$  АФХ разомкнутой САУ пересекает отрицательную действительную полуось комплексной плоскости, тем большим запасом устойчивости обладает замкнутая система.

Иногда АФХ разомкнутой системы при изменении частоты  $\omega$  от 0 до  $\infty$  несколько раз пересекает отрицательную действительную полуось комплексной плоскости (рис. 12.13).

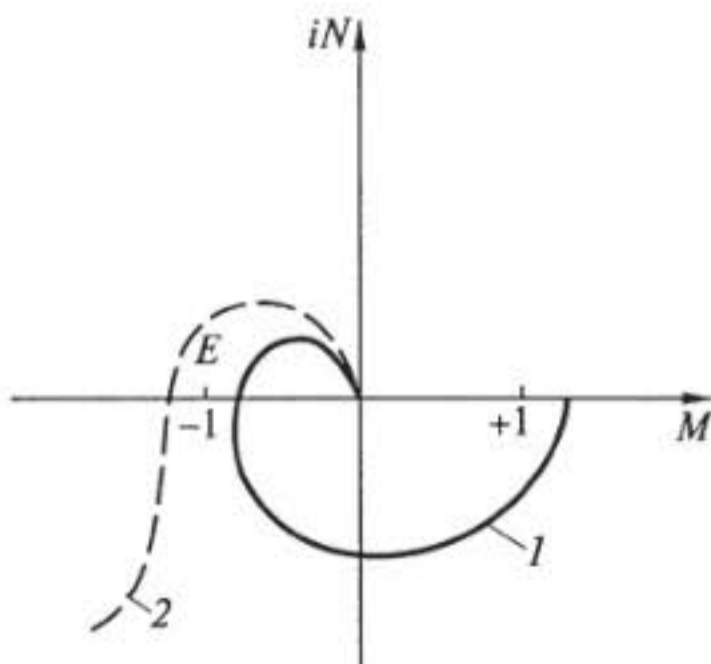


Рис. 12.12. Примеры АФХ разомкнутых САУ, соответствующих замкнутой устойчивой (1) и замкнутой неустойчивой (2) системам

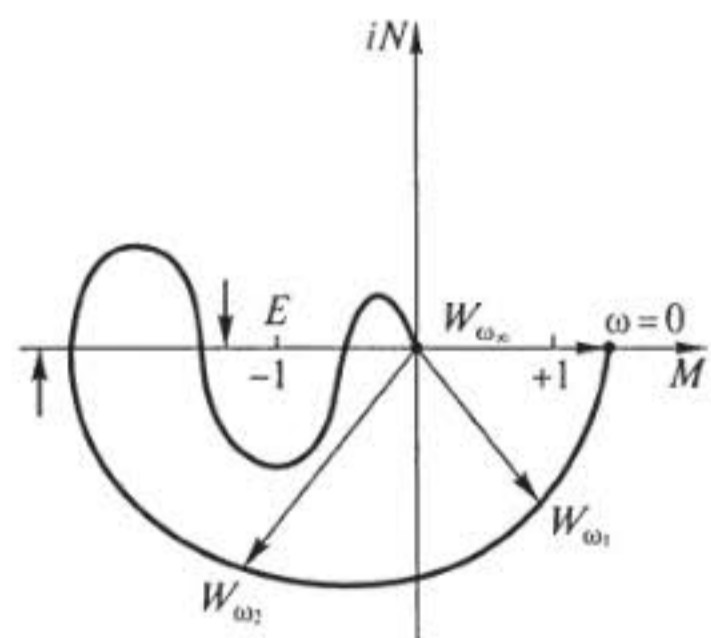


Рис. 12.13. Пример АФХ разомкнутой САУ, многократно пересекающей отрицательную действительную полуось

В этом случае замкнутая система будет устойчивой, если число пересечений АФХ разомкнутой САУ отрицательной действительной полуоси левее точки  $E [-1; i0]$  снизу вверх равно числу ее пересечений сверху вниз. На рис. 12.13 АФХ разомкнутой САУ пересекает отрицательную действительную полуось комплексной плоскости левее точки  $E$  один раз снизу вверх и один раз сверху вниз. Следовательно, данная замкнутая САУ устойчивая.

Если проектируемая система устойчивая, можно приступить к анализу качества ее работы.

## 12.7. Анализ качества работы замкнутой САУ

Качество работы САУ легко определить, построив график процесса регулирования, по которому можно найти следующие показатели: статическую и динамическую ошибки, время регулирования и др. (рис. 12.4, 12.5).

В ТАУ разработаны несколько методов построения графика процесса регулирования по известным передаточным функциям всех элементов системы (методы Башкирова, Акульшина, Гольдфарба, Крылова и др.). Есть также методы построения графика процесса регулирования с помощью соответствующих программ.

Солодовниковым В. В. был разработан метод построения графика процесса регулирования замкнутой системы с использованием вещественной части АФЧХ, называемой вещественной характеристикой. Достоинством этого метода, который также называют методом трапеций, является наличие соответствующих расчетных таблиц, т. е. построить этим методом график процесса регулирования для проектируемой САУ можно, используя только калькулятор.

Суть метода трапеций заключается в следующем. Используя передаточные функции объекта и регулятора, записывают передаточную функцию замкнутой системы:

$$W_{\text{замСАУ}}(p) = \frac{W_o(p)}{1 + W_o(p)W_p(p)}$$

Заменив в этой формуле оператор Лапласа  $p$  на выражение  $i\omega$ , получают аналитическое выражение вектора АФХ замкнутой САУ:

$$W_{\text{замСАУ}}(i\omega) = \frac{W_o(i\omega)}{1 + W_o(i\omega)W_p(i\omega)}$$

Если ранее вектор АФХ для построения его годографа мы разбивали на действительную  $m(\omega)$  и мнимую  $in(\omega)$  части, то для АФХ замкнутой системы принимают другие обозначения:

$$W_{\text{замСАУ}}(i\omega) = \frac{W_o(i\omega)}{1 + W_o(i\omega)W_p(i\omega)} = P(\omega) + iQ(\omega),$$

где  $P(\omega)$  — вещественная характеристика замкнутой системы, или вещественная часть АФХ замкнутой САУ;  $iQ(\omega)$  — мнимая часть.

Далее по аналитическому выражению вещественной характеристики САУ  $P(\omega)$ , изменяя частоту  $\omega$  от 0 до  $\infty$ , строят ее график, который разбивают затем на несколько трапеций с алгебраической суммой площадей, близкой к алгебраической сумме площади, очерченной графиком.

На рис. 12.14 график  $P(\omega)$  разбит на две трапеции. (Для большей точности можно разбивать график на 3...5 трапеций.)

На рис. 12.15 с использованием табличных данных рассчитанных для единичной (т.е. с ординатой, равной 1) трапеции и коэффициентов масштабного перехода от единичной трапеции к

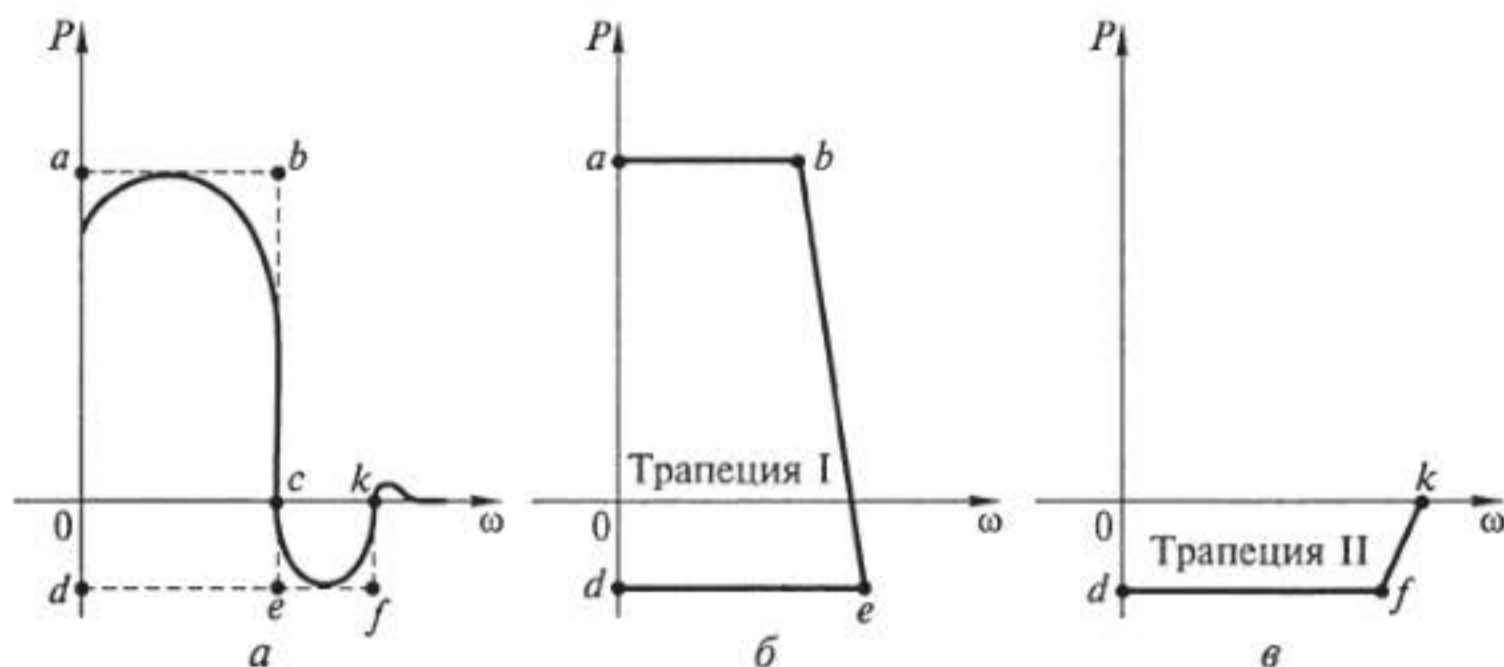


Рис. 12.14. Пример разбиения графика вещественной характеристики  $P(\omega)$  замкнутой САУ (а) на две трапеции (б, в)

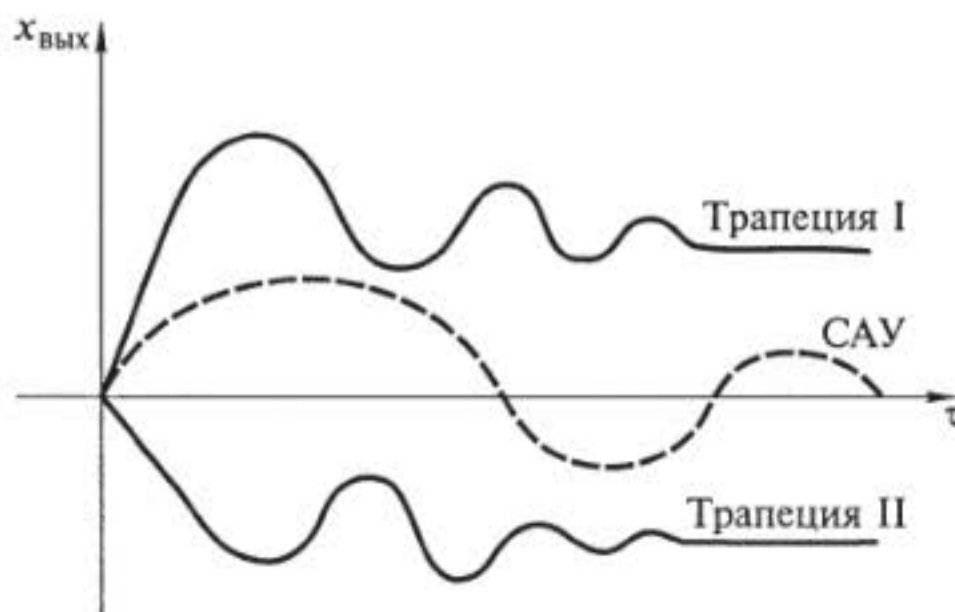


Рис. 12.15. Графики процессов регулирования для трапеций, показанных на рис. 12.14, б, в, и процесса регулирования САУ в целом

заданным, построены графики процессов регулирования для каждой трапеции в одних осях координат.

Затем, алгебраически суммируя графики процессов регулирования для всех имеющихся трапеций, получают график процесса регулирования для системы в целом, по которому определяют показатели качества работы спроектированной САУ: статическую ошибку, динамическую ошибку, время регулирования и др.

### **Контрольные вопросы**

1. Каковы графики процессов регулирования в САУ с регуляторами недостаточной, избыточной и необходимой мощности?

2. При регуляторах какой мощности работа САУ будет устойчивой, неустойчивой и почему?

3. Что такое статическая ошибка САУ и в каких системах она наблюдается?

4. Что такое динамическая ошибка САУ?

5. Что такое время регулирования, перерегулирование и степень затухания в процессе регулирования?

6. Как определяется обобщенный интегральный средний квадратический показатель качества процесса регулирования?

7. Какие на практике используются виды оптимальных процессов регулирования?

8. Что такое устойчивость САУ и какими показателями она определяется?

9. Какие существуют критерии устойчивости САУ?

10. Как определить качество САУ методом трапеций?

## Глава 13

# ЦИФРОВЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

### 13.1. Включение ЭВМ в САУ

В современных САУ для реализации сложных алгоритмов управления применяют как аналоговые, так и цифровые ЭВМ. Аналоговые вычислительные устройства используют, например, для сложения и вычитания воздействий в контурах управления, вычисления производных и интегралов, построения перестраиваемых моделей ОУ в адаптивных системах, т. е. там, где реализуются основные достоинства аналоговой техники: большое быстродействие, возможность работы в реальном масштабе времени и непосредственного сопряжения с измерительными и исполнительными устройствами, относительная простота, высокая экономическая эффективность. Но недостаточные точность и помехоустойчивость аналоговых устройств, неудобство и ограниченные возможности программирования, а также все возрастающая сложность подлежащих реализации алгоритмов обуславливают применение цифровых ЭВМ.

При использовании цифровой вычислительной техники в САУ необходимо преобразовать аналоговые сигналы в цифровые при вводе их в цифровую вычислительную машину (ЦВМ) и цифровые сигналы в аналоговые при их выводе. Для этого используют соответственно аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи (рис. 13.1).

Аналого-цифровое преобразование осуществляют посредством квантования непрерывного сигнала по времени и уровню (рис. 13.2).



Рис. 13.1. Упрощенная структурная схема цифровой САУ:

ИУ — исполнительное устройство; ОУ — операционный усилитель;  $U$  — управляющее воздействие;  $F$  — возмущающее воздействие

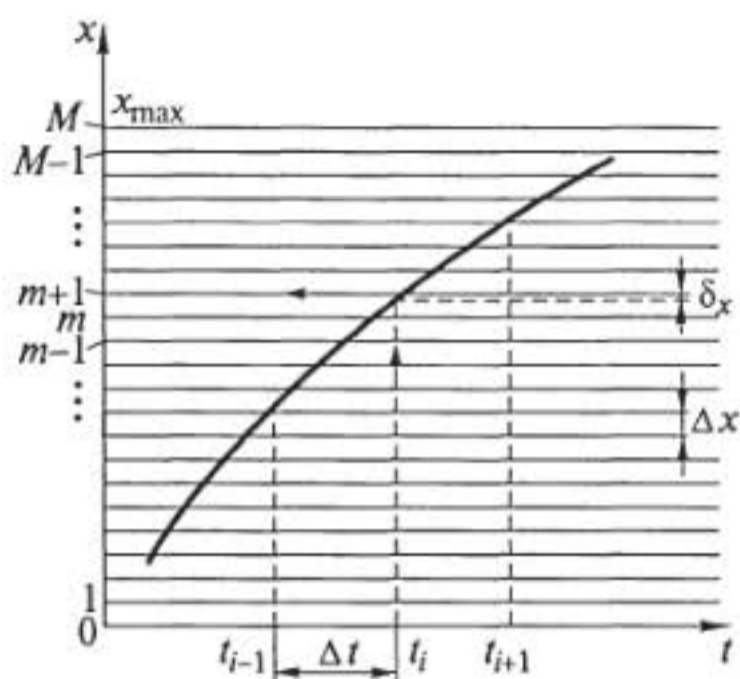


Рис. 13.2. Квантование непрерывного сигнала по времени и уровню

сигналов САУ становится импульсной, т.е. с ее помощью можно осуществлять многоточечное управление, при котором одно управляющее устройство используется для управления многими объектами (или различными параметрами одного объекта) путем последовательного переключения.

*Квантование по уровню* заключается в том, что весь диапазон возможных значений непрерывного сигнала  $x_{\max}$  разбивается на  $M$  уровней. При этом в качестве значения сигнала в момент времени  $t_i$  берется не истинное его значение, а номер ближайшего уровня  $m$  в виде цифрового кода. Как видно из рис. 13.2, возникающая при этом ошибка квантования по уровню  $\delta_x$  не превышает половины шага квантования  $\Delta x$ . Следовательно, увеличивая число уровней квантования  $M$  и соответственно уменьшая  $\Delta x$ , ошибку  $\delta_x$  можно сделать сколь угодно малой.

Квантование по времени приводит к необходимости применения при анализе управляющих систем дискретного преобразования Лапласа, используемого для импульсных систем. Квантование по уровню является существенно нелинейной операцией, приводящей к необходимости рассмотрения цифровых систем в качестве нелинейных, поэтому с позиций теории регулирования цифровые САУ являются нелинейными импульсными системами. Однако в предельном случае, т.е. при  $f_0 \gg f_{\max}$  и  $\Delta x \ll x_{\max}$ , их можно рассматривать как линейные непрерывные системы.

В САУ используют как специализированные цифровые вычислительные устройства, так и серийные ЦВМ. Специализированные вычислительные устройства управления, иначе называемые *цифровыми регуляторами*, разрабатываются специально для конкретных САУ, т.е. использование их рационально в тех случаях, когда программы управления постоянны и перепрограммирования не требуется. В настоящее время для этих целей все шире применяют

*Квантование по времени* производят на основании теоремы Котельникова. Согласно этой теореме непрерывный сигнал, спектр которого ограничен частотой  $f_{\min}$ , можно представить в виде его отдельных значений  $x(t_i)$ , взятых через промежуток времени  $\Delta t \leq 1/(2f_{\max})$ . Соответственно частота дискретного сигнала  $f_0 = k_3 2f_{\max}$ , где коэффициент запаса  $k_3 = 2 \dots 10$  (выбирается в зависимости от требуемой точности и уровня помех).

В результате использования квантованных по времени сигналов

встроенные микропроцессоры, сочетающие в себе большие алгоритмические возможности с высокой экономической эффективностью (например, при построении систем числового программного управления станками и промышленными роботами-манипуляторами).

Для многоточечного управления сложными ОУ используют серийно выпускаемые управляющие микро- и мини-ЭВМ (УВМ).

Основными особенностями малых ЭВМ, предназначенных для применения в САУ, являются:

- упрощенная система команд;

- ограниченный объем оперативной памяти (примерно 64 Кбайт);

- сокращенная длина машинных слов (обычно 2 байта);

- упрощенный интерфейс;

- наличие дополнительных устройств для автоматического схемного контроля работы всех блоков и резервирование особо важных блоков в целях повышения надежности работы ЭВМ.

В настоящее время в САУ вместо отдельных ЭВМ используют управляющие вычислительные комплексы (УВК), представляющие собой унифицированную систему технических и программных средств эксплуатационного обеспечения и стандартов. УВК используются в автоматизированных системах управления технологическими процессами (АСУ ТП), при автоматизации научных и технических экспериментов, в испытательных и измерительных САУ.

Набор технических средств УВК включает в себя процессорные устройства различной производительности, устройства ввода-вывода, устройства связи с объектами (УСО), устройства передачи данных (УПД), мультисистемные средства и другие устройства, позволяющие компоновать самые разнообразные САУ.

Области применения САУ все время расширяются, и сложность ОУ непрерывно возрастает, например Единая автоматизированная система связи (ЕАСС), автоматизированные системы управления предприятиями и целыми отраслями промышленности и т.д. Во всех перечисленных САУ необходимо оперативно обрабатывать столь большие объемы информации, что в качестве центрального вычислительного устройства в них используются универсальные высокопроизводительные ЭВМ.

В последние годы появились задачи управления, для реализации которых недостаточно возможностей ни аналоговых (малая точность и алгоритмические возможности), ни цифровых (мало быстродействие) ЭВМ. К таким задачам относятся:

- управление движущимися объектами, когда траектория формируется в процессе движения;

- моделирование и идентификация сложных объектов (включая биологические) в реальном масштабе времени;

- создание комплексных тренажеров (например, для подготовки летчиков и космонавтов).

Для решения подобных задач используют гибридные (аналого-цифровые) вычислительные системы, сочетающие в себе достоинства аналоговых и цифровых ЭВМ.

### 13.2. Логические устройства автоматики

Управление многими технологическими процессами (ТП) предполагает подачу на исполнительный механизм (ИМ) команд типа открыть-закрыть, включить-отключить, которые могут передаваться сигналами, имеющими только два уровня значений. Независимо от физической сути сигнала эти уровни значений условно обозначают цифрами 0 и 1. Переменные, принимающие только два уровня значений, и соответствующие им сигналы называются *двоичными*.

Необходимость формирования команд, передаваемых двоичными сигналами, возникает при изменении последовательности выполнения технологических операций, остановке агрегатов в случае обнаружения нарушений их работоспособности вследствие поломки или отсутствия сырья, возникновении аварийной ситуации, необходимости защиты от неправильного или несанкционированного включения технологического оборудования и т. д.

Кроме того, аналогичные по форме командные сигналы должны формироваться (оператором или соответствующими датчиками) в случае обнаружения нарушения технологического процесса, например сигналы, запрещающие включение оборудования и оповещающие об этом обслуживающий персонал.

При управлении ТП необходимо формирование последовательности управляющих команд для соответствующих ИМ на основе логического анализа ситуации, поступающей от соответствующих датчиков и оператора. Такие команды формируются логическим управляющим устройством с использованием ограниченного числа типовых элементарных операций над сигналами.

Математическая основа синтеза логических устройств — алгебра логики, называемая булевой по имени ее создателя английского математика XIX в. Дж. Буля.

Булева алгебра оперирует переменными  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , принимающими только два значения: 0 и 1, т. е. двоичными переменными. Функция двоичных переменных, называемая логической, также может принимать только два значения.

Логическую функцию можно выразить словесно, аналитически  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  и в форме таблицы возможных значений двоичных переменных, т. е. таблицы истинности. Логическую функцию любой сложности можно представить в виде следующих элементарных функций: дизъюнкции — логического сложения, конъюнкции — логического умножения, инверсии — логического отрицания и др.



Инверсия — это логическая функция  $y$  одной двоичной переменной  $x$ . Если  $x = 0$ , то  $y = 1$ , а если  $x = 1$ , то  $y = 0$ .

Аналитическая запись инверсии

$$y = \bar{x}$$

читается как  $y$  не  $x$ , поэтому ее выполнение часто называют операцией НЕ, или операцией отрицания (табл. 13.1).

Дизъюнкция — это логическая функция  $y$ , как минимум двух двоичных переменных  $x_1, x_2$ . Если обе переменные равны нулю, то функция также равна нулю. Если же хотя бы одна из переменных равна единице, то и функция равна единице. Выполнение этой функции называют операцией ИЛИ (табл. 13.2).

Аналитическая запись дизъюнкции

$$y = x_1 + x_2.$$

По форме записи ее называют функцией логического суммирования.

Конъюнкция — это логическая функция  $y$ , как минимум двух двоичных переменных  $x_1, x_2$ . Функция равна единице, если обе переменные равны единице, и равна нулю, если хотя бы одна из переменных равна нулю. Выполнение конъюнкции называют операцией И (табл. 13.3).

Аналитическая запись конъюнкции:

$$y = x_1 x_2.$$

По форме записи ее называют функцией логического умножения.

### Релейно-контактные схемы

Основными элементами релейно-контактных схем являются электромагнитные реле с замыкающими контактами. В качестве логических переменных в схемах используют изменения состоя-

Таблица 13.1

Таблица истинности операции НЕ

$x$	$y$
0	1
1	0

Таблица 13.2

Таблица истинности операции ИЛИ

$x_1$	$x_2$	$y$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Таблица 13.3

Таблица истинности операции И

$x_1$	$x_2$	$y$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

ний контактов релейных элементов. При этом логические переменные обозначают строчными буквами (например,  $y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, x_2, \dots, x_n$ ), а устройства — прописными, причем устройства, формирующие выходные сигналы, обозначают  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , а устройства, предназначенные для передачи входных и промежуточных сигналов, —  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Постоянно замкнутым контактам в электрической цепи соответствует цифра 1, а постоянно разомкнутым — 0.

Операция И реализуется группой последовательно соединенных контактов управляющих реле  $X_1, X_2, \dots, X_n$  в цепи обмотки реле  $Y$ , а операция ИЛИ — группой параллельно соединенных контактов.

Допустим, что необходимо получить сигнал на выходе логического устройства только в случае, если на его вход будут одновременно поданы два входных сигнала. Эта описанная словесно ситуация соответствует логической операции И с двумя переменными. Для ее технической реализации на релейно-контактных элементах необходимо обеспечить срабатывание электромагнитного реле  $Y$ , для чего сигналы (напряжения) подаются на обмотки двух реле  $X_1, X_2$ , соответствующие контакты  $x_1, x_2$  которых включены последовательно с обмоткой реле  $Y$ . При замыкании обоих контактов напряжение подается на обмотку реле  $Y$ . Выходной сигнал  $y$  появляется при замыкании контакта  $y$ .

Релейный эквивалент логической операции И см. в табл. 13.4.

### **Изображение основных логических элементов на схемах**

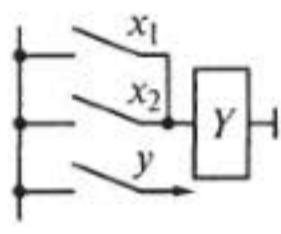
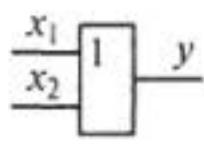
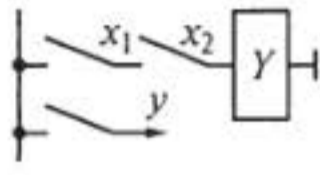
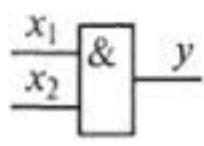
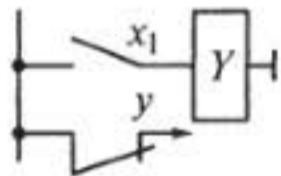
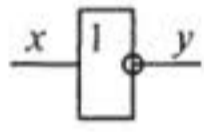
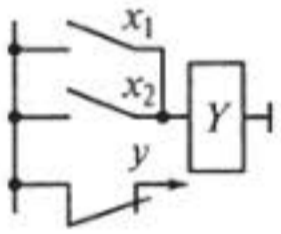
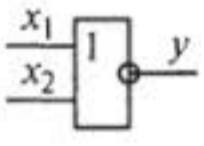
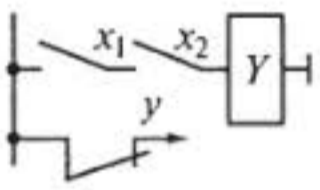
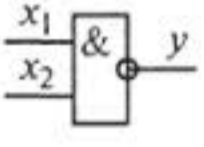
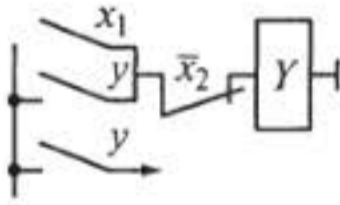
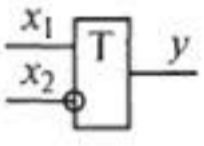
Первые устройства, для описания действий которых использовались логические функции, выполнялись на релейно-контактных элементах. Затем появились бесконтактные устройства, предназначенные только для логических преобразований сигналов и представляющие собой конструктивно оформленные изделия.

Устройства автоматики, действия которых описываются элементарными логическими функциями, называют обычно в соответствии с реализуемыми ими логическими операциями элементами НЕ, И, ИЛИ, И—НЕ, ИЛИ—НЕ. Их обозначения на схемах показаны в табл. 13.4.

### **Минимизация логических функций**

Имея необходимые элементы, по логической функции можно синтезировать логическое устройство любой сложности. Однако схема такого устройства может оказаться неоправданно сложной, требующей использования большого числа логических элементов, что соответственно будет влиять на его стоимость и надежность. Во многих случаях можно упростить логическую функцию так,

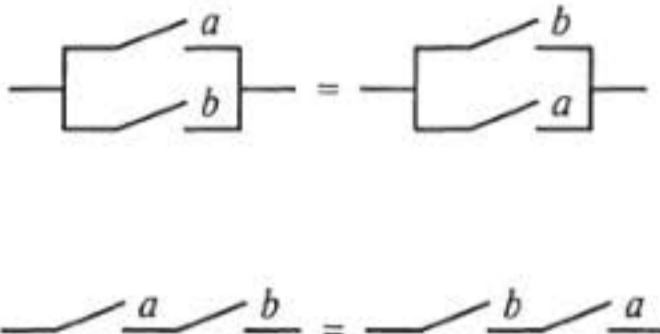
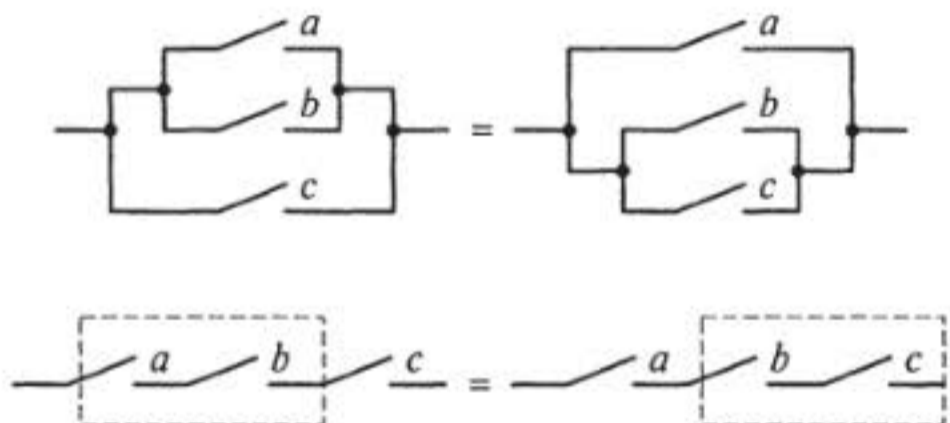
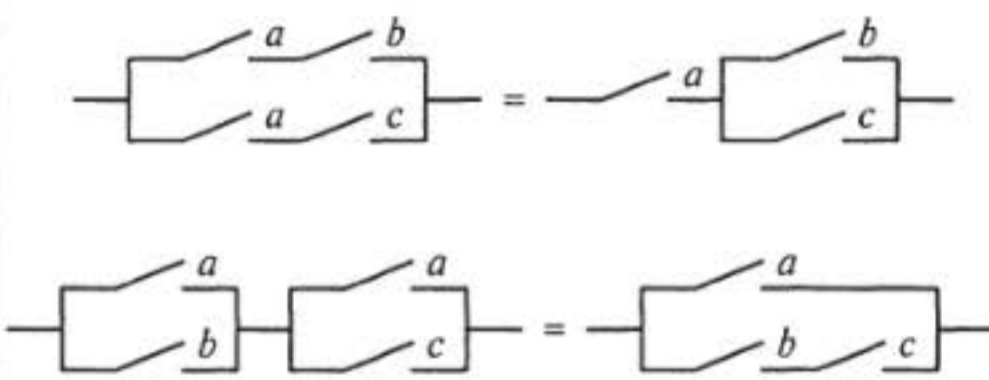
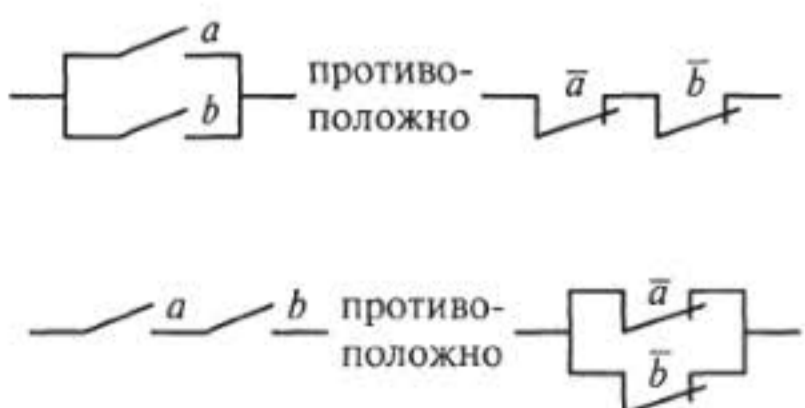
Изображение основных логических элементов на схемах

Наименование логической операции	Обозначение элемента	
	релейного	логического
ИЛИ		
И		
НЕ		
ИЛИ-НЕ		
И-НЕ		
ПАМЯТЬ		

чтобы соответствующая ей схема устройства также существенно упростилась, выполняя при этом поставленную задачу.

Методы такого упрощения называются методами минимизации логических функций. Основными из них являются метод непосредственного упрощения, применяемый при числе переменных, не превышающем трех, а также метод Квайна и карты Вейча, используемые при числе переменных не более пяти. Все эти методы подробно рассмотрены в специализированной литературе.

Законы алгебры логики

Закон	Релейный эквивалент
<p><i>Переместительный:</i> при сложении <math>a + b = b + a</math></p> <p>при умножении <math>ab = ba</math></p>	
<p><i>Сочетательный:</i> при сложении <math>(a + b) + c = a + (b + c)</math></p> <p>при умножении <math>(ab)c = a(bc)</math></p>	
<p><i>Распределительный:</i> при сложении <math>ab + ac = a(b + c)</math></p> <p>при умножении <math>(a + b)(a + c) = a + bc</math></p>	
<p><i>Инверсии:</i> при сложении <math>\overline{a + b} = \overline{a} \overline{b}</math></p> <p>при умножении <math>\overline{ab} = \overline{a} + \overline{b}</math></p>	

Минимизация основана на применении законов алгебры логики, которые приведены в табл. 13.5 для минимального числа переменных. Эквивалентность левой и правой частей уравнений обозначается в них знаком равенства. Рядом изображены их релейные эквиваленты.

Инверсия произвольной комбинации двоичных переменных, соединенных знаками «плюс» или «умножение», эквивалентна замене в этой комбинации значений переменных их инверсиями при одновременном изменении знака «плюс» на знак «умножение», и наоборот. Например,  $\overline{x_1 x_2 + x_3 x_4} = (\bar{x}_1 + \bar{x}_2)(\bar{x}_3 + \bar{x}_4)$ .

Таким образом, закон инверсии позволяет заменить операцию ИЛИ операцией И, а при необходимости и наоборот. Это очень важно, поскольку при широком применении интегральных логических элементов в построении логических устройств наиболее часто используют элементы И—НЕ, ИЛИ—НЕ.

Преобразование логических функций с применением распределительного закона является основным методом упрощений, так как вынесение общего множителя за скобки сокращает общее число переменных в выражении, а следовательно, позволяет сократить число элементов в схемах логических устройств.

Преобразование функций в целях упрощения называют минимизацией логических функций.

Выполняя минимизацию, используют также следствия законов алгебры логики, основными из которых являются:

$$x + 0 = x; \quad x \cdot 0 = 0; \quad \bar{x} + x = 1;$$

$$x + 1 = 1; \quad x \cdot 1 = x; \quad \bar{x}x = 0;$$

$$x + x = x; \quad x \cdot x = x; \quad \bar{\bar{x}} = x;$$

$$\bar{x}_1 + x_1 x_2 = \bar{x}_1 + x_2; \quad x_1 + \bar{x}_1 x_2 = x_1 + x_2; \quad x_1 + \overline{x_1 x_2} = x_1 + \bar{x}_1;$$

$$\bar{x}_1 + x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 + \bar{x}_2.$$

Процесс упрощения логических функций в целях их минимизации при прямом использовании законов и следствий алгебры логики может быть пояснен следующим примером.

**Пример.** Требуется минимизировать логическую функцию

$$y = (x_1 + x_2 + \bar{x}_3)(x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_3).$$

*Решение:*

$$y = (x_1 + x_2 + \bar{x}_3)(x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_3) = x_1 x_1 \bar{x}_2 + x_1 \bar{x}_1 x_3 + x_2 x_1 \bar{x}_2 + x_2 \bar{x}_1 x_3 + \bar{x}_3 x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_3 \bar{x}_1 x_3 = x_1 \bar{x}_2 (1 + \bar{x}_3) + x_2 \bar{x}_1 x_3 = x_1 \bar{x}_2 + x_2 \bar{x}_1 x_3.$$

Наборы логических элементов, позволяющие реализовать логические функции любой сложности, называют *базисами*.

Имея только логические элементы НЕ, И, ИЛИ, можно реализовать логические алгоритмы любой сложности. Именно в этом базисе ранее изготавливали полупроводниковые логические устройства.

Базис для построения логических устройств может состоять из одного вида логических элементов, если в качестве базового выбрать, например, элемент И—НЕ или элемент ИЛИ—НЕ.

С появлением интегральных технологий производства электронных компонентов стали изготавливать логические устройства в базисе одного из этих типов элементов. Для реализации алгоритма одинаковой сложности в базисах И—НЕ, ИЛИ—НЕ формально требуется большее число элементов, чем в базисах НЕ, И, ИЛИ. Но для интегральных электронных схем, где десятки тысяч элементов можно разместить на одном кристалле, это несущественно. Например, чтобы реализовать в базисе И—НЕ логическую операцию ИЛИ, требуется три элемента.

По типам интегральных схем различают элементы резистивно-транзисторной логики (РТЛ), диодно-транзисторной логики (ДТЛ), транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ), эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ), логики с инжекционным питанием (И<sup>2</sup>Л), на МОП-транзисторах, в том числе с дополняющими типами проводимости (КМОП) и др.

### **Бесконтактные логические элементы**

Развитие электроники связано с появлением и быстрым совершенствованием интегральной элементной базы, используемой в том числе и при разработке управляющих устройств. Устройства, выполненные на интегральной элементной базе, обладают малыми размерами, массой и высокой надежностью.

В развитии технологии цифровых интегральных схем условно можно выделить три этапа:

1-й этап — разработка базовых серий схем, выполняющих простые логические функции (И—НЕ, ИЛИ—НЕ, НЕ и др.) и имеющих от 10 до 50 элементов в одном корпусе;

2-й этап — создание более сложных функционально законченных устройств (счетчиков, регистров, дешифраторов, полусумматоров) с числом элементов в корпусе от 50 до 500;

3-й этап — разработка сложных функциональных устройств с уровнем интеграции от 500 до 1000 элементов на одном кристалле.

Дальнейшее развитие интегральных схем продолжается в направлении роста степени интеграции, быстродействия, помехоустойчивости и снижения потребляемой мощности.

Условные обозначения интегральных схем отражают их принадлежность к классам, группам и сериям. В серию объединяют схемы по технологическому и конструктивному признакам. Она представляет собой набор схем, необходимых для построения устройств.

Условное обозначение интегральных схем включает в себя следующие элементы:

цифру, соответствующую их группе (1,5,7 — полупроводниковые; 2, 4, 6, 8 — гибридные; 3 — пленочные, керамические);

три цифры (от 0 до 999) порядкового номера разработки серии микросхемы;

две буквы, указывающие подгруппу и вид микросхемы в соответствии с ее функциональным назначением;

условный номер разработки микросхемы, соответствующий ее функциональному признаку в данной серии.

Условное обозначение интегральных микросхем, используемых в широко применяемых устройствах, начинается с буквы К. Следующие два элемента обозначения соответствуют серии микросхемы. Например, К155ЛА1 — это полупроводниковая микросхема широкого применения с порядковым номером разработки 55, функциональным назначением ЛА и условным номером разработки по функциональному признаку 1.

Классификация микросхем по функциональному признаку приведена в специальных справочниках. Так, ЛМ означает логический элемент И; ЛЛ — ИЛИ; ЛН — НЕ; ЛА — И — НЕ; ЛЕ — ИЛИ — НЕ.

Ранее в системах автоматики и телемеханики применяли логические элементы серии «Логика-Т». Однако по надежности, нагрузочной способности, помехозащищенности, функциональным возможностям и некоторым другим показателям они не соответствуют современным требованиям.

В целях улучшения показателей логических элементов разработана и внедрена в производство серия элементов «Логика-И» на базе интегральных микросхем типа К511 с повышенными помехозащищенностью и быстродействием.

Для реализации различных алгоритмов управления в составе серии «Логика-И» применены следующие элементы: логические И-101 ... И-112; И-122, И-123; цифровые И-113 ... И-121; функциональные И-201 ... И-209; времени И-301 ... И-302; усилительные И-401 ... И-406. Напряжение питания этой серии 15 В, потребляемая мощность 0,1 ... 1 Вт. Напряжение сигнала, соответствующего логическому нулю, на входе до 6 В, на выходе до 1,5 В. Напряжение сигнала, соответствующего логической единице, на входе более 8 В, на выходе более 12 В.

В серии «Логика-И» логическая функция ИЛИ может быть реализована с помощью элемента И-105, который имеет две схемы ИЛИ на четыре входа (4ИЛИ); функция И — с помощью элемента И-102, имеющего две схемы 4И; функция НЕ — с помощью элемента И-107, имеющего две схемы НЕ. Недействующие выходы схем элементов подключаются к шине питания 15 В или объединяются с рабочими выходами. Входы неиспользованных схем элементов подключаются к нулевой шине.

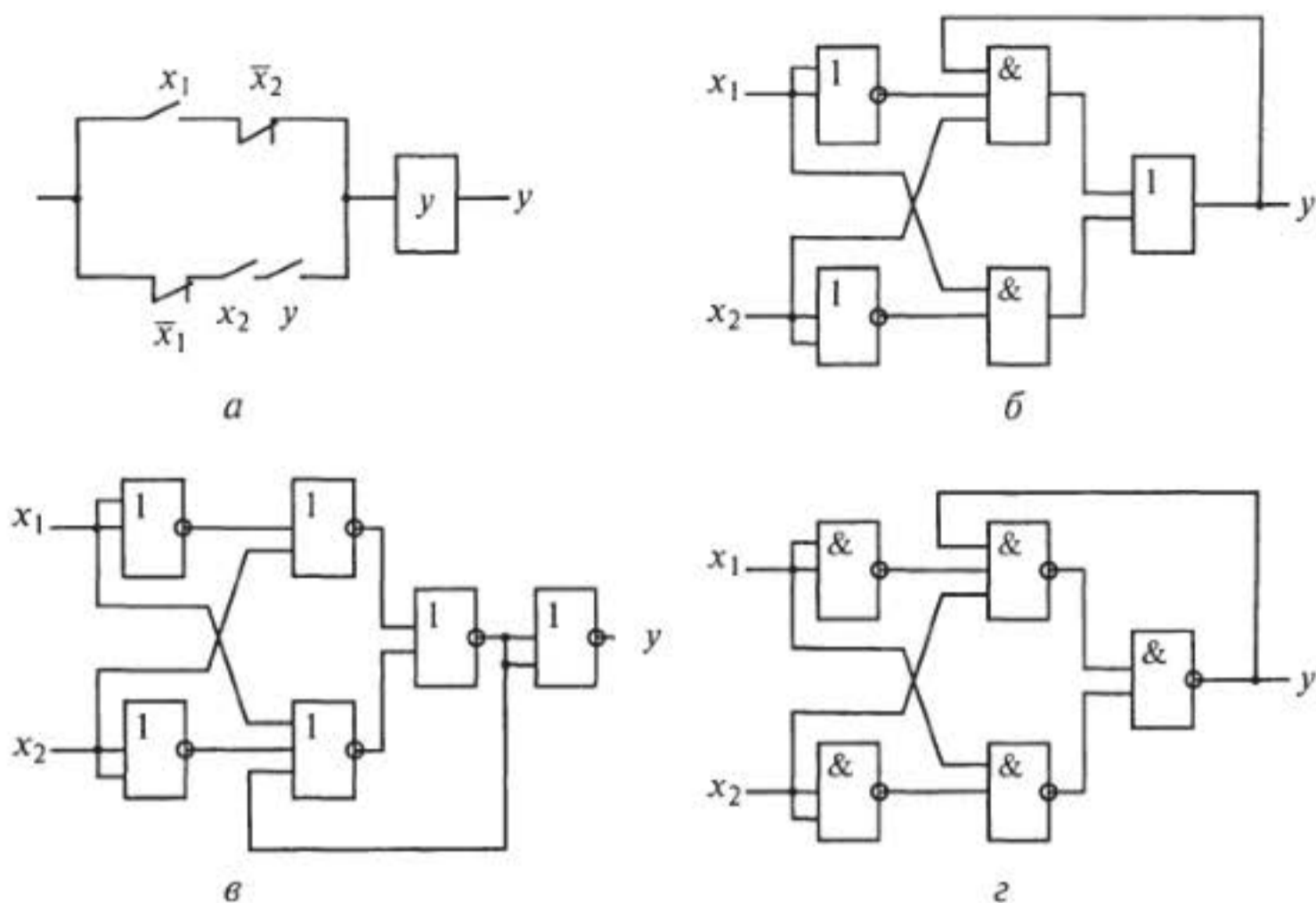


Рис. 13.3. Реализация структурной формулы логического элемента: *a* — на релейных элементах; *б* — на элементах ИЛИ, И, НЕ; *в* — на элементах ИЛИ—НЕ; *г* — на элементах И—НЕ

Для реализации функции ИЛИ—НЕ используется элемент И—108, имеющий четыре схемы на два входа ИЛИ—НЕ.

Для перехода из базисов И, ИЛИ, НЕ в базис ИЛИ—НЕ или в базис И—НЕ выполняется преобразование логической формулы с использованием двойного отрицания.

**Пример.** Преобразование логической формулы для перехода из базисов И, ИЛИ, НЕ соответственно в базис ИЛИ—НЕ и базис И—НЕ:

$$y = x_1\bar{x}_2 + \bar{x}_1x_2y = \overline{\overline{\overline{\overline{x_1\bar{x}_2 + \bar{x}_1x_2y}}}};$$

$$y = x_1\bar{x}_2 + \bar{x}_1x_2y = \overline{\overline{x_1\bar{x}_2\bar{x}_1x_2y}}.$$

Схемы, построенные по этим формулам, показаны на рис. 13.3.

### Синтез логических устройств

Различают комбинационные и последовательные логические устройства.

В комбинационных логических устройствах значения выходных сигналов зависят только от комбинации входных сигналов в данный момент времени.



В *последовательных* логических устройствах выходные сигналы зависят от значений входных сигналов не только в данный, но и в предыдущие моменты времени. В состав этих устройств обязательно входят элементы памяти — триггеры. Различают несколько видов триггеров в зависимости от того, какую элементарную функцию памяти они реализуют.

При разработке логического устройства сначала формулируют словесное описание алгоритма его действия. Затем составляют удовлетворяющую этому описанию логическую функцию (выполняют абстрактный синтез) и далее разрабатывают структурную логическую схему устройства (производят структурный синтез).

В процессе абстрактного синтеза осуществляется переход от словесного описания технологического процесса (его нормального хода и аварийных ситуаций) к составлению алгоритма функционирования в виде таблицы, циклограммы, графика и т. п. Для составления логического алгоритма управления необходимо иметь полную информацию о технологическом процессе, каждой технологической операции, применяемом оборудовании. На этой стадии уточняют последовательность операций и необходимые временные задержки для всех режимов работы объекта управления, определяют параметры, подлежащие контролю и учету в ходе ТП; формулируют требования со стороны управляемого объекта к логическому устройству. Эти требования представляют в виде значений двоичных сигналов, которые должны подаваться на исполнительные устройства системы управления в зависимости от состояния управляемого объекта.

*Циклограмма* представляет собой ряд горизонтальных строк, число которых равно числу входов и выходов логического устройства. Включенное состояние элемента обозначают на строке штриховкой. Вертикальными линиями со стрелками на циклограммах обозначают передачу управления, т. е. причинно-следственные связи между командными, оповестительными устройствами и исполнительными механизмами.

В процессе структурного синтеза производится переход от логической функции, описывающей алгоритм функционирования, к структурной схеме логического устройства.

Однако прежде чем приступить к разработке схемы, необходимо попытаться упростить исходную логическую функцию до максимально простого вида. Для упрощения логических функций комбинационных устройств используют булеву алгебру, а для анализа логических функций, описывающих действие последовательных логических устройств, — теорию конечных автоматов.

На основе структурной схемы логического устройства разрабатывают его принципиальную схему с использованием конкретной элементной базы, например в базисе ИЛИ—НЕ или базисе И—НЕ.

Завершающий этап создания схемы логического устройства — это разработка и согласование его узлов связи с оператором и управляемым объектом, выполнение защиты от помех и т. п.

**Пример.** Резервуар, из которого непрерывно вытекает вода, наполняется автоматически по трубопроводу, на котором установлен электромагнитный вентиль. Требуется, чтобы вентиль открывался, когда уровень воды становится ниже местоположения датчика нижнего уровня, и закрывался, когда уровень достигает верхнего уровня, контролируемого другим датчиком.

Сигнал от первого датчика обозначим  $x_1$ , сигнал от второго датчика —  $x_2$ , а сигнал к вентилю от логического устройства —  $y$ .

Пусть  $x_1 = 1$  при уровне воды  $h > h_n$  и  $x_1 = 0$  при  $h \leq h_n$ ;  $x_2 = 1$  при  $h > h_n$  и  $x_2 = 0$  при  $h \leq h_n$ ;  $y = 1$  соответствует открытому вентилю, а  $y = 0$  — закрытому вентилю.

Предположим, что непрерывно повторяются одинаковые циклы: *наполнение — расход*. Для синтеза логического устройства рассмотрим один такой цикл. В этом цикле выделяются четыре такта:

1-й такт — уровень воды ниже  $h_n$ , вентиль открыт, резервуар наполняется;

2-й такт — уровень выше  $h_n$ , но ниже  $h_n$ , вентиль открыт, резервуар наполняется;

3-й такт — уровень превысил  $h_n$ , вентиль закрыт, жидкость расходуется, уровень понижается;

4-й такт — уровень ниже  $h_n$ , но выше  $h_n$ , вентиль закрыт, уровень понижается.

Указанная последовательность изменения состояний входных  $x$  и выходных  $y$  переменных в системе отражена в табл. 13.5.

Здесь выходная переменная  $y$  принимает разные значения при одинаковых значениях входных переменных в тактах 2 и 4, но при разных значениях этих переменных в предшествующих тактах 1 и 3, что характерно для последовательного автомата. Для «запоминания» предыдущего такта вводится дополнительная логическая

Таблица 13.5

Исходная таблица состояний переменных

Такты	$x_1$	$x_2$	$y$
1	0	0	1
2	0	1	1
3	1	1	0
4	0	1	0

Таблица 13.6

Преобразованная таблица состояний переменных

Такт	$x_1$	$x_2$	$z$	$y$
1	0	0	0	1
—	0	0	1	1
2	0	1	1	1
3	1	1	1	0
—	1	1	0	0
4	0	1	0	0

переменная  $z = y_{t-1}$ , значение которой формируется элементом памяти и равно значению выходной переменной в предыдущем такте. В этом случае вид исходной таблицы состояний переменных изменится (табл. 13.6).

Преобразованная таблица состояний является формой представления алгоритма функционирования последовательностного логического устройства и служит основой для проведения следующих этапов синтеза устройства.

### 13.3. Системы числового программного управления

Машиностроение является основой успешного развития всех отраслей народного хозяйства. Эффективность машиностроительного производства и качество выпускаемой продукции в значительной степени определяются уровнем его автоматизации. Главное направление в автоматизации машиностроительного производства в настоящее время основывается на широком внедрении цифровых вычислительных устройств и машин.

Для управления универсальными станками и другим технологическим оборудованием применяются *системы числового программного управления (СЧПУ)*.

СЧПУ управляют перемещением рабочих органов станков и оборудования, их скоростью при формообразовании деталей, установочными перемещениями, а также последовательностью режимов обработки и вспомогательными функциями.

Управляющие программы СЧПУ содержат два вида информации, необходимой для автоматической работы станков (оборудования): геометрическую и технологическую. *Геометрическая* информация включает в себя данные о форме, размерах элементов детали и инструмента, а также об их взаимном положении в пространстве.

*Технологическая* информация представляет собой указания о последовательности ввода в работу инструментов, изменении режимов резания, смене инструментов, включении подачи охлаждающей жидкости и т. п.

Технологическая информация используется для управления и в других программных устройствах, например в системах циклового программного управления (СЦПУ). Геометрическая информация в СЦПУ реализуется переналаживаемыми упорами, размещенными непосредственно на станке (оборудовании). Преимущества СЦПУ в их большой универсальности, возможности быстрой переналадки, корректировки программы и включения в более сложные комплексные системы автоматизированного производства. СЧПУ относятся к сложным многоконтурным САУ, так как одновременно управляют несколькими независимыми или связанными парамет-

рами объекта (координатами). Соответственно в структуре СЧПУ имеется несколько контуров (каналов) управления. Так, например, в металлорежущих станках СЧПУ управляет одновременно главным движением формообразования, движением подачи и вспомогательными движениями: транспортировки, закрепления, отвода и подвода, смены инструмента и т.д.

СЧПУ классифицируются по следующим признакам: структуре и принципу (алгоритму) управления, назначению, виду привода, характеру движения привода, способу задания программы.

По структуре СЧПУ делятся на разомкнутые, замкнутые и комбинированные.

Принцип управления разомкнутых СЧПУ основан на использовании только задающего воздействия, заложенного в управляющую программу (принцип жесткого управления). В замкнутых СЧПУ помимо задающего воздействия — управляющей программы используется информация о действительных значениях управляемых параметров, т.е. принцип управления по отклонению управляемого параметра (гибкое управление).

В *комбинированных* СЧПУ управление основными параметрами (главным движением и движением подачи) осуществляется замкнутыми контурами управления, работающими по принципу отклонения, а управление вспомогательными параметрами (закреплением заготовок, подводом инструмента, сменой инструмента, включением охлаждающей жидкости и т.д.) может осуществляться разомкнутыми контурами управления.

В *адаптивных* СЧПУ существуют дополнительные датчики информации о параметрах процесса обработки: силе резания, температуре, износе инструмента и т.д. Эта информация используется в СЧПУ для корректировки технологических параметров, заданных управляющей программой, в зависимости от изменения припуска на обработку, твердости и жесткости заготовок, состояния инструмента и т.д.

В зависимости от назначения оборудования, оснащенного устройствами ЧПУ, системы управления делятся на позиционные, контурные и универсальные.

В *позиционных* системах управления программируются координаты ( $x$ ,  $y$ ) отдельных дискретных точек (рис. 13.4, *а*), определяющих положение (позицию) инструмента или заготовки. Такие системы применяются для управления сверлильными и расточными станками.

Разновидностью позиционных систем управления являются *прямоугольные* системы, управляющие перемещением вдоль отрезков (обозначенных на рис. 13.4, *б* цифрами 1...6), параллельных направляющим станка. Прямоугольные системы предназначены для последовательного управления одной из двух взаимно-перпендикулярных координат. Такие системы применяются на токарных

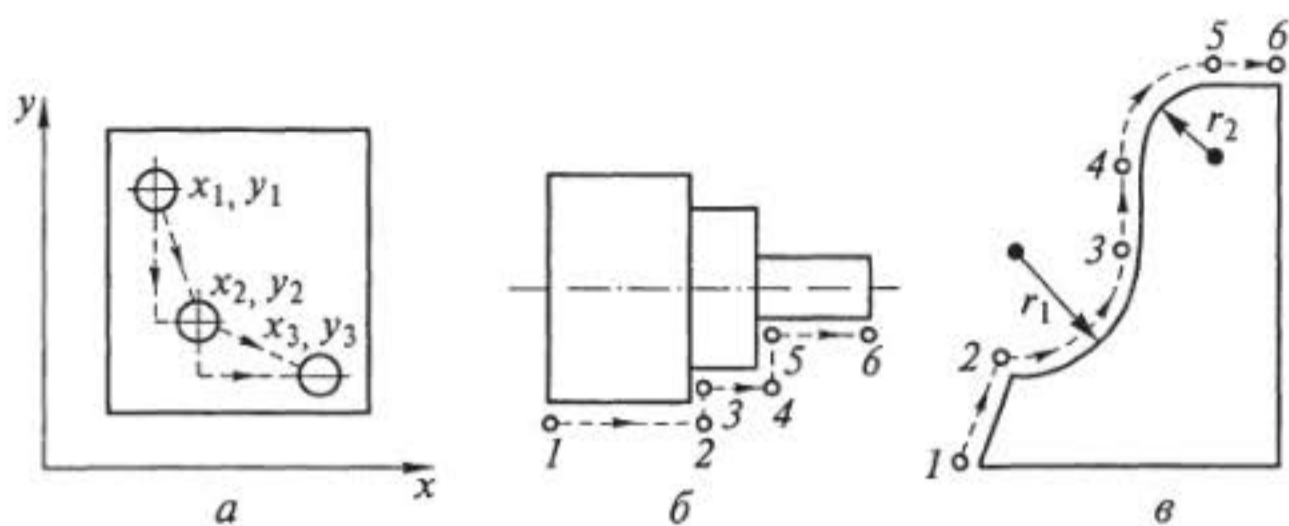


Рис. 13.4. К определению вида управления в СЧПУ:

*a* — позиционное; *b* — прямоугольное; *в* — контурное

станках для управления обработкой деталей типа ступенчатых валков, а на фрезерных — деталей с прямоугольным контуром.

В *контурных* СЧПУ осуществляется одновременное взаимосвязанное управление по нескольким координатам вдоль отрезков и участков кривых, на рис. 13.4, *в* обозначенных 1...6 и  $r_1$ ,  $r_2$ , для получения деталей со сложным профилем. Такие системы применяются для управления токарными, фрезерными, электроэрозионными станками, а также сварочными машинами.

В многооперационных станках, предназначенных для обработки одновременно несколькими инструментами сложных деталей (типа корпуса), применяются *универсальные (позиционно-контурные)* системы управления.

В зависимости от числа одновременно управляемых координат различают СЧПУ с управлением по одной, двум, трем, четырем, пяти и более координатам.

В зависимости от вида энергии, используемой в двигателях приводных устройств, различают СЧПУ с электроприводом, электрогидравлическим и электропневматическим приводами.

В СЧПУ в основном применяются различные следящие приводы, построенные по принципу замкнутых (следящих) систем автоматического управления. Реже применяются приводы разомкнутого типа с использованием только шаговых двигателей, допускающих непосредственное программное управление как значением перемещения, так и его скоростью.

В устройствах со следящим приводом могут использоваться двигатели постоянного и переменного тока, а также шаговые гидравлические и пневматические двигатели. Частота вращения двигателей в следящем приводе должна изменяться в широком диапазоне (в 1000 и более раз).

В приводах используются датчики перемещения, создающие сигнал обратной связи, который направляется в устройство ЧПУ, где сравнивается с сигналом задающего воздействия, получаемым от управляющей программы. В качестве датчиков перемещения в

аналоговых устройствах следящего привода СЧПУ используются сельсины, вращающиеся трансформаторы, индуктосины, многооборотные потенциометры. Кроме того, в аналоговых устройствах следящего привода СЧПУ применяются преобразователи перемещения в код различного типа.

В зависимости от структуры устройства ЧПУ все системы делятся на два основных вида: построенные по принципу цифровой модели и построенные по структуре ЭВМ.

В системах, где устройство ЧПУ построено по принципу *цифровой модели*, все операции выполняются соответствующими специализированными электронными блоками со строго определенными функциями, причем связи между этими блоками неизменны. Принцип построения устройства ЧПУ на основе использования блоков — агрегатов с четко выраженными функциями называется *агрегатным*. Функционирует такое устройство управления по неизменному алгоритму, при этом все блоки работают параллельно, выполняя закрепленные за ними операции по преобразованию информации.

В системах, где устройство ЧПУ (УЧПУ) построено по *структуре ЭВМ*, блоки имеют универсальный характер и связи между ними могут изменяться в соответствии с заданной программой. Операции управления в этом случае выполняются последовательно с помощью центрального арифметического устройства. В составе УЧПУ имеются запоминающие устройства: оперативное (ОЗУ) и постоянное (ПЗУ).

Функционирование ОЗУ и ПЗУ осуществляется по алгоритму переработки информации, поступающему в виде управляющей программы, т.е. для этих устройств требуется специальное математическое обеспечение. Причем математическое обеспечение может храниться в ПЗУ, если не требуется частая смена алгоритмов работы, или вводиться через устройство ввода как часть управляющей программы. Такое построение позволяет легко корректировать алгоритм работы устройства ЧПУ и совершенствовать его по мере накопления статистической информации о качестве изготовленных деталей.

Перспективным является создание устройств ЧПУ на основе использования одного или нескольких микропроцессоров, построенных на больших интегральных схемах (БИС), т.е. использование агрегатного принципа построения ЧПУ на базе микропроцессоров, запрограммированных на конкретные задачи. Можно построить устройство ЧПУ и на базе микроЭВМ, дополнив его микропроцессором или контроллерами — программируемыми логическими устройствами для переработки информации. В дальнейшем по мере совершенствования элементной базы рациональным может стать построение ЧПУ на базе мини-ЭВМ. Это расширит функциональные возможности СЧПУ и облегчит включение

их в более сложные комплексные системы автоматизированного производства: автоматические линии, участки, цеха, системы гибкого автоматизированного производства. Обобщенная функциональная схема СЧПУ токарного станка, построенная по принципу разомкнутой системы, показана на рис. 13.5. Здесь исполнительные двигатели главного движения (М1), движения подач (М2, М3), вспомогательного движения — поворота и подачи револьверной головки с инструментами (М4, М5) получают управляющие сигналы от блока управления приводами (БУП).

Устройство ввода-вывода (УВВ) воспринимает управляющую программу от центральной ЭВМ (при групповом управлении, когда СЧПУ работает в составе гибкой производственной системы) или считывает ее с перфоленты (при автономном управлении). При этом управляющая программа, промежуточные результаты вычислений, необходимые константы хранятся в запоминающем устройстве (ЗУ) и по мере надобности используются вычислительным устройством (ВУ) для выработки управляющих воздействий на БУП. Последний содержит электронные блоки управления шаговыми двигателями или усилители сигналов рассогласования (в устройствах следящего привода), тиристорные преобразователи для управления скоростью главного движения (в данной схеме — скоростью вращения шпинделя) и т. д.

Панель управления (ПУ) имеет кнопки и клавиатуру для контроля отдельных блоков или ручного управления приводом, а также для полного или частичного (при настройке) ручного ввода управляющей программы в ЗУ и обработки по ней первой детали с последующей редакцией программы (в УЧПУ с непосредственным вводом программы). Панель управления позволяет вывести

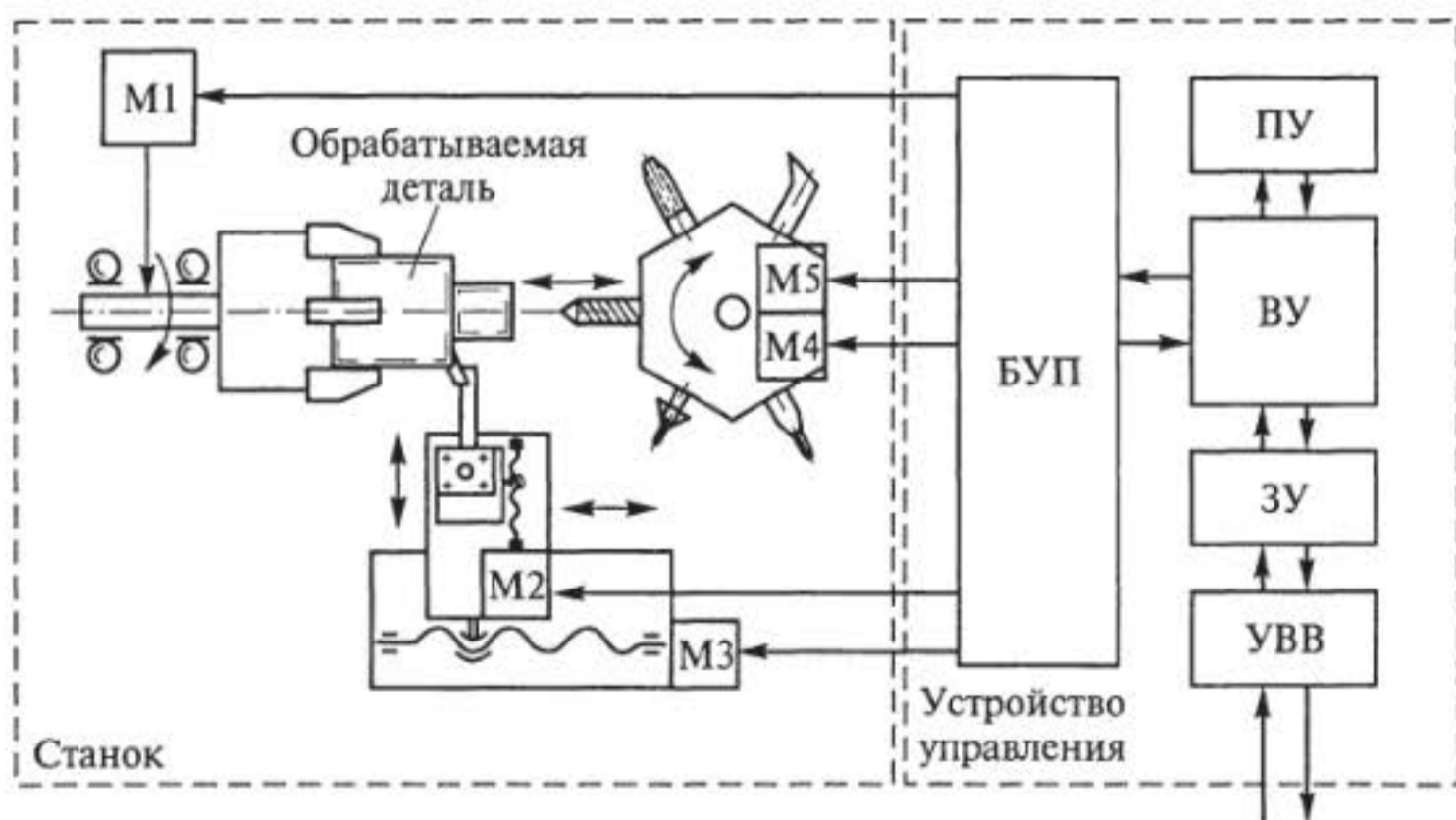


Рис. 13.5. Функциональная схема СЧПУ токарного станка

на индикацию (на дисплей) любой кадр программы или другую информацию, перерабатываемую системой, и сигнализировать о появлении сбоев в работе.

В позиционных УЧПУ, работающих по жесткому алгоритму, ВУ может отсутствовать. В контурных УЧПУ, построенных по принципу цифровой модели, в качестве ВУ используется *интерполятор*, представляющий собой специализированный блок-агрегат, который управляет скоростью обработки одновременно по двум координатам. Интерполяторы могут быть линейные, круговые, параболические.

Линейные интерполяторы используют, если контур обрабатываемой детали можно представить в виде отрезков прямых, расположенных под любыми углами к осям координат. Криволинейные участки аппроксимируются в этом случае отрезками прямых. Линейно-круговые интерполяторы применяются при обработке деталей со сложным контуром, составленным из различных дуг окружностей и отрезков прямых. Дуга окружности в таких интерполяторах задается одним кадром программы, а общий криволинейный контур аппроксимируется несколькими прямыми и дугами окружностей разного радиуса. Параболические интерполяторы применяют при обработке очень сложных деталей (лопаток гребных винтов, турбин и т. д.).

В УЧПУ, построенных по принципу структуры ЭВМ, в качестве ВУ используются микропроцессоры, а также микро- и мини-ЭВМ. УЧПУ на базе мини-ЭВМ наиболее перспективны при создании сложных комплексных систем автоматического производства, например технологических модулей, автоматических линий, участков, цехов и гибких производственных систем.

**Технологический модуль** — это автоматизированный многооперационный станок и автоматический манипулятор, объединенные общей САУ.

**Технологический комплекс** — это автоматический производственный комплекс, состоящий из группы станков с ЧПУ, автоматического манипулятора, транспортных и накопительных устройств, объединенных общей САУ, работающей от центральной ЭВМ, и обеспечивающих полную или частичную обработку определенного типа деталей.

**Автоматическая линия** — это комплекс автоматизированных рабочих машин, расположенных в последовательности выполнения технологических операций, связанных средствами транспортировки и вспомогательным оборудованием, объединенных общей САУ, работающей от центральной ЭВМ, и обеспечивающих полный цикл обработки детали или группы однотипных деталей.

**Автоматизированный участок** — это комплекс из нескольких автоматизированных станков или модулей, объединенных с помощью транспортной системы, и манипуляторов, вспо-



могательных устройств, единой системы группового управления от центральной ЭВМ, обеспечивающих комплексную обработку однотипных деталей с разной последовательностью операций.

Гибкие производственные системы (ГПС) предназначены для автоматизированного проектирования и изготовления новых изделий в условиях мелкосерийного многономенклатурного производства.

Перевод ГПС на выпуск новых изделий обеспечивается программными средствами без перестройки оборудования ручным способом. ГПС объединяет несколько комплексов, в каждом из которых для управления используется локальная ЭВМ. Для общего управления комплексом ГПС используется мощная главная ЭВМ, а вся структура управления основана на иерархическом принципе.

На рис. 13.6 показана структурная схема управления ГПС, в которую входят следующие подсистемы:

САПР конструкции — система автоматического проектирования конструкций новых изделий, состоящая из автоматических рабочих мест конструктора (АРМ-К);

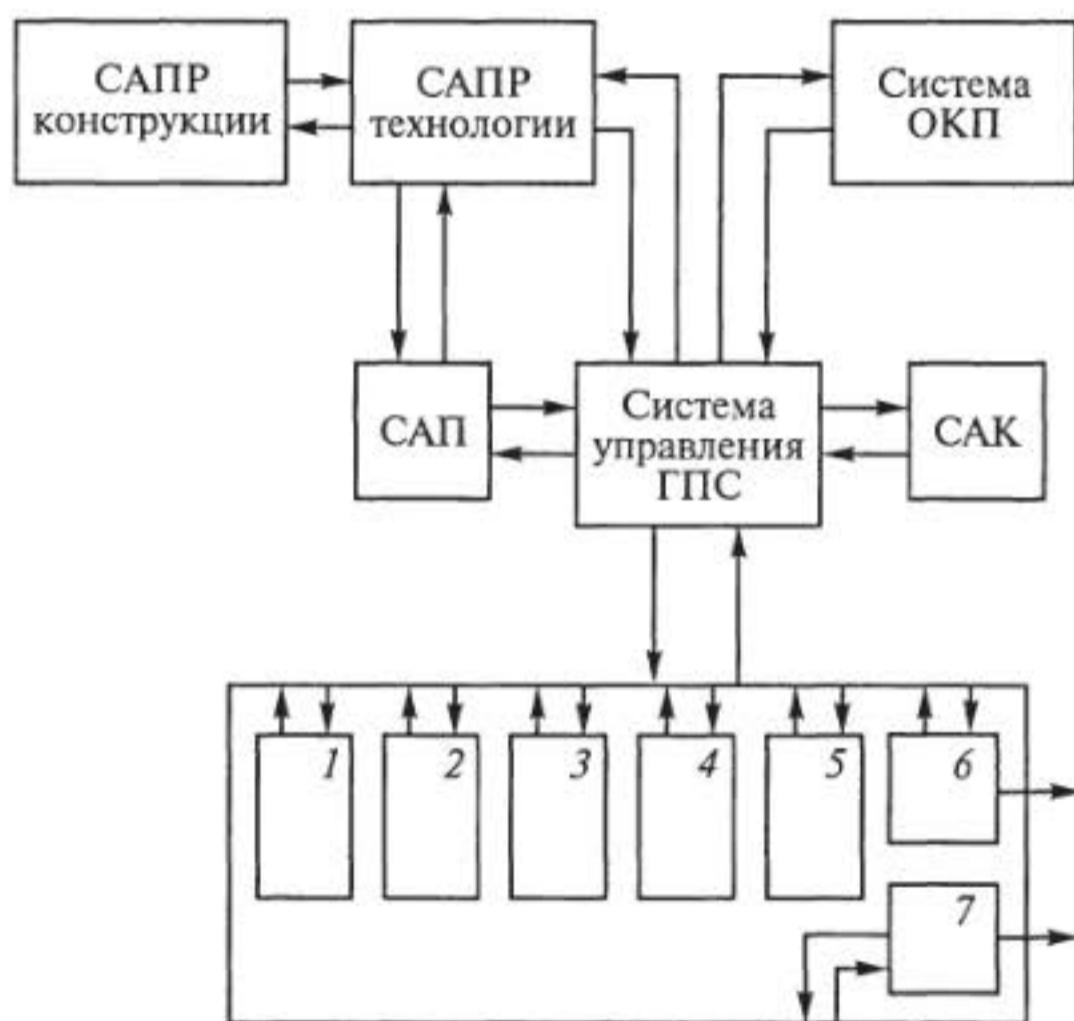


Рис. 13.6. Структурная схема ГПС:

1 — подсистема распознавания предметов труда, приспособлений, инструмента; 2 — подсистема складирования; 3 — подсистема транспортировки; 4 — подсистема манипулирования (перемещения предметов труда, приспособлений, инструмента); 5 — подсистема обработки предметов труда (станков и оборудования для основных технологических операций); 6 — подсистема контроля; 7 — подсистема удаления стружки

САПР технологии — система автоматического проектирования технологических процессов изготовления новых изделий, состоящая из автоматических рабочих мест технолога (АРМ-Т);

система ОКП — система оперативно-календарного планирования, связанная через ЭВМ с автоматической системой управления производством (АСУП);

САП — система автоматической подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ и автоматических манипуляторов;

САК — система автоматического контроля и диагностики, контролирующая работу всех систем, входящих в ГПС, а также фиксирующая и классифицирующая неисправности во всех подсистемах.

Кроме того, в систему автоматизированного производства входят подсистемы 1... 7, показанные на рис. 13.6.

Класс ЭВМ, используемых в каждой системе и подсистеме, зависит от сложности выполняемых задач. В целом управление ГПС представляет собой комплекс ЭВМ, связанный с АСУП.

#### 13.4. Промышленные роботы

*Роботом* называется автоматическая машина, выполняющая физическую работу вместо человека. Область применения роботов весьма обширна. Исследование космоса и глубин мирового океана, сельское хозяйство, транспорт и промышленное производство, строительство — везде существует настоятельная необходимость в подобных автоматах. Роботы могут заменить человека при работе в опасных для жизни и здоровья условиях, освободить его от монотонных, утомительных, неприятных работ. Наибольшее развитие в настоящее время получили промышленные роботы, являющиеся важнейшей составляющей комплексной автоматизации производственных процессов. От традиционных средств автоматизации промышленные роботы отличаются универсальностью воспроизводимых движений и возможностью быстрой их перенастройки на новые операции, а также возможностью объединения в комплексы вместе с технологическим оборудованием.

Роботы в основном применяются в машиностроении для замены рабочих, занятых обслуживанием металлорежущих станков, прессов, печей и другого технологического оборудования, а также для выполнения таких основных технологических операций, как сварка, простейшая сборка, транспортировка и т. д. Применение промышленных роботов позволяет не только комплексно автоматизировать работу отдельных станков, но и перейти к автоматизации отдельных участков, например механической обработки, штамповки, точечной сварки, путем создания *робототехнических комплексов*. Такие комплексы являются обязательной составной ча-

стью ГПС — систем высшего (достижимого для современной техники) уровня автоматизации производства.

Основная задача, выполняемая промышленными роботами, — манипуляционные действия в производственном процессе.

*Манипуляционные действия* — это перемещение и ориентирование в пространстве предметов (заготовок, готовых деталей) и орудий труда (инструментов). Исходя из основной задачи промышленного робота, его можно определить как совокупность механических рук — манипуляторов и управляющего устройства. В общем случае робот может иметь и средства передвижения.

Наиболее простые роботы, основная задача которых — выполнение определенных движений (манипуляций), заданных программой, называются *автоматическими манипуляторами*. В зависимости от сложности выполняемой работы различают автоматические роботы-манипуляторы трех видов — трех поколений.

Роботы-манипуляторы *первого поколения* работают по жесткой программе, а их взаимодействие с окружающей средой ограничено элементарными обратными связями. Роботы первого поколения могут быть осязательными, т. е. иметь сенсорные датчики (в частности, датчики осязания — тактильные, позволяющие регулировать силу сжатия захвата). Среда, в которой действуют такие роботы, должна быть определенным образом организована. Это значит, что все предметы (заготовки и готовые детали, инструмент, элементы конструкции, станков, оборудования и т. д.) должны находиться в определенных местах и иметь определенную ориентацию в пространстве. Данное требование накладывает некоторые ограничения на применение роботов-манипуляторов первого поколения.

Роботы-манипуляторы *второго поколения* обладают элементами адаптации к окружающим условиям и способны решать более сложные задачи. Это осязательные роботы, имеющие сенсорные датчики, которые позволяют им координировать движения по воспринимаемым сигналам о состоянии окружающей среды. В частности, это могут быть тактильные датчики, позволяющие менять развиваемое усилие, локационные датчики (световые, ультразвуковые, телевизионные, гамма-лучевые и т. п.), позволяющие изменять траекторию движения манипулятора при появлении препятствия, необходимости совмещения деталей, нечетко ориентированных в пространстве, и т. п.

Роботы-манипуляторы *третьего поколения* способны логически обрабатывать поступающую информацию, т. е. имеют искусственный интеллект. Эти роботы способны к обучению и адаптации, могут вести диалог с человеком-оператором, распознавать и анализировать сложные ситуации, формировать понятия и создавать модель окружающей среды, планировать поведение в виде программы действий (с учетом предыдущего опыта) и т. д.осу-

ществлять работу по такому сложному алгоритму можно только с применением ЭВМ.

Основу парка в промышленности составляют в настоящее время роботы первого поколения как наиболее простые, надежные и экономичные.

На рис. 13.7 схематично показано устройство автоматического робота-манипулятора, а на рис. 13.8 приведена функциональная схема его управления. Конструктивно такой робот состоит из двух основных частей: исполнительной, включающей в себя манипулятор, или манипуляторы (М) и устройство передвижения (УП), и управляющей, т.е. устройства управления робота (УУ).

Манипулятор робота имеет горизонтальную руку 3, которая может перемещаться как в горизонтальном (по оси  $x$ ), так и вертикальном (по оси  $z$ ) направлениях относительно стойки 2. При этом стойка может поворачиваться на угол  $\alpha$  вокруг вертикальной оси  $z$  относительно неподвижного основания 1. На конце руки закреплен механизм кисти 4, обеспечивающий дополнительно две степени свободы захвату 5: поворот вокруг продольной оси руки на угол  $\beta$  и поворот (качание) относительно перпендикулярной оси  $y$  на угол  $\gamma$ . Для фиксирования детали захват 5 может автоматически закрываться (движение по стрелке А).

Рабочий орган манипулятора — захват может перемещаться в определенном пространстве, которое образует рабочую зону манипулятора. В зависимости от выбранной системы координат (пря-

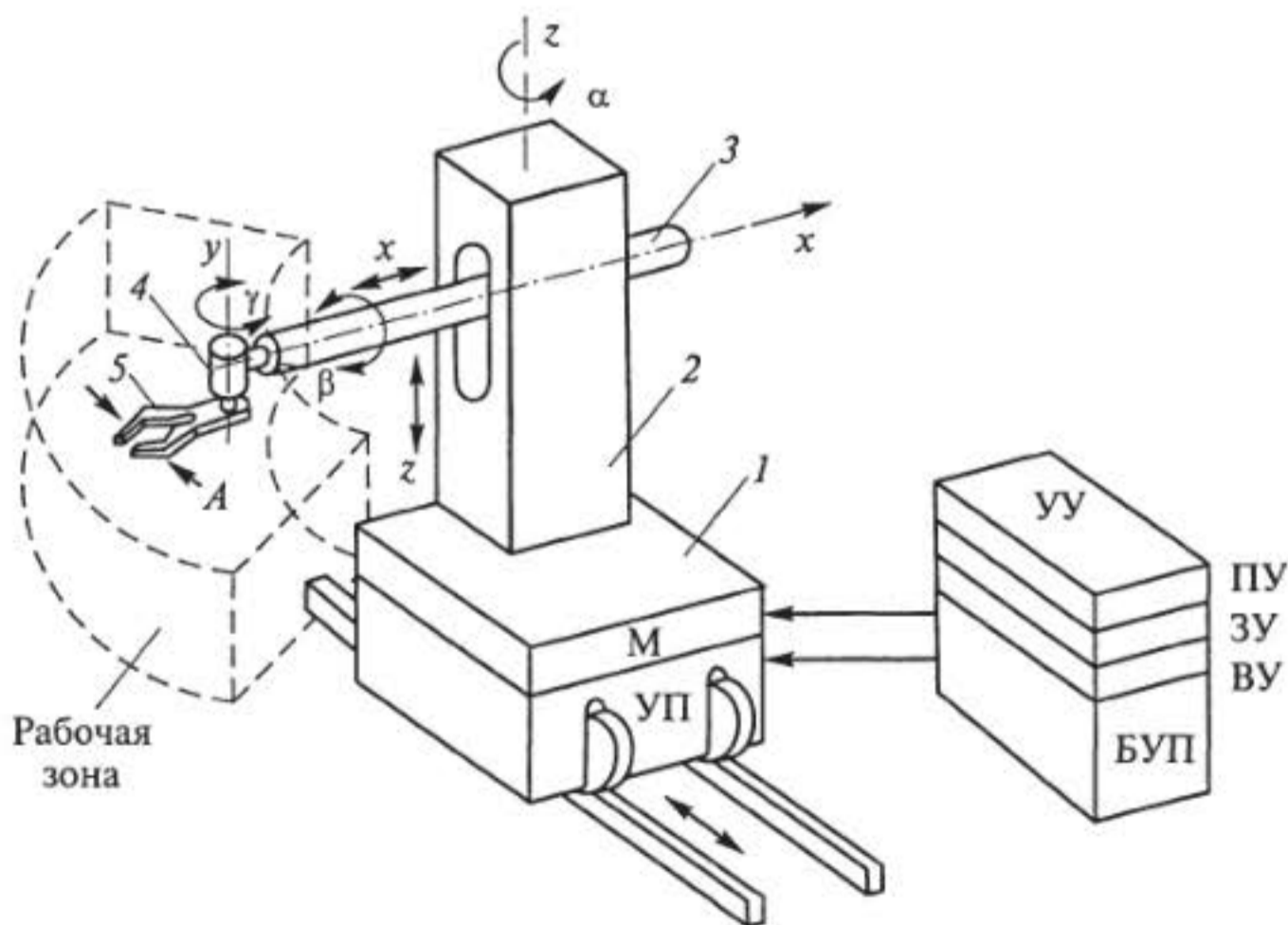


Рис. 13.7. Устройство автоматического робота-манипулятора:

1 — неподвижное основание; 2 — стойка; 3 — горизонтальная рука; 4 — механизм кисти; 5 — захват

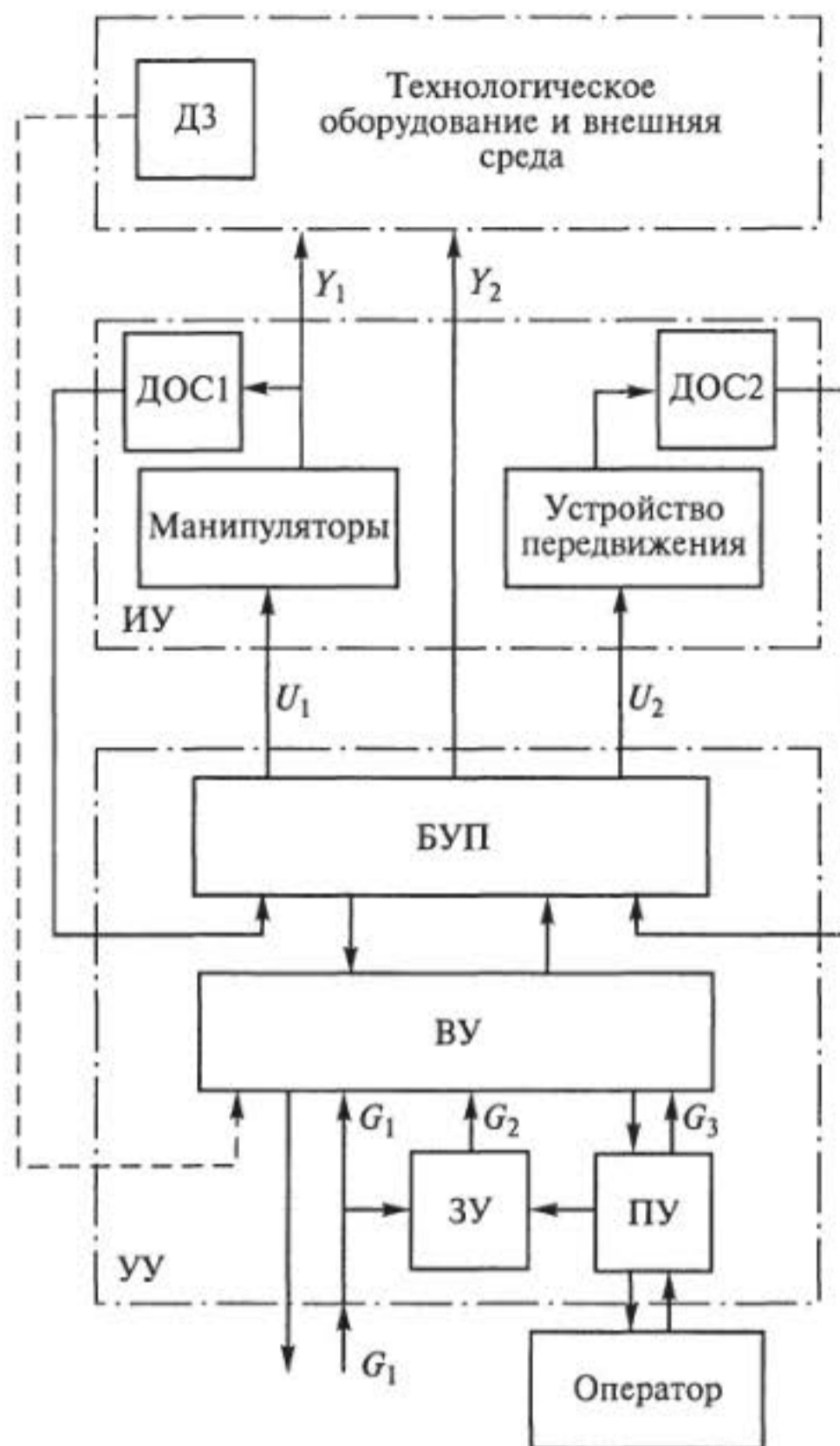


Рис. 13.8. Функциональная схема управления роботом-манипулятором

моугольная, цилиндрическая, сферическая, комбинированная) для осуществления переносного движения рабочего органа (движения собственно руки манипулятора) рабочая зона манипулятора может иметь вид параллелепипеда, цилиндра, шара и более сложных пространственных тел. Так как рука манипулятора, показанного на рис. 13.7, имеет одну вращательную и две поступательные степени свободы (подвижности): движение вдоль осей  $x$  и  $y$  и поворот вокруг оси  $z$ , его рабочая зона имеет вид цилиндра. Движение кисти — поворот вокруг оси  $x$  и качание вокруг оси  $y$  являются ориентирующими. Автоматические роботы-манипуляторы могут иметь от трех до семи степеней подвижности, а устройство их рабочего органа зависит от назначения робота.

В роботах, выполняющих погрузочно-разгрузочные операции, транспортировку, смену инструмента, используют и различные виды захватов, обеспечивающие взятие, ориентирование и удержание объекта манипулирования. В роботах, выполняющих технологические операции, рабочим органом может быть пульверизатор, сварочная головка, гайковерт или другой инструмент.

Принципы действия и конструкции захватов весьма разнообразны, так как размеры, форма и физико-химические свойства объектов манипулирования могут изменяться в широких пределах. По способу захвата и удержания объекта манипулирования хватные устройства делятся на механические, вакуумные, электромагнитные и комбинированные.

Исполнительные устройства манипулятора приводятся в действие двигателями, число которых зависит от числа степеней его подвижности. Существуют манипуляторы, имеющие один двигатель на несколько степеней подвижности, снабженный муфтами для распределения движения. Вид двигателя привода зависит от назначения манипулятора и его параметров. В настоящее время примерно в равной степени используются пневматические, гидравлические и электрические двигатели.

Подвижные роботы могут иметь различные устройства передвижения — от давно известных устройств качения до шагающих механизмов (педипуляторов), разрабатываемых в последнее время.

Устройство управления роботом-манипулятором может выполняться в виде самостоятельного (конструктивно обособленного) блока или быть встроенным в корпус его исполнительной части. Обычно в состав устройства управления (см. рис. 13.8) входят: пульт управления (ПУ), позволяющий производить ввод и контроль задания; запоминающее устройство (ЗУ), хранящее программу работы; следящий привод механизмов манипулятора и устройства передвижения; усилители; преобразователи; источники питания; управляющие элементы (реле, контакторы, золотники, струйные трубки, распределители движения, электромагнитные клапаны и т. д.).

Число датчиков обратной связи в схеме управления (ДОС1, ДОС2) определяется числом степеней подвижности манипулятора и числом координат перемещения его исполнительного устройства. Используются они в следящем приводе для контроля перемещения рабочего органа манипулятора и в целом всего его исполнительного устройства (ИУ).

В качестве датчиков обратной связи по перемещению в роботах-манипуляторах применяют потенциометры, сельсины, вращающиеся трансформаторы, индуктосины, кодирующие преобразователи и т. п.

В осязательных и адаптивных роботах могут быть сенсорные датчики для получения дополнительной информации о факти-

ческой обстановке в зоне действия их манипуляторов. В качестве сенсорных датчиков, входящих в систему очувствления, кроме тактильных и локационных в роботах-манипуляторах могут использоваться и любые другие датчики: температуры, давления, магнитного поля, цвета и т.д. Информация сенсорных датчиков вводится в вычислительное устройство (ВУ) для корректировки действия робота.

Манипулятор робота создает основное рабочее воздействие  $Y_1$  на технологическое оборудование или объект манипулирования (заготовку, деталь, инструмент). Кроме того, на технологическое оборудование могут подаваться управляющие воздействия ( $U_1, U_2$ ) и технологические команды  $Y_2$  непосредственно от блока управления процессом (БУП) — на блокировку работы оборудования во время рабочих движений манипулятора, изменение режима работы оборудования и т.д. В свою очередь, от технологического оборудования или других роботов могут поступать информационные и управляющие воздействия на данный робот (условно от датчиков ДЗ).

В робототехнических комплексах и ГПС на робот могут поступать задающие воздействия  $G_1$  от управляющих устройств более высокого ранга (уровня).

Так, от главной ЭВМ, управляющей работой комплекса или ГПС, могут поступать новые рабочие программы, а также команды, корректирующие заданную программу или координирующие действие робота-манипулятора с действиями других роботов или с процессом работы технологического оборудования.

В автономном режиме задающее воздействие  $G_2$  создается программой, хранящейся в ЗУ. В режиме наладки или обучения задающее воздействие  $G_3$  создается оператором через ПУ. При этом вычислительное устройство робота может быть различного уровня (в роботах с цикловым программным управлением ВУ вообще отсутствует). Чем универсальнее робот и сложнее задачи, решаемые с его помощью, тем выше уровень ВУ: микропроцессор, микро- или мини-ЭВМ. В робототехнических комплексах и ГПС используются ЭВМ средней и большой мощности, а также комплексы из нескольких ЭВМ.

Промышленные роботы-манипуляторы классифицируются по ряду следующих основных признаков, входящих в условное обозначение их типа:

числу манипуляторов (1М, 2М, 3М, ...);

числу степеней подвижности с учетом устройства передвижения (2; 3 и более);

типу рабочей зоны (плоская — Пл, поверхность — Пв, в форме параллелепипеда — Пр, шарообразная — Ш, комбинированная — ПрЦл, ЦлШ, ПрШ);

грузоподъемности;

типу приводов манипулятора (пневматический — Пн, гидравлический — Г, электромеханический — Э, комбинированный — ГПн, ГЭ, ЭПн);

типу системы управления (цикловая — Ц, позиционная — П, контурная — К, осязательный робот — О, с искусственным интеллектом — И);

классу точности (0; 1; 2; 3).

Например, робот-манипулятор с условным обозначением 1М4Цл-5ЭК1 имеет один манипулятор с четырьмя степенями подвижности, рабочую зону цилиндрической формы, грузоподъемность 5 кг, привод электромеханический, систему управления контурную, первый класс точности (погрешность воспроизведения траектории от 0,01 до 0,05 %). Часть информации, характеризующей робот, указывается словесно (наличие устройства передвижения, отдельный или общий привод по степеням подвижности, адаптивное или неадаптивное управление, тип исполнения — теплозащитное, взрывобезопасное, нормальное и т. п.).

### 13.5. Управляющие микроЭВМ и микроконтроллеры

#### Структура цифровых систем управления

*Интегральная схема* (микросхема) — это микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования и обработки сигналов и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов) и (или) кристаллов, которые рассматривают как единое целое.

*Цифровая интегральная микросхема* (цифровая микросхема) — интегральная схема, предназначенная для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по закону дискретной функции.

*Большая интегральная схема* (БИС) — интегральная схема, которая применяется при построении наиболее сложных средств обработки информации.

*Микропроцессор* — программно-управляемое устройство, непосредственно осуществляющее процесс обработки цифровой информации и управление им, построенное на одной или нескольких БИС.

*Регистр* — функциональный узел, предназначенный для приема, хранения и выдачи коротких последовательностей двоичных знаков, объединенных общим признаком (например, кодом команды и др.).

*Память* — функциональная часть ЭВМ, предназначенная для запоминания и (или) выдачи данных.

*Запоминающее устройство* (ЗУ) — изделие, реализующее память.



*Оперативное запоминающее устройство (ОЗУ)* — ЗУ с изменяемым в процессе выполнения программы содержимым памяти.

*Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ)* — ЗУ с неизменным содержимым памяти.

*Интерфейс* — средство стандартного сопряжения (соединения) устройств, отличающееся унификацией способов и средств физического соединения и процедур установления связи, обмена и завершения передачи информации.

*Архитектура* — совокупность общих принципов построения и характеристик технических и программных средств обработки данных, определяющих функциональные и эксплуатационные параметры изделия и существенных для организации его эффективно-го применения.

*Структура* — упорядоченное множество объектов и отношений между ними.

*Вычислительная система (ВС)* — совокупность нескольких ЭВМ с обобщенными или индивидуальными периферийными устройствами, взаимно координирующих свою работу при решении одной или различных задач и воспринимаемых каждым из пользователей как функциональное единое целое.

*Мини-ЭВМ* — малая вычислительная машина, имеющая широкое применение благодаря небольшим габаритным размерам, низкой стоимости, относительно высокой производительности.

*МикроЭВМ* — ЭВМ, состоящая из микропроцессора, полупроводниковой памяти, средств связи с периферийными устройствами и при необходимости пульта управления и источника питания, объединенных общей несущей конструкцией.

*Управляющая микроЭВМ* — микроЭВМ, которая использует данные (информацию) о процессе и вырабатывает выходные сигналы, управляющие работой объектов, участвующих в этом процессе.

*Виртуальная ЭВМ* — функциональный эквивалент вычислительной машины, внешних устройств и программного обеспечения, эмулируемый на конкретной вычислительной системе.

*Эмуляция* — имитация функционирования одной системы средствами другой системы без потери функциональных возможностей или искажения получаемых результатов.

*Программа* — алгоритм преобразования данных в форме последовательности команд ЭВМ.

*Команда* — указание, определяющее один шаг в общем процессе выполнения программы.

*Данные* — информация, представленная в формализованном виде и предназначенная для обработки ее техническими средствами (например, ЭВМ) или уже обработанная ими.

*Файл* — набор логически связанных данных.

Принимая во внимание приведенную ранее терминологию, рассмотрим структуру цифровых систем управления.

При создании систем автоматического управления с микроЭВМ принципиально возможны два направления.

*Первое направление* связано с использованием центральных управляющих микроЭВМ. Подобные системы можно применять для управления сложными объектами или группами объектов при комплексной автоматизации в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства (металлургической, химической, тепличном овощеводстве, птицеводстве и др.).

Общая структурная схема автоматической системы с микроЭВМ представлена на рис. 13.9. Система содержит ряд входных Вх.П1, Вх.П2, ..., Вх.Пк и выходных Вых.П1, Вых.П2, ..., Вых.Пк преобразователей, обменивающихся сигналами управления с микроЭВМ по шине управления в процессе преобразования данных. С выходных преобразователей сигналы поступают к исполнительным устройствам ИУ1, ИУ2, ..., ИУк, воздействующим на объект (или объекты) управления (ОУ).

Рассматриваемая система может быть связанной многомерной, если имеет место управление сложным многомерным объектом, и несвязанной многомерной, если осуществляется управление группой несвязанных одномерных объектов. В последнем случае система управления с микроЭВМ распадается на совокупность одномерных систем; ее виртуальная структура, представленная в виде совокупности одноконтурных систем, каждая из которых

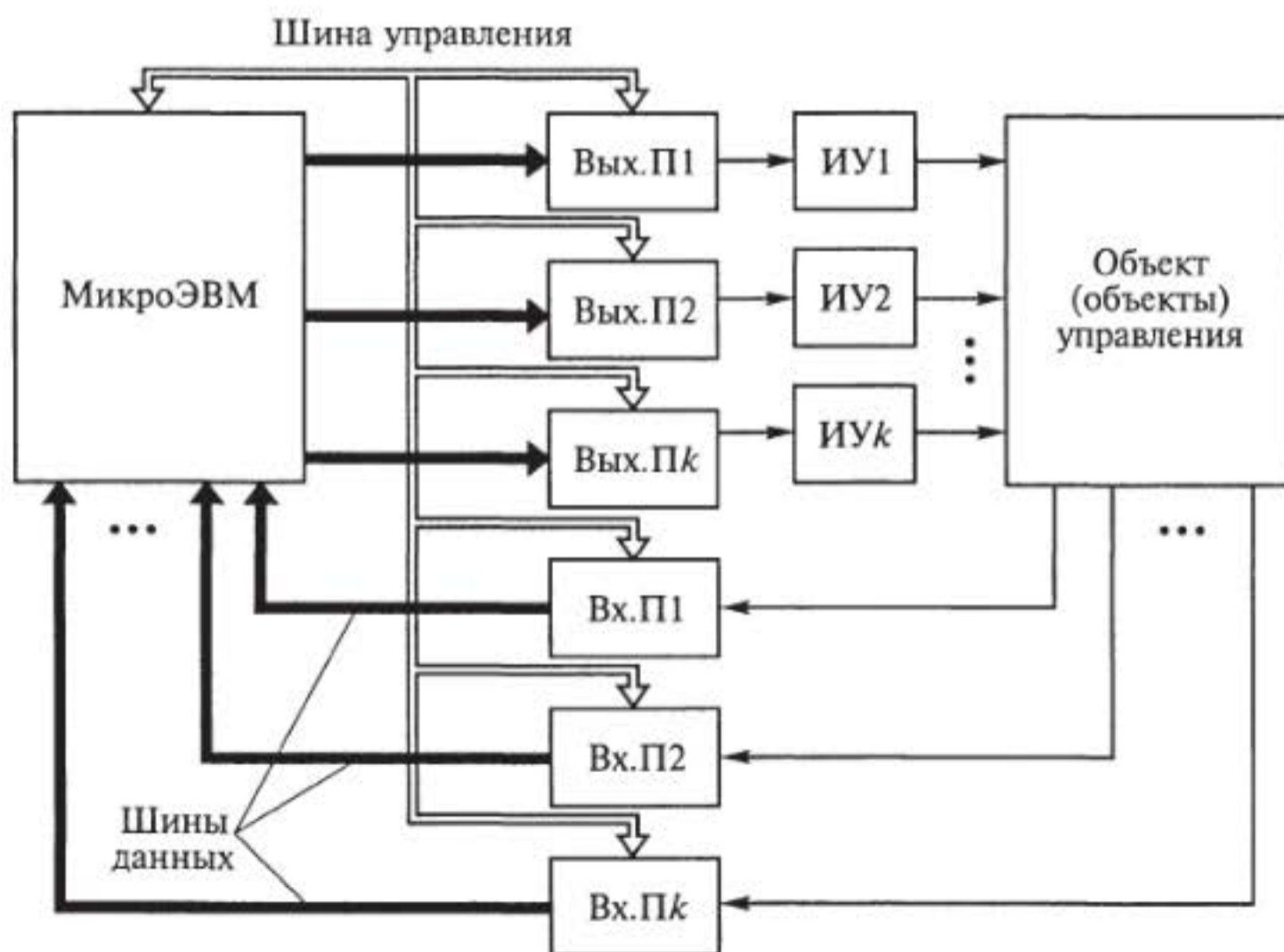


Рис. 13.9. Схема системы с центральной управляющей микроЭВМ

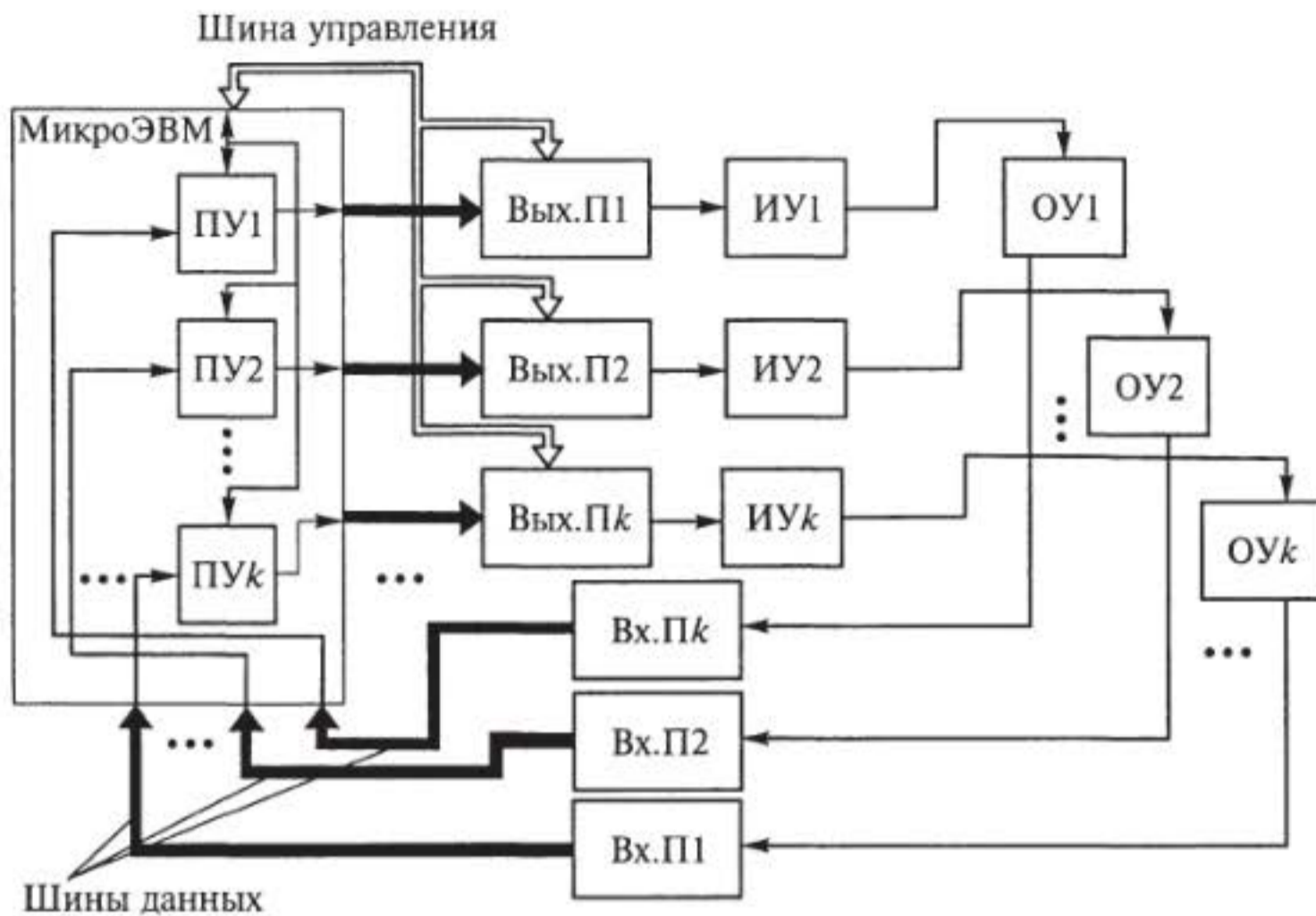


Рис. 13.10. Виртуальная структура системы управления с центральной микроЭВМ

имеет свою программу управления ПУ1, ПУ2, ..., ПУk, показана на рис. 13.10.

При управлении сложным объектом или группой объектов процессор обслуживает каналы управления или по жесткой программе, или по мере поступления заявок от отдельных каналов (причем возможно приоритетное обслуживание тех или иных заявок).

*Второе направление* развития систем управления — это использование автономных микроЭВМ в каждом контуре управления.

Структурная схема системы управления с автономными микроЭВМ, или микроконтроллерами МК1, МК2, ..., МКk, показана на рис. 13.11.

Микроконтроллеры — это упрощенные микроЭВМ, размещаемые в непосредственной близости от управляемого объекта. В микроконтроллерных системах центральная ЭВМ либо отсутствует совсем, либо выполняет функции диспетчера или супервизора.

Выбор одного из двух направлений построения систем управления с микроЭВМ связан, в частности, с вопросами надежности и стоимости.

Для увеличения надежности, производительности и гибкости САУ применяют многомикропроцессорные системы и системы на базе нескольких микроЭВМ — многомашинные. В первом случае большое число микропроцессоров работает на одну общую шину (рис. 13.12). Возможные варианты топологии многомашинных систем приведены на рис. 13.13.

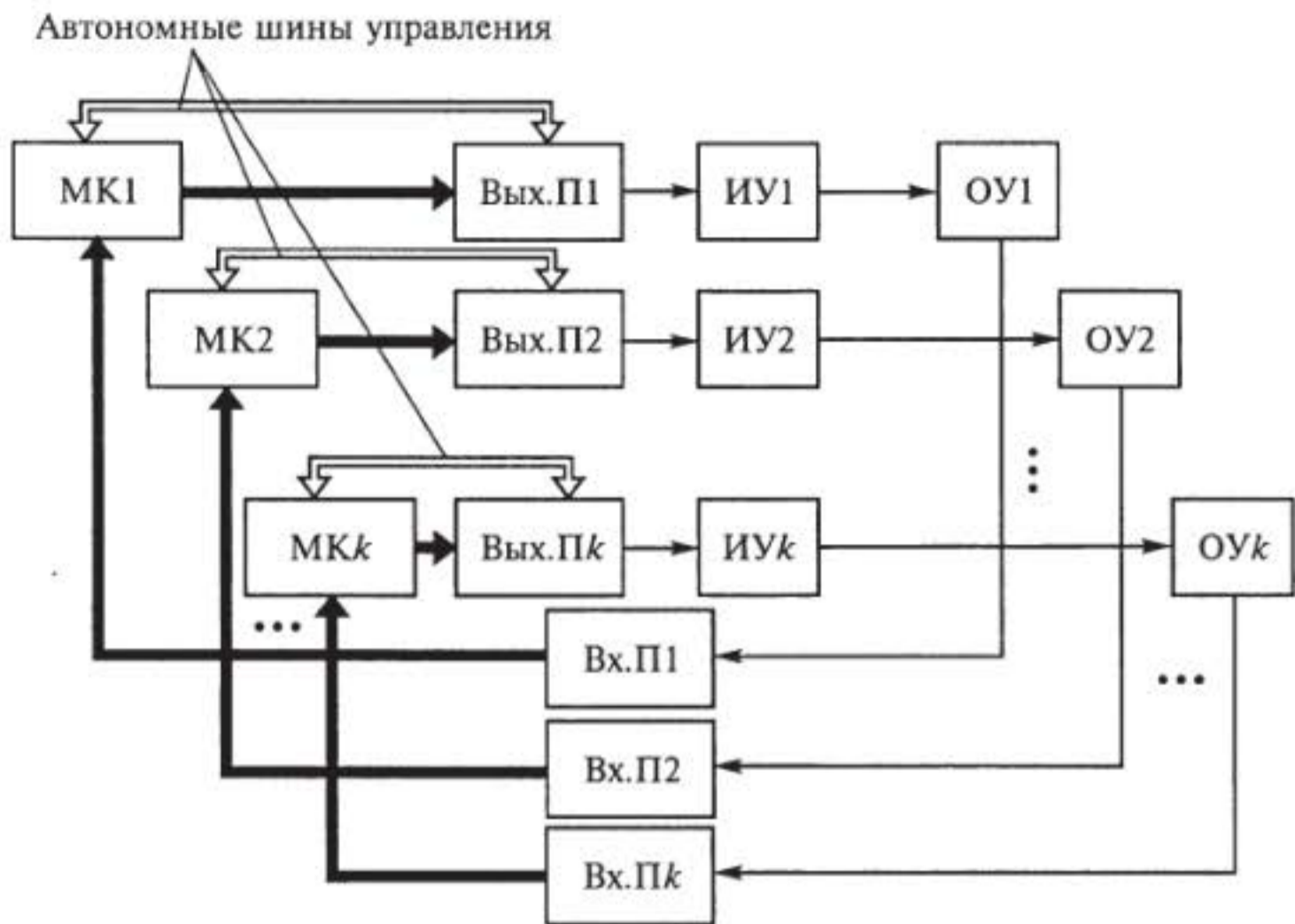


Рис. 13.11. Схема системы управления с автономными микроЭВМ

Многомашинные системы характеризуются высокой надежностью. Так, например, в случае выхода из строя любой микроЭВМ в системе с сетевой топологией (см. рис. 13.13, в) сохраняется по меньшей мере два канала связи со всеми другими микроЭВМ.

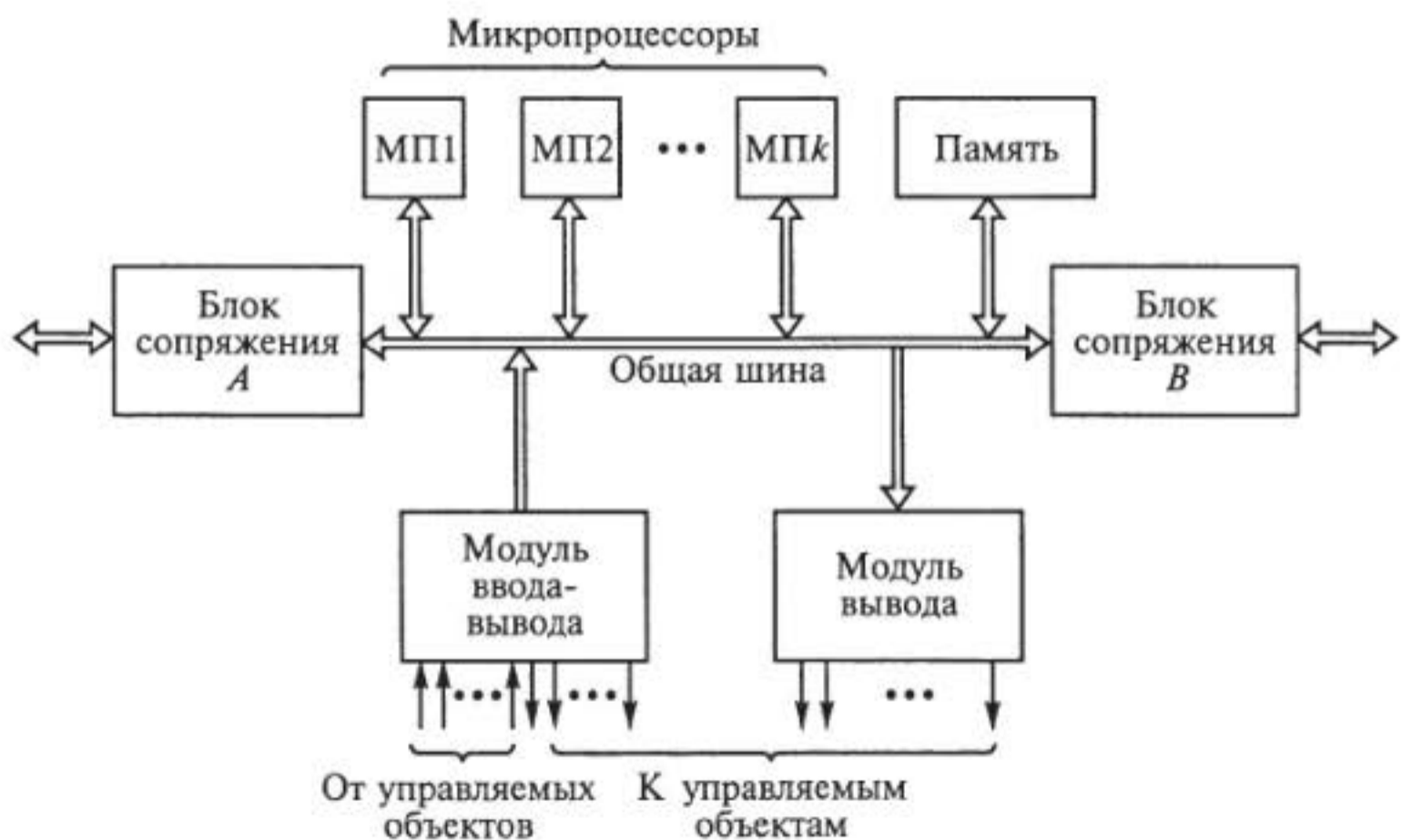


Рис. 13.12. Схема многомикропроцессорной системы управления

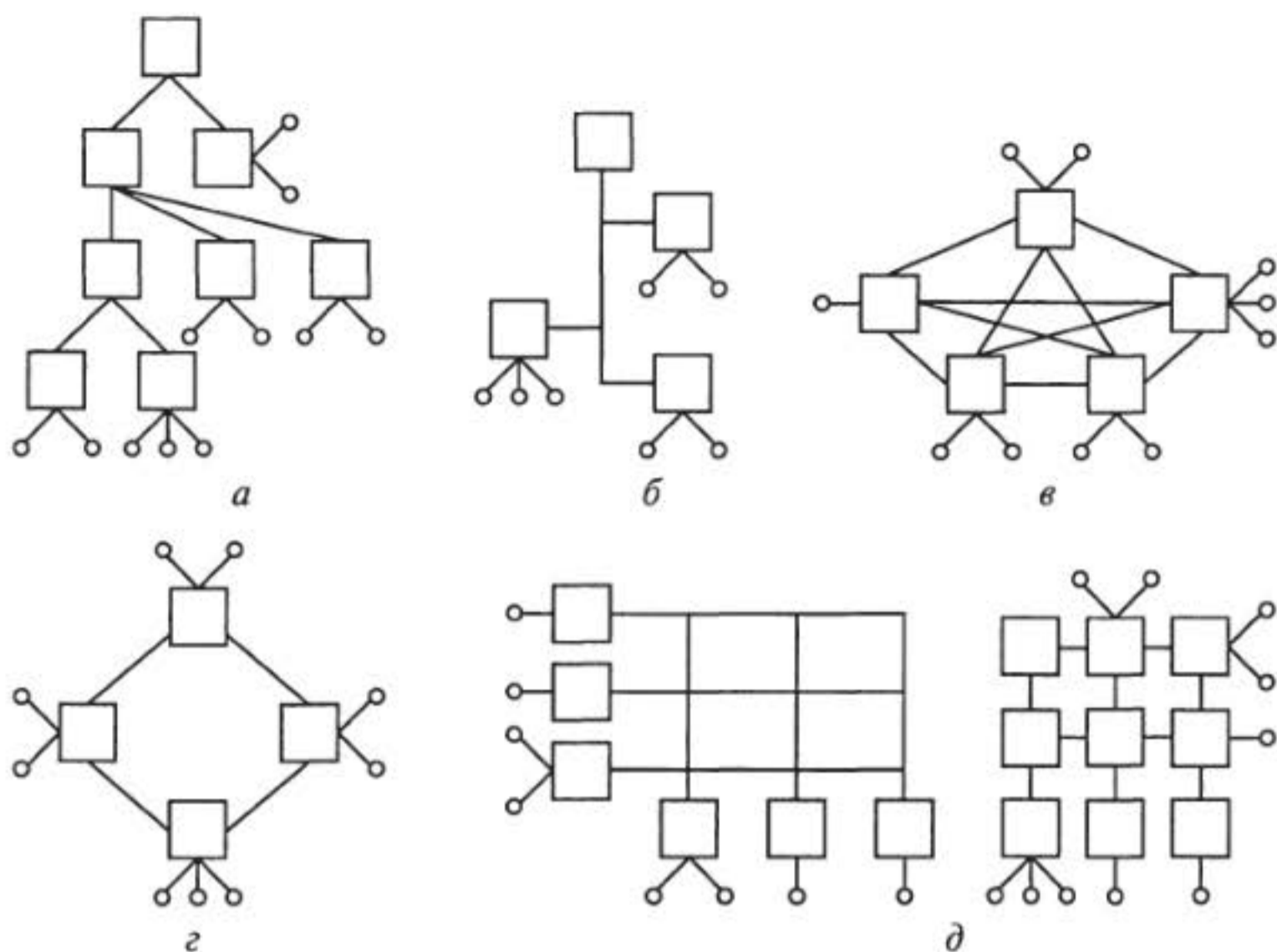
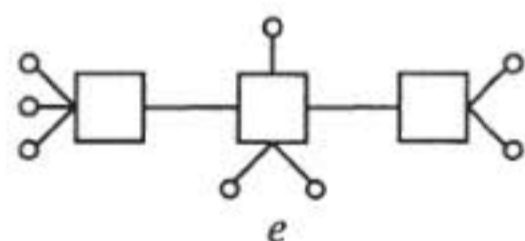


Рис. 13.13. Возможные варианты топологии цифровых систем управления:

*a* — иерархическая; *б* — шинная; *в* — сетевая; *г* — кольцевая; *д* — матричная; *e* — последовательная; □ — микроЭВМ; ○ — объекты управления



Типовая одноконтурная система управления с микроЭВМ (рис. 13.14) содержит АЦП, ЦАП, микроЭВМ и непрерывную часть, включающую в себя объект управления и подключенные к нему элементы (исполнительный и воспринимающий). Кодироваться в АЦП могут входное задающее воздействие  $g(t)$ , управляемая величина  $y(t)$ , а также другая поступающая извне информация. В результате такого кодирования на вход микроЭВМ в дискретные моменты времени поступают цифровые представления этих

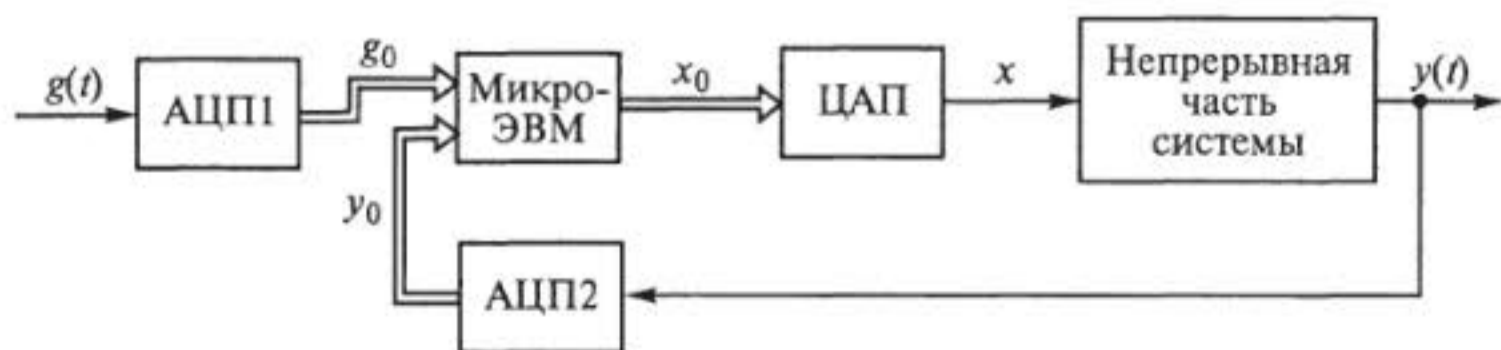


Рис. 13.14. Структурная схема одноконтурной системы управления с микроЭВМ

величин  $g_0$  и  $y_0$ . Цифровой сигнал управляющего воздействия  $x_0$  в соответствующее аналоговое представление  $x$  преобразуется ЦАП.

### **МикроЭВМ и микроконтроллеры в системах управления технологическими процессами**

Внедрение микроЭВМ в системы управления технологическими процессами наряду с упрощением замены элементной базы и определенным расширением функций управляющей аппаратуры открывает принципиально новые возможности в построении децентрализованных или распределенных комплексов. Децентрализация в этом случае предполагает не только рассредоточение аппаратуры, но и распределение функций обработки информации и управления между автономными микроЭВМ. Подобные системы могут также включать в свой состав и центральную ЭВМ, выполняющую функции оптимизации, учета, планирования и координации работ.

Примером реализации соответствующего централизованного контроля и управления служит комплекс А360-34 с базовым модулем А330-25, выполненный на микроЭВМ «Электроника С5-02». Наряду со сбором, измерением, обработкой информации и регистрацией управляемых процессов этот комплекс обеспечивает также формирование оптимальных воздействий, поступающих на объект управления.

Схема базового микропроцессорного модуля А330-25 представлена на рис. 13.15. В состав этого устройства входят: блоки коммутации бинарных сигналов и сигналов аналоговых датчиков, имеющие по 40 входов; АЦП; входной и выходной модули связи; перепрограммируемая память; периферийное и регистрирующее оборудование, обеспечивающее ввод данных и программ, а также вывод информации на видеоконтрольное и алфавитно-цифровое печатающие устройства.

Одной из важнейших функций многоконтурных систем управления является сбор информации от многих десятков и сотен датчиков. Для эффективного решения задачи дистанционного сбора информации используют так называемые вынесенные измерительные станции, которые могут обрабатывать аналоговые сигналы датчиков и передавать выходные цифровые сигналы (по недорогой линии в виде скрученной пары проводов) в центральный процессорный блок.

Вынесенные измерительные станции включают в себя собственный микропроцессор, мультиплексор и аналого-цифровой преобразователь, что позволяет обходиться без сложных и дорогих кабельных линий, а также схем обработки сигналов, необходимых для их передачи в центральный блок обработки данных.

Вынесенные микропроцессоры позволяют также разгрузить центральный процессорный блок от многих дополнительных за-

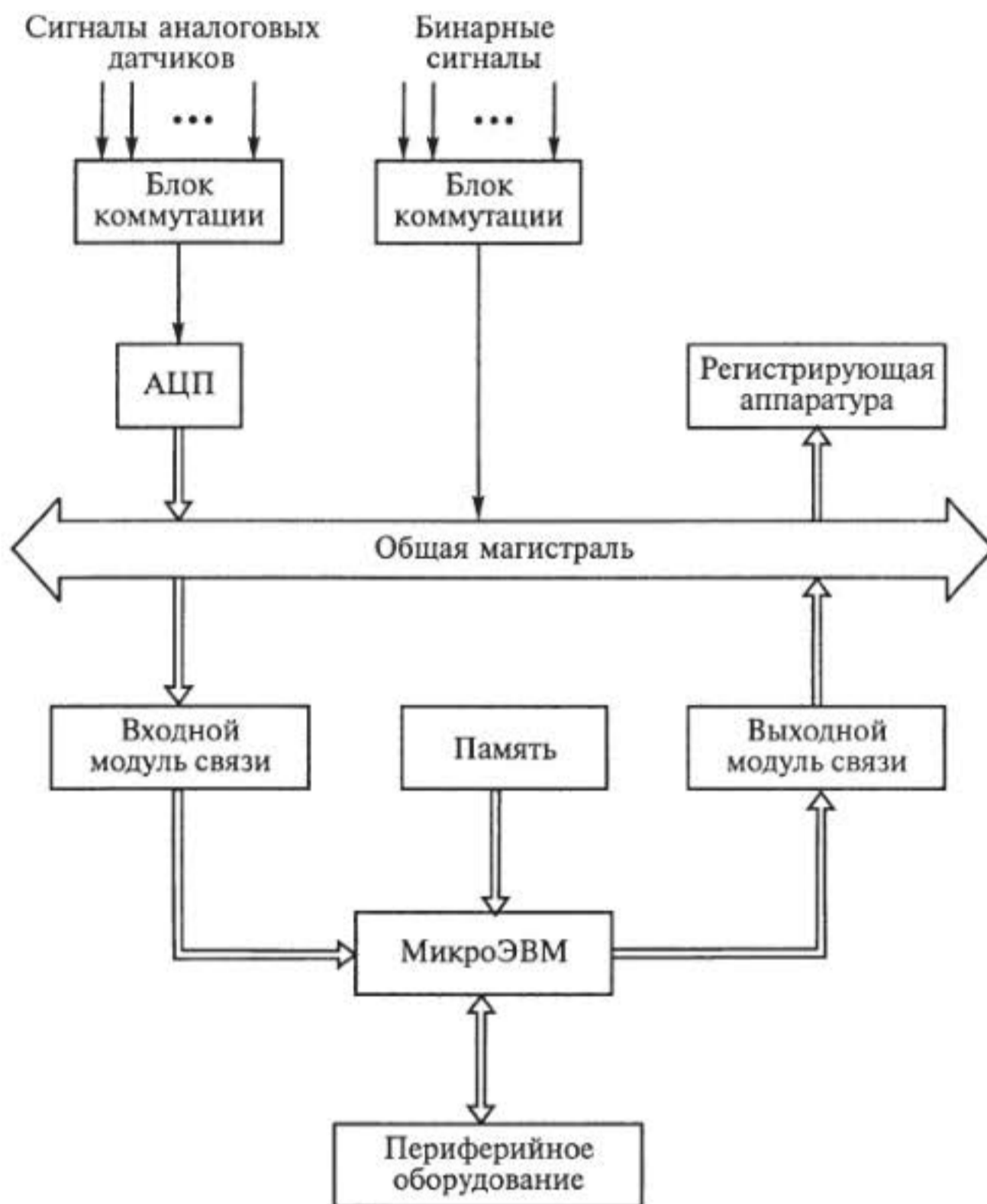


Рис. 13.15. Схема базового микропроцессорного модуля А330-25

дач, связанных с реализацией локальных функций управления в одноконтурных системах.

Регуляторы одноконтурных систем могут реализовываться с использованием различных принципов их построения. Наибольшее распространение получили регулирующие микроконтроллеры — ремиконты, служащие центральным звеном локальной системы управления. Входные цепи ремиконта рассчитаны на подключение аналоговых и дискретных датчиков, а выходные — формируют аналоговые и дискретные сигналы для управления исполнительными устройствами.

Аналоговая и дискретная информация, поступающая в ремиконт, преобразуется в цифровую форму и обрабатывается в микроЭВМ, после чего возможен процесс обратного преобразования.

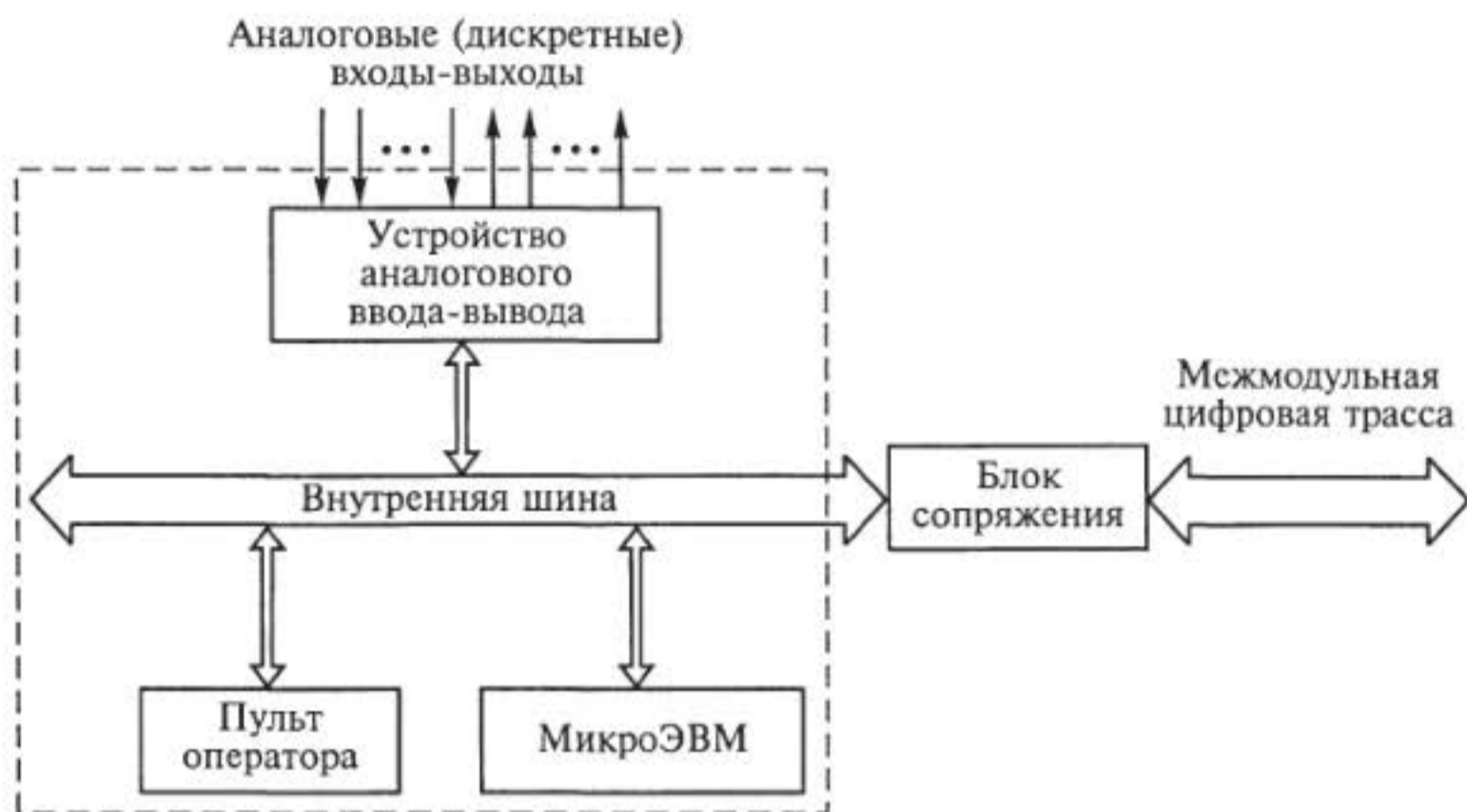


Рис. 13.16. Схема ремиконта

Ремиконт программируется с помощью специализированной клавишной панели.

Устройства аналогового ввода-вывода информации микроЭВМ и пульт оператора являются основой аппаратного обеспечения ремиконта (рис. 13.16). Устройства аналогового ввода-вывода содержат узлы гальванического разделения сигналов, узел мультиплексирования аналоговых входных сигналов и группу преобразователей: АЦП, ЦАП, дискретно-цифровой (ДЦП) и цифродискретный (ЦДП).

Узлы гальванического разделения обеспечивают подавление помех общего вида, а также работу с источниками информации, находящимися под различными потенциалами. На выходе ремиконта не используется мультиплексирование, т. е. число ЦАП равно числу выходных цепей контроллера. Такая особенность построения ремиконта связана с необходимостью запоминания значения каждого управляющего сигнала после прекращения вычислительного процесса.

Поскольку в системе управления число выходных сигналов ремиконта невелико, затраты на ЦАП и АЦП оказываются сравнительно небольшими.

Благодаря перечисленным узлам ввода-вывода аналоговой и дискретной информации можно сопрягать ремиконт с аналоговыми и дискретными датчиками, с исполнительными механизмами пропорционального, позиционного, интегрирующего и другого действия, а также с теми или иными устройствами дискретного и логического управления.



## Контрольные вопросы

1. Каково назначение ЭВМ в составе САУ и какова упрощенная схема цифровой САУ?
2. Каково назначение АЦП и ЦАП в цифровой САУ?
3. Как и зачем производится квантование сигналов по времени и уровню в цифровых САУ?
4. Для чего применяются логические элементы в автоматике?
5. Какие виды логических операций применяются в автоматике? Что такое дизъюнкция, конъюнкция, логическое умножение, инверсия?
6. Как осуществляются логические операции релейно-контактными элементами?
7. Как изображаются логические элементы на схемах?
8. Какие существуют законы алгебры логики?
9. Как минимизируются логические функции?
10. Что представляют собой бесконтактные логические элементы?
11. Что такое числовое программное управление и каковы преимущества применения СЧПУ в машиностроении?
12. Что представляют собой позиционное, прямоугольное и контурное управления в СЧПУ?
13. Поясните функциональную схему СЧПУ токарного станка.
14. Что такое ГПС и какова ее структурная схема?
15. Каково назначение и как устроен автоматический робот-манипулятор?
16. Как работает функциональная схема управления роботом-манипулятором?
17. Поясните работу системы с центральной управляющей микроЭВМ.
18. Какова виртуальная структура системы управления с центральной микроЭВМ?
19. Как работает система с автономными управляющими микроЭВМ (микроконтроллерами)?
20. В чем заключается принцип действия многомикропроцессорной системы управления?
21. Какие существуют варианты топологии цифровых систем управления?
22. Поясните работу типовой одноконтурной системы управления с микроЭВМ.

# Глава 14

## СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕХАНИКИ

### 14.1. Основные понятия

В рассмотренных ранее САУ все составляющие их элементы были пространственно сосредоточены, расстояние между ними существенного влияния на работу системы не оказывало и разделить ее на составные части можно было лишь по функциональным признакам.

Иначе обстоит дело, когда управляющее устройство и объект управления расположены достаточно далеко друг от друга. Например, в АСУП расстояние между *пунктом управления* (ПУ), где сосредоточена аппаратура управления, и *контролируемым пунктом* (КП), где размещен ОУ, может составлять от десятков метров до десятков километров и более, а в космических системах телеуправления это расстояние достигает тысяч и миллионов километров.

В этих случаях окружающая физическая среда оказывает очень сильное мешающее воздействие на передаваемые между ПУ и КП сигналы. Чтобы снизить влияние помех до допустимого уровня и обеспечить работоспособность таких систем, необходимо согласовать параметры передаваемых сигналов с параметрами среды, по которой они распространяются. Для этого передаваемые сигналы подвергают специальным преобразованиям.

Область науки и техники, охватывающая теорию и технические средства контроля и управления объектами на расстоянии посредством специальных преобразований сигналов, называется *телемеханикой*.

Для осуществления преобразований сигналов используют специальные передающие и приемные устройства. Совокупность приемопередающих устройств и физической среды, обеспечивающая материальное соединение ПУ и КП между собой, образует *линию связи* (рис. 14.1). Таким образом, принципиальная особенность систем телемеханики заключается в наличии линии связи. Роль линии связи настолько велика, что ее параметры являются определяющими для параметров всей телемеханической системы: точности, быстродействия, дальности действия, надежности и стоимости.

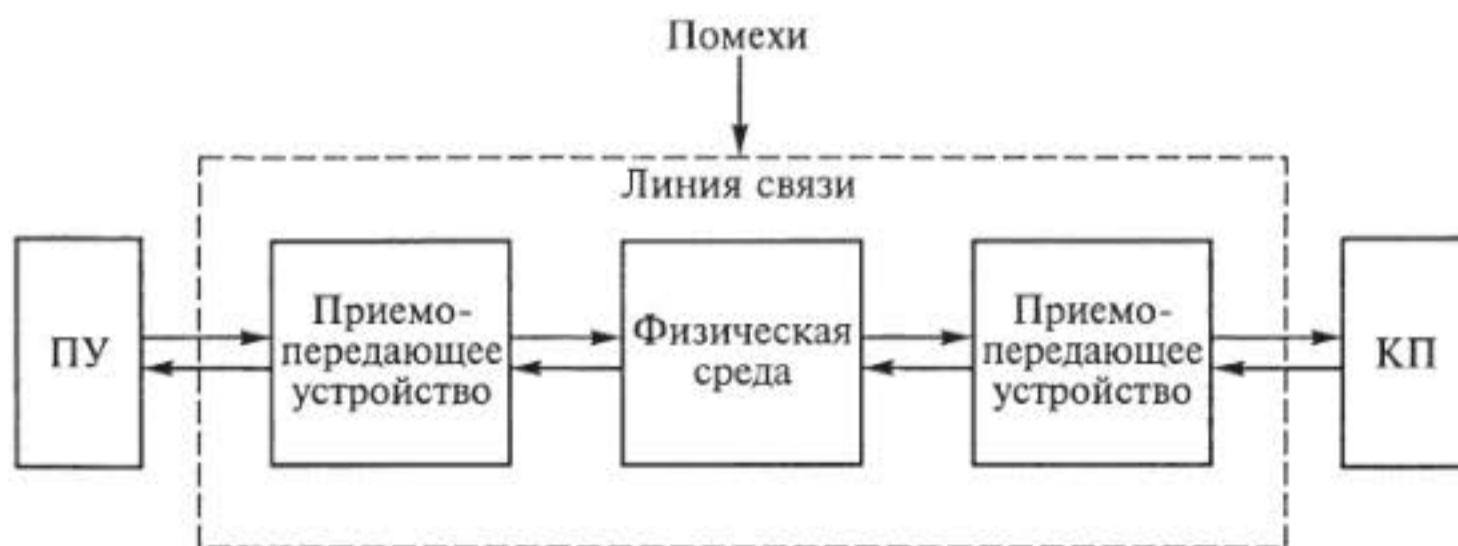


Рис. 14.1. Структурная схема телемеханической системы

Источниками передаваемой по линии связи информации на КП могут быть различные датчики, машинные носители информации (перфоносители, магнитные носители), передающие телевизионные трубки, различные устройства ручного ввода (кнопки, клавиатура), периферийные ЭВМ, а на ПУ — устройства ручного ввода, расположенные на пульте, с которого осуществляется управление, центральная ЭВМ и машинные носители. Получателями информации на КП могут быть различные исполнительные устройства, периферийные ЭВМ и машинные носители, а на ПУ — устройства индикации различного рода, расположенные на пульте управления, центральная ЭВМ и машинные носители.

Системы телемеханики обеспечивают управление из одного ПУ большим числом КП, расположенных самым различным образом и на самых различных расстояниях. Соответственно могут различаться и соединяющие их линии связи. В зависимости от взаимного расположения ПУ и КП линии связи могут быть с радиальной, цепочечной и древовидной структурами (рис. 14.2).

Современные телемеханические системы обеспечивают взаимодействие в рамках одной большой системы многих сотен и даже тысяч ПУ и КП. В этом случае говорят уже не об отдельных линиях связи, соединяющих ПУ с КП, а о *сетях связи*. Оптимизация структуры таких сетей связи по времени передачи сигналов, надежности, стоимости и другим параметрам является весьма сложной задачей.

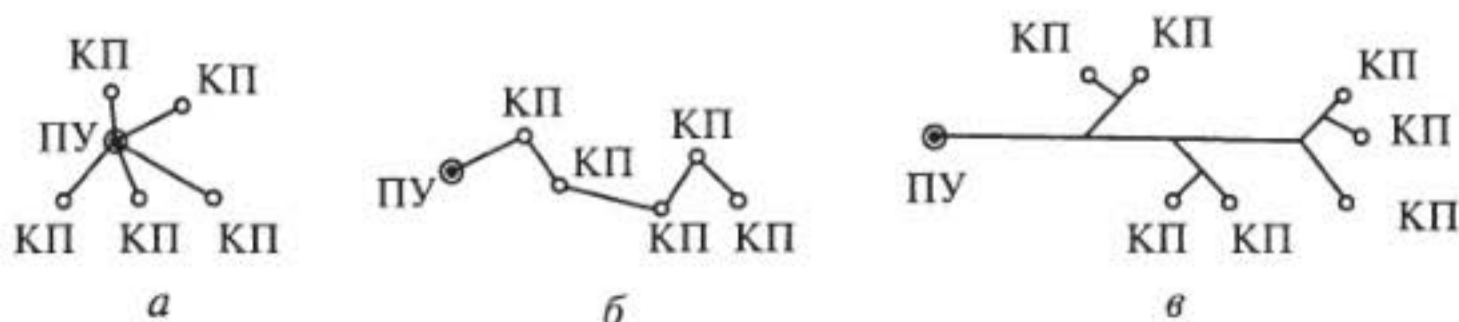


Рис. 14.2. Линии связи радиальной (а), цепочечной (б) и древовидной (в) структур

В больших телемеханических системах возникает задача передачи сигналов между определенной парой ПУ и КП, т. е. от конкретного источника к конкретному получателю информации. Совокупность технических средств, обеспечивающих независимую передачу сигналов между одним ПУ и одним КП, называется *каналом связи*. Таким образом, канал включает в себя линию (или сеть) связи и каналообразующую аппаратуру.

На рис. 14.3, *а* показан пример одноуровневой, или одноступенчатой, системы, в которой все КП непосредственно связаны с ПУ. Усложнение телемеханических систем, рост объемов передаваемой и перерабатываемой информации приводят к тому, что зачастую более эффективными оказываются многоуровневые системы, построенные по *иерархическому принципу* (рис. 14.3, *б*). В иерархических системах информация отбирается, частично обрабатывается и обобщается на каждом промежуточном уровне при передаче ее от КП к ПУ и, наоборот, конкретизируется и уточняется на каждом уровне при передаче от ПУ к КП. При этом в современных телемеханических системах каждый КП сам представляет собой весьма сложную местную систему централизованного контроля. Иерархический принцип построения широко используется в АСУ.

В зависимости от выполняемых функций телемеханические системы принято делить на системы телеизмерения, телесигнализации, телеуправления и телерегулирования.

Задачей *систем телеизмерения* (ТИ), или *телеметрии*, является передача от КП к ПУ информации о значениях каких-либо параметров контролируемого объекта (например, скорости перекачки нефти в системе АСУ нефтепровода или температуры в отсеках космического корабля в системе космической телеметрии). Различают системы ТИ текущих параметров и системы ТИ интегральных параметров (например, расхода горючего или электроэнер-

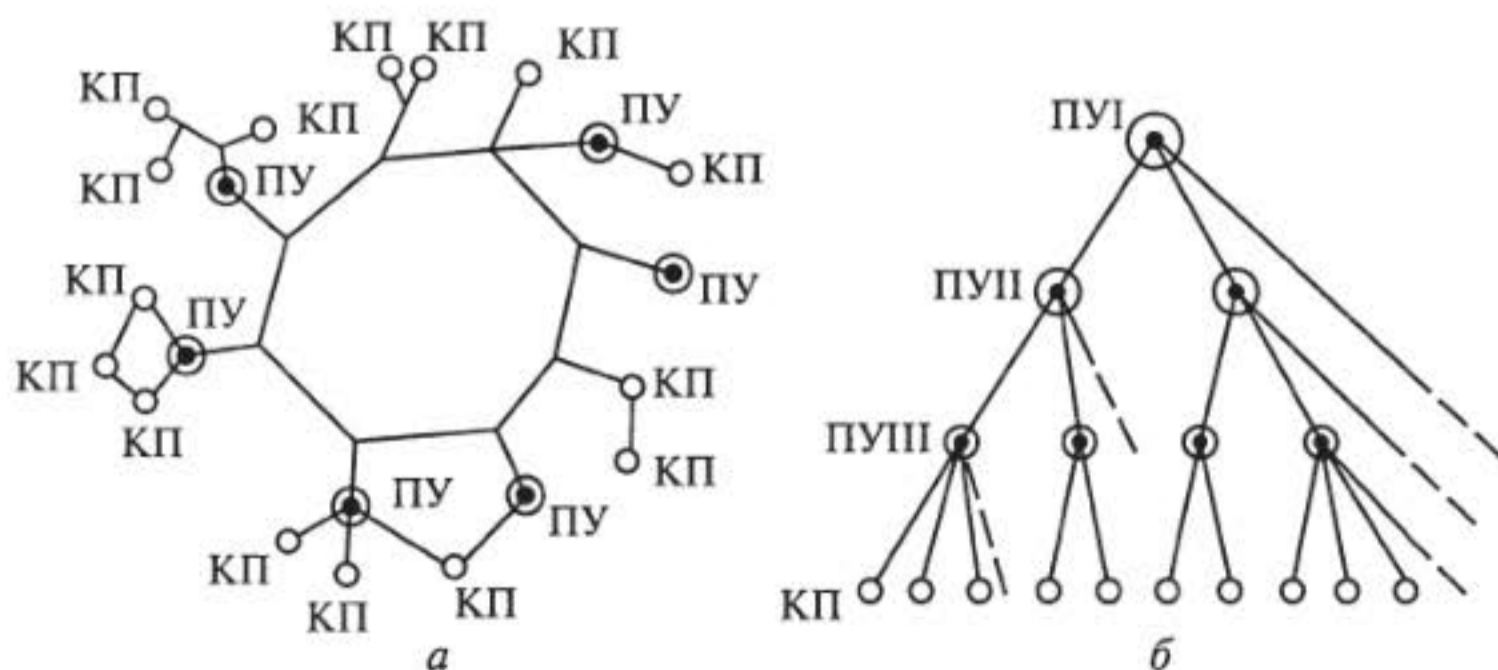


Рис. 14.3. Схемы одноуровневой (*а*) и трехуровневой (*б*) телемеханических систем

гии за определенный промежуток времени). Измеряемый параметр в системах ТИ в общем случае имеет непрерывный ряд значений. Следовательно, от КП к ПУ по линии связи необходимо передавать информацию о значении аналоговых величин.

*Системы телесигнализации (ТС)* служат для получения с помощью устройств телемеханики информации о дискретных состояниях контролируемых объектов (например, включен или выключен исполнительный двигатель, укладываются ли размеры детали в заданные пределы и т. д.).

Задачей *систем телеуправления (ТУ)* является передача от ПУ к КП управляющих воздействий — команд. В системах ТУ могут передаваться как простейшие двухпозиционные команды (типа включить-выключить), так и многопозиционные (типа повернуть антенну радиолокационной станции на нужный угол или включить двигатели космического корабля на заданное время). Пункты управления систем ТУ могут выдавать команды как непосредственно на исполнительные органы контролируемых объектов, так и записывать их в запоминающие устройства для последующего выполнения.

Во многих случаях на КП имеются местные САУ, поддерживающие необходимый режим работы контролируемого объекта (например, угол поворота рулей, требуемое давление или температуру и пр.). При этом с ПУ эпизодически передаются лишь заданные значения управляемых параметров — так называемые *установки*, а в остальное время местные САУ работают автономно. Такая функция систем телемеханики называется *телерегулированием (ТР)*.

В настоящее время не применяются системы телемеханики, выполняющие какую-либо одну из перечисленных функций: ТИ, ТС, ТУ или ТР. Практически все современные телемеханические системы являются многофункциональными, или комплексными, системами. Так, например, на основании измерения параметров ориентации космического корабля по системе ТС для реализации всех этих функций используется общее оборудование, т. е. одна система выполняет функции ТИ, ТУ, ТС.

Независимо от конкретных выполняемых функций все телемеханические системы всегда являются системами передачи информации, главная задача которых — передать информацию на необходимое расстояние с минимальными затратами (часто и за минимальное время). В этом плане системы телемеханики все теснее смыкаются с чисто информационными *системами передачи данных (СПД)*. Специфическими особенностями систем телемеханики по сравнению с СПД остаются меньший объем передаваемой информации, но значительно большая ее достоверность. Так, в системах ТУ вероятность возникновения ложной команды не должна превышать  $10^{-7} \dots 10^{-13}$ , а в системах ТИ допустимая погрешность составляет не более  $1 \dots 0,05 \%$ .

Основные тенденции развития систем телемеханики — расширение возможностей систем по управлению контролируемыми объектами, увеличение числа ПУ и КП и рост объемов передаваемой информации наряду с повышением требований к их надежности и точности. Для решения этих задач в системах телемеханики все более широкое применение находят ЭВМ различных классов и производительности. В качестве ПУ используют универсальные ЭВМ с соответствующими приемопередающими устройствами, пультами управления и устройствами индикации. Применение встроенных микропроцессоров и микроЭВМ на КП позволяет производить предварительную обработку и отбор информации, что повышает оперативность и гибкость управления и разгружает каналы связи.

Широкое применение ЭВМ приводит к тому, что, как и в САУ, задачей телемеханики становится не разработка соответствующей аппаратуры, а поиск алгоритмов оптимального управления объектами.

## 14.2. Принципы построения систем телемеханики

Системы телемеханики используют для контроля и управления объектами на расстоянии. По аналогии с классификацией систем автоматического контроля и управления здесь также различают системы телеконтроля, т. е. системы, обеспечивающие контроль, регистрацию или сигнализацию о состоянии параметров ОУ на расстоянии, и системы телеуправления, т. е. системы, обеспечивающие контроль параметров ОУ и управление ими на расстоянии.

Системы телемеханики применяют в ирригационных сооружениях, электросистемах, тепличных и других комплексах, т. е. там, где необходимо контролировать и управлять объектом на больших расстояниях.

Основные элементы системы телемеханики:

*источник информации* — собирает, хранит и выдает исходные данные, которые необходимо передавать на расстояние. Источниками информации в системах телеконтроля являются датчики, регистрирующие приборы и ЭВМ, а в системах телеуправления — программные устройства, ЭВМ и человек, управляющий объектом на расстоянии;

*распределитель (шифратор)* — шифрует передаваемую информацию, так как по каналу связи одновременно передается информация о нескольких параметрах объекта или же необходимо управлять несколькими ОУ;

*передатчик* — преобразует управляемый параметр в сигнал, передаваемый по выбранному каналу связи;

*канал связи* — обеспечивает передачу закодированного сигнала на требуемое расстояние. В качестве каналов связи применяют линии связи (телефонные, телеграфные, радиолинии) и линии электропередач низкого и высокого напряжения;

*приемник* — воспринимает сигналы передатчика по каналам связи и преобразует их в сигналы для избирателя;

*избиратель* (дешифратор) — дешифрует закодированные сигналы, переданные по каналу связи;

*получатель информации* — измерительные, регистрирующие и сигнализирующие приборы в системах телеконтроля и исполнительные механизмы ОУ в системах телеуправления.

Система элементов, обеспечивающая сбор, хранение и выдачу в каналы связи сигналов контроля параметров ОУ, а также воспринимающая сигналы управления его параметрами, представляет собой *пункт контроля*.

Для передачи информации по каналам связи системы телемеханики используются ток или напряжение с такими качественно различными характеристиками, как полярность, амплитуда, длительность импульсов или пауз, частота или фаза сигнала.

Один и тот же объем информации  $y$  можно передать либо по определенному числу  $n$  проводов канала связи, либо по одному каналу связи, увеличив число качественных признаков  $m$  сигнала, т. е.

$$y = 2^n, \text{ или } y = 2^m.$$

По трехпроводной линии связи телеуправления (рис. 14.4, *а*) и только при двух признаках сигнала: «Есть сигнал» и «Нет сигнала» передается объем информации  $y = 2^n = 2^3 = 8$  сигналам (рис. 14.4, *б*), используемым, например, для управления четырьмя магнитными пускателями КМ1... КМ4 (рис. 14.4, *в*).

По четырехпроводной линии связи передается объем информации  $y = 2^4 = 16$ , т. е. соответственно можно управлять 8 и 16 объектами и т. д.

Такое же число сигналов можно передать по однопроводному каналу связи (КС) кодированными по частоте сигналами. Например, четырьмя магнитными пускателями можно управлять кодированными по частоте сигналами (рис. 14.4, *г*), используя три генератора частоты  $GF1... GF3$  (качественный признак сигнала  $m = 3$ ). Тогда  $y = 2^3 = 8$ . Однако при этом необходимо декодировать сигналы, переданные по каналу связи, с помощью фильтров частоты  $UF1... UF3$ .

Увеличивая число генераторов, можно соответственно передавать 16, 32 и более сигналов.

В обоих рассмотренных схемах ТУ (см. рис. 14.4, *а*, *в*) сначала с помощью ключей  $SA1... SA3$  набирают код сигнала  $y$ , а затем нажатием кнопки  $SB1$  этот сигнал передается на КП.

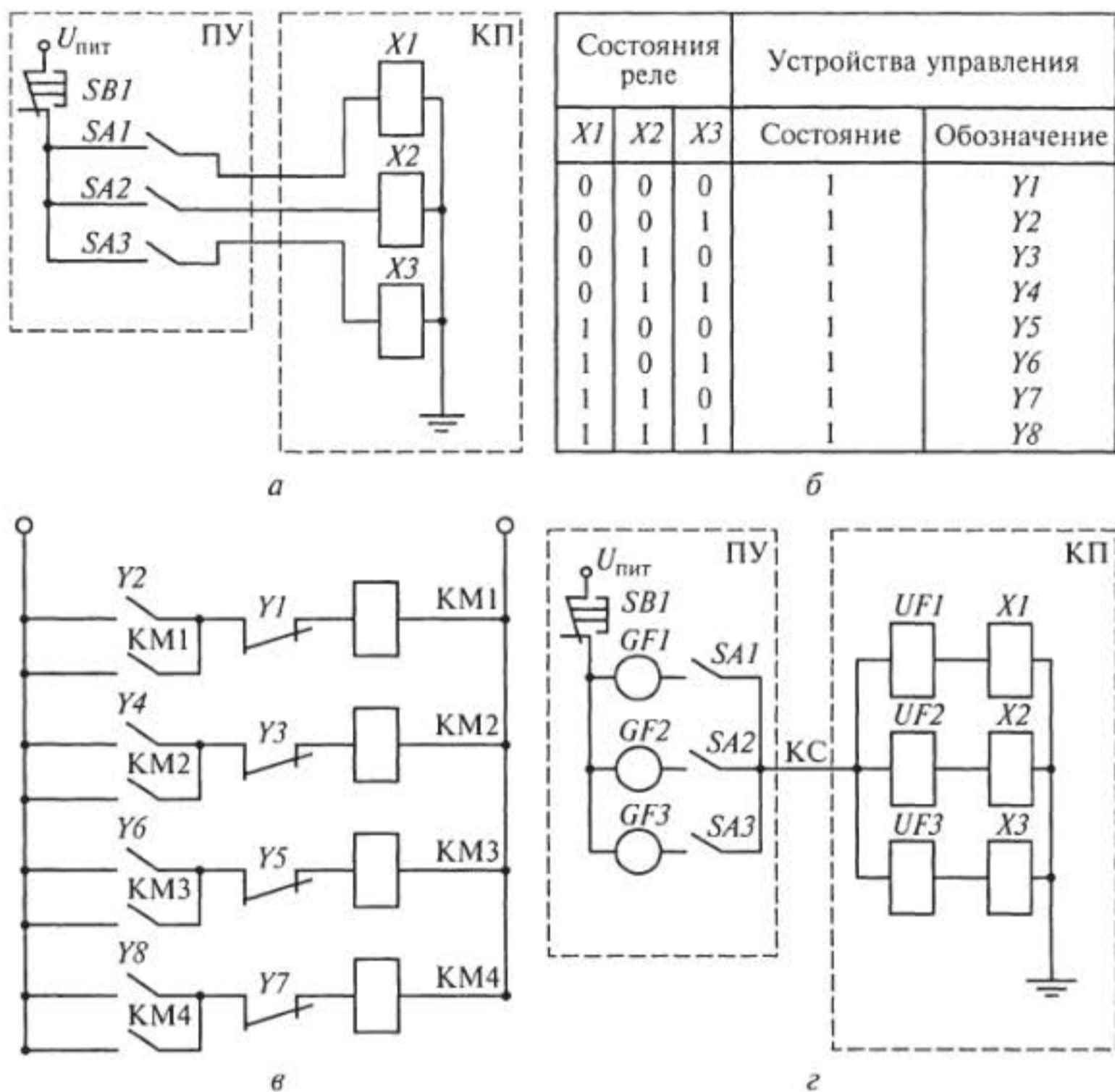


Рис. 14.4. Схема ТУ по трехпроводной линии связи (а), таблица состояний устройств управления (б), пример управления четырьмя магнитными пускателями (в) и схема ТУ кодированными по частоте сигналами (г)

В системах телемеханики стремятся к уменьшению числа каналов связи из-за их высокой стоимости и материалоемкости, поэтому для увеличения количества передаваемой информации используют увеличение числа качественных признаков сигналов. В основном применяют сигналы, различающиеся по частоте или длительности импульсов и пауз. При частотном способе разделения сигналы по линии связи передаются параллельно или последовательно, а при временимпульсном (по длительности импульсов или пауз) — только последовательно.

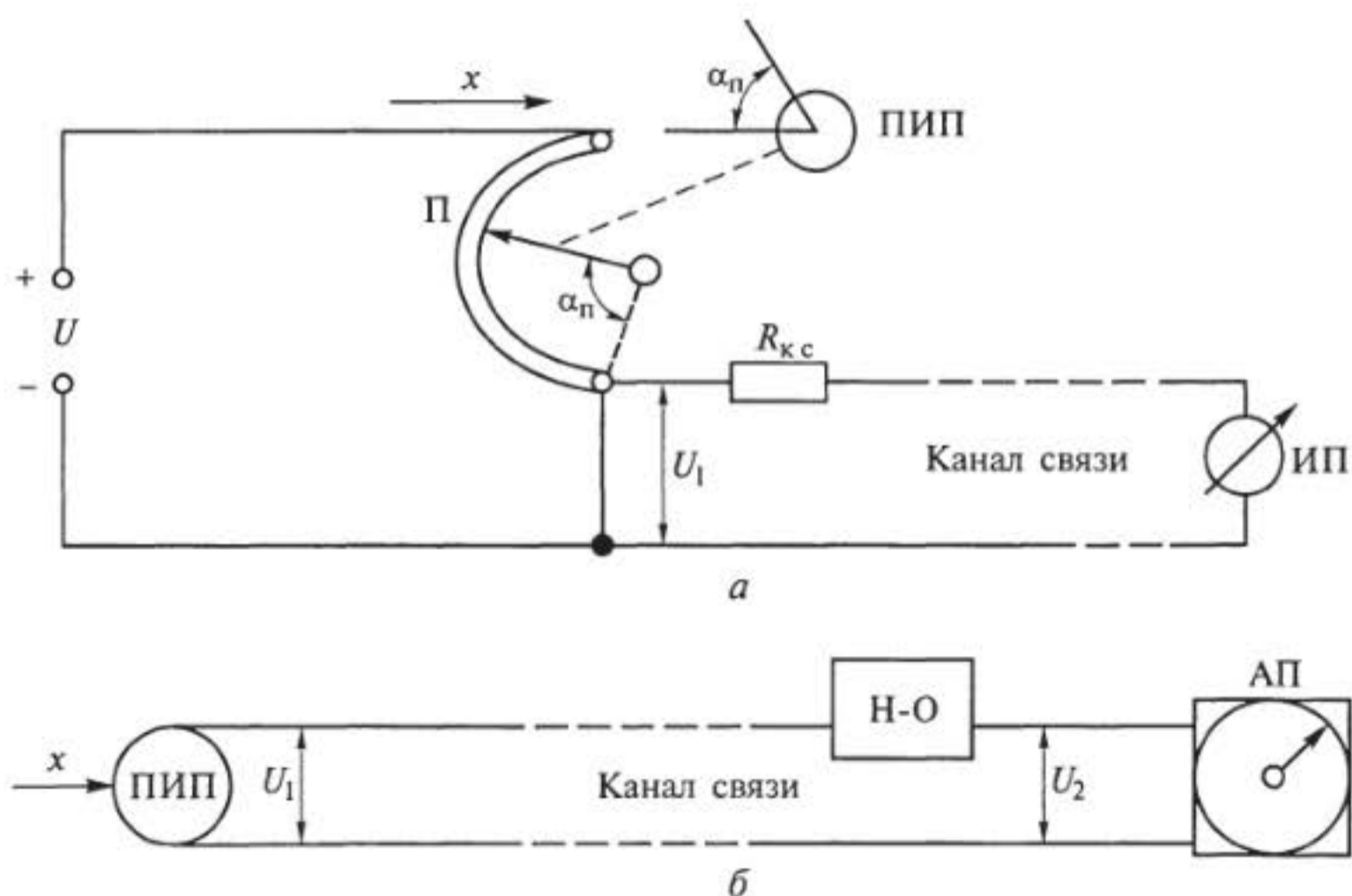
С помощью систем телеизмерения производят дистанционное измерение электрических и неэлектрических величин. Телеизмерение осуществляется без непосредственного участия человека и может быть использовано для контроля, регистрации, сигнализации о состоянии ОУ и управления (регулирования) его параметрами.



В небалансных системах ТИ (рис. 14.5, а) измеряемый параметр  $x$  преобразуется первичным измерительным преобразователем (ПИП) в угол поворота  $\alpha_n$  подвижной щетки потенциометра (П), которому пропорционально напряжение  $U_1$ , передаваемое по каналу связи и фиксируемое измерительным прибором (ИП). Так как канал связи обладает сопротивлением  $R_{к.с.}$ , то при передаче происходит потеря информации. Чем длиннее канал связи, тем больше потери информации.

Увеличить расстояние передачи информации позволяют балансные системы ТИ (рис. 14.5, б), в которых непрерывно сравниваются напряжения  $U_1$  и  $U_2$ . На приемной стороне линии связи установлены автоматический потенциометр (АП) и нуль-орган (Н-О), фиксирующий отсутствие тока в линии, что происходит при  $U_1 = U_2$ . При появлении тока в линии нуль-орган воздействует на АП до тех пор, пока не установится положение, при котором  $U_1 = U_2$ . Значение напряжения  $U_2$ , отображаемое на шкале потенциометра АП, пропорционально значению измеряемого параметра  $x$ .

Для измерения параметров величин ОУ на больших расстояниях используют времяимпульсные или частотные системы ТИ. Во времяимпульсных системах измеряемый параметр преобразуется в интервалы времени, а в частотных — в частоту. При этом на приемной стороне линии связи происходит обратное преобразование импульсов, пауз или частот соответственно в напряжение или ток, отображаемые аналоговыми приборами, или в число импульсов при цифровом отсчете.



14.5. Схемы небалансной (а) и балансной (б) систем ТИ

Несмотря на одинаковое построение систем телеуправления и телесигнализации назначение их различно: система ТУ предназначена для управления параметрами ОУ, и сигналы в ней передаются от ПУ к ОУ; система ТС предназначена для контроля параметров ОУ, и сигналы в ней передаются от ОУ к ПУ.

В системах ТУ и ТС применяют следующие виды управления: двухступенчатое, иерархическое (многоступенчатое), циркулярное и циклический опрос ОУ.

При двухступенчатом управлении в системах ТУ диспетчер с помощью ключей *SA1...SA3* (см. рис. 14.4, *a, в*) на пульте пункта управления выбирает требуемый ОУ, а затем посылает команду «Включить» или «Отключить» с помощью общего ключа (кнопки) *SB1*. В системах ТС функции диспетчера выполняют автоматические устройства, которые могут быть расположены как на пульте ПУ, так и на пульте КП. Двухступенчатость уменьшает вероятность неправильной посылки команды. На ПУ должна быть предусмотрена либо местная, либо поступившая с КП сигнализация о выбранном объекте, подтверждающая выполнение подготовительной операции.

Иерархическое управление основано на разделении информации по определенным уровням, что позволяет создать многоступенчатые системы ТУ и ТС. Информация, возникающая на каждой ступени, почти полностью замыкается в пределах этой ступени, и лишь часть ее передается на более высокую ступень. Самая нижняя ступень — это местные системы автоматики, которые самостоятельно воздействуют на ОУ. С контролируемых пунктов информация поступает на пункт управления, где она обобщается, а уже затем передается на центральный диспетчерский пункт (ЦДП). На нижестоящие ступени управления ЦДП также могут поступать обобщенные команды.

Циркулярное управление характеризуется одновременной передачей информации для многих объектов, т. е. по одной команде происходит управление многими объектами.

При циклическом опросе на КП поочередно передается информация о состоянии отдельных ОУ или групп ОУ. Циклический опрос проводится периодически по мере необходимости или автоматически по заданной программе.

Системы ТС получают следующие сигналы:

о состоянии ОУ и самих систем телемеханики, подтверждающих выполнение команды, поданной с ПУ (известительная сигнализация);

о выходе измеряемого параметра за заранее установленные пределы (предупредительная и аварийная сигнализации).

В системах ТМ наиболее перспективны цифровые способы передачи информации. При удаленности ОУ от ПУ на 0,2... 1,0 км используют многопроводные каналы связи и параллельное коди-

рование передаваемых сигналов, при удаленности на 2 ... 5 км — четырехпроводные линии связи и параллельно-последовательное кодирование, а при удаленности более чем на 5 км — двухпроводные линии связи и последовательное кодирование сигналов.

### 14.3. Линии связи

В системах передачи информации (и в системах телемеханики, в частности) основным элементом является линия связи. Именно в линии связи передаваемый сигнал подвергается наибольшему искажению за счет воздействия естественных (а иногда и искусственно созданных) помех или шумов от самых различных источников.

*Уровень шумов* в линии связи принято характеризовать отношением мощности сигнала к мощности шума  $P_c/P_{ш}$ , определяемым в децибелах. Обычно на выходе линий связи это отношение составляет 20 ... 30 дБ.

По мере прохождения сигнала по линии связи его мощность из-за наличия активных потерь уменьшается, т.е. линия связи вызывает определенное затухание сигнала. *Затухание* численно определяет, во сколько раз уменьшается мощность сигнала при прохождении его по линии связи определенной протяженности. Для измерения затухания используют логарифмическую единицу отношения непер (Нп). Затухание 1 Нп/км означает, что мощность сигнала при прохождении 1 км уменьшается в  $e = 2,72$  раза. Чем меньше затухание в линии связи, тем на большее расстояние можно передать по ней сигнал без дополнительного усиления, т.е. тем больше дальность действия линии связи.

Как уровень шумов, так и затухание в линии связи не одинаковы на различных частотах. Поэтому для передачи сигналов выбирают такие диапазоны частот, на которых мощность шумов и затухание имеют минимальные значения. Диапазон частот, в котором обеспечивается передача сигналов при заданных уровне шумов и затухании, называется *полосой пропускания*  $\Delta f$  линии связи.

Наиболее полно линия связи характеризуется информационными параметрами и прежде всего пропускной способностью. Под *пропускной способностью* понимают максимальное количество информации, которое можно передать по линии связи в единицу времени без ошибок. Пропускная способность определяется по формуле Шеннона, бит/с:

$$C = \Delta F \log_2(1 + P_c/P_{ш}).$$

Таким образом, увеличить пропускную способность линии связи можно расширением полосы пропускания  $\Delta f$ , увеличением мощности сигнала  $P_c$  и снижением мощности шума  $P_{ш}$ .

Рассмотрим основные виды линий связи.

Практически во всех системах телемеханики применяются *электрические* линии связи, в которых для передачи сообщений используются электромагнитные колебания. Для работы под водой находят применение *акустические* линии связи.

Электрические линии связи принято делить на две большие группы: проводные и беспроводные, а проводные линии, в свою очередь, подразделяются на воздушные и кабельные.

Воздушные линии связи — это стальные, медные или биметаллические провода, с помощью изоляторов прикрепленные к опорам. Уровень шумов и затухание в таких линиях довольно высоки, поэтому полоса пропускания их составляет 150... 160 кГц. Надежность воздушных линий также низкая.

Значительно более высокие характеристики имеют подземные кабельные линии связи. Полоса пропускания подземных симметричных кабельных линий достигает 1 МГц, коаксиальных — 50 МГц и более. Благодаря широкой полосе пропускания и высокой надежности кабельные линии широко применяются для обеспечения дальней связи, хотя стоимость их сравнительно высока.

Для компенсации затухания сигнала при передаче его на большие расстояния через каждые несколько десятков километров в линию включают промежуточные усилители. В настоящее время в кабельных линиях связи стало возможным использование оптического диапазона за счет применения лазеров и волоконной оптики. Это резко повышает полосу пропускания кабельных линий.

Для снижения стоимости телемеханических систем в качестве линий связи стремятся использовать линии, предназначенные для других целей. Так, широкое применение для передачи сигналов телемеханики находят линии электропередачи, которые кроме выполнения своей основной функции — передачи электрической энергии постоянного или переменного тока промышленной частоты 50 Гц обеспечивают передачу сигналов телемеханических систем на частотах от 30 до 500 кГц. При этом используется специальная аппаратура подсоединения и обработки (АПО).

В качестве линий связи в телемеханике используют также контактные сети, предназначенные для электрического транспорта.

Для передачи телемеханических сигналов на большие расстояния в целях управления подвижными объектами и в космических системах применяют беспроводные линии связи: радио и лазерные.

Для передачи сигналов телемеханики по радиолиниям используют диапазон дециметровых волн (от 300 до 3000 МГц), в котором достаточно низкий уровень шумов. Для увеличения дальности действия сигнала и уменьшения помех в передатчиках и приемниках радиолинии используют остронаправленные антенны. Практически радиоволны дециметрового диапазона могут использоваться только в пределах прямой видимости, которая ограничена кривизной земной поверхности. Поэтому передачу сигналов

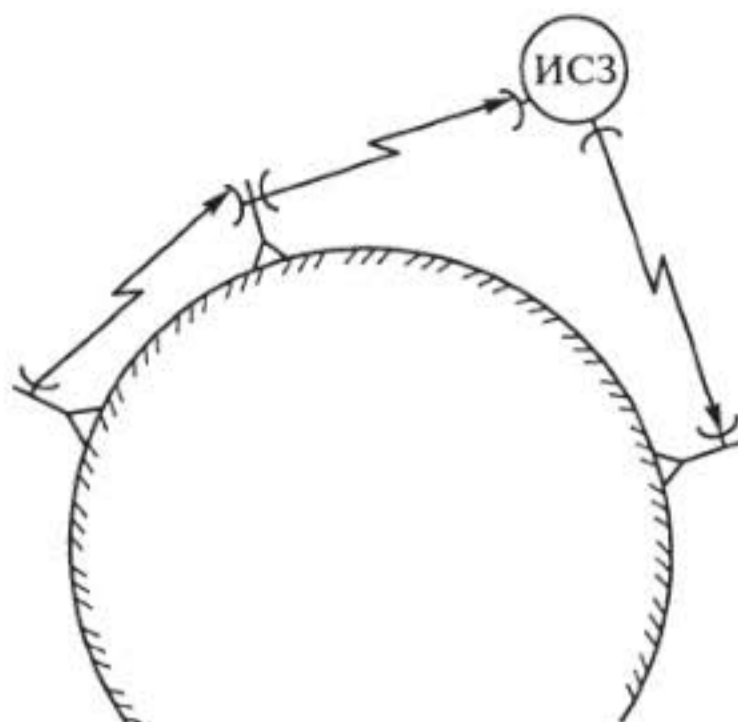
на большое расстояние осуществляют по радиорелейным линиям (рис. 14.6), устанавливая между передатчиком и приемником через каждые 40...60 км промежуточные ретрансляционные пункты, которые обеспечивают прием сигнала, отделение его от помех, усиление и затем дальнейшую передачу. Все чаще в качестве ретрансляционных пунктов используют искусственные спутники Земли (ИСЗ), например спутники «Молния» в системах передачи информации «Орбита».

Огромными возможностями обладают лазерные линии связи, в которых может использоваться чрезвычайно широкий диапазон частот от радиоволн до видимого света ( $10^5 \dots 2,3 \cdot 10^{18}$  Гц). Излучения этого диапазона довольно быстро затухают в земной атмосфере, поэтому применение беспроводных лазерных линий связи наиболее перспективно для космических систем, а в земных условиях они используются только на расстоянии не более десятка километров.

В настоящее время специальные линии связи, предназначенные только для передачи телемеханической информации, используются лишь при небольших расстояниях между ПУ и КП (например, в пределах одного предприятия), а также для управления подвижными объектами.

В линиях связи и сетях связи общего назначения для передачи сигналов систем телемеханики предоставляются в основном каналы двух типов: телефонные (тональной частоты — ТЧ) и телеграфные (тонального телеграфирования — ТТ), параметры которых стандартизированы. Диапазон пропускаемых частот телефонного канала от 300 до 3400 Гц, телеграфного — от 0 до 120 Гц. Для высокоскоростных систем передачи данных могут предоставляться широкополосные каналы с полосой пропускания до 12 МГц и более, параметры которых также стандартизированы.

Устройства телемеханики могут занимать (или абонировать) каналы связи постоянно либо лишь на время передачи сигнала. В первом случае канал называется *выделенным*, во втором — *коммутируемым*. В зависимости от возможного направления передачи сигналов различают каналы *симплексные* (сигналы передаются в одном направлении), *дуплексные* (возможна передача сигналов в обоих направлениях одновременно) и *полудуплексные* (направле-



14.6. Радиорелейная линия с использованием искусственного спутника Земли

ние передачи сигналов может быть изменено в любой момент времени).

Использование стандартных каналов связи, естественно, требует унификации и стандартизации как самих телемеханических устройств, так и сигналов, несущих информацию.

#### 14.4. Методы преобразования сигналов

Электрические сигналы, подлежащие передаче в системах телемеханики, в большинстве случаев лежат в низкочастотной части спектра (в диапазоне от нуля до нескольких десятков герц). Непосредственная передача этих сигналов между ПУ и КП иногда используется в так называемых *системах интенсивности*, но дальность действия подобных систем ограничена и редко превышает несколько десятков метров, так как низкочастотные сигналы наиболее сильно подвержены воздействию помех при передаче их на большие расстояния. Так как полоса пропускания воздушных линий связи обычно начинается от 0,5 кГц, для согласования низкочастотного сигнала с высокочастотной линией связи производят перенос спектра передаваемого сигнала в высокочастотную область.

Для этого низкочастотный сигнал приводят в однозначное соответствие с одним из параметров высокочастотного колебания, называемого *несущим*. Такое преобразование спектра называют *модуляцией*, а устройство, осуществляющее модуляцию, — *модулятором*. Существуют непрерывные, импульсные и цифровые методы модуляции.

##### Непрерывные методы модуляции

В непрерывных методах модуляции в качестве несущего используют непрерывное гармоническое колебание, вырабатываемое высокочастотным генератором. В зависимости от того, какой именно параметр несущего колебания изменяется в соответствии с изменением низкочастотного сигнала, различают модуляции амплитудную (АМ), частотную (ЧМ) и фазовую (ФМ).

Рассмотрим *амплитудную* модуляцию (рис. 14.7). Пусть имеются модулирующий входной сигнал  $x(t) = X \cos \Omega t$  (см. рис. 14.7, а) и несущее гармоническое колебание  $u(t) = U_0 \cos \omega_0 t$  (см. рис. 14.7, а), причем несущая частота  $\omega_0$  значительно больше частоты входного сигнала  $\Omega$ , а начальные фазы  $x(t)$  и  $u(t)$  примем равными нулю. В результате модуляции амплитуда несущего колебания становится связанной с модулирующим сигналом следующим образом:

$$u(t) = U_0 + kX \cos \Omega t = U_0(1 + m \cos \Omega t),$$

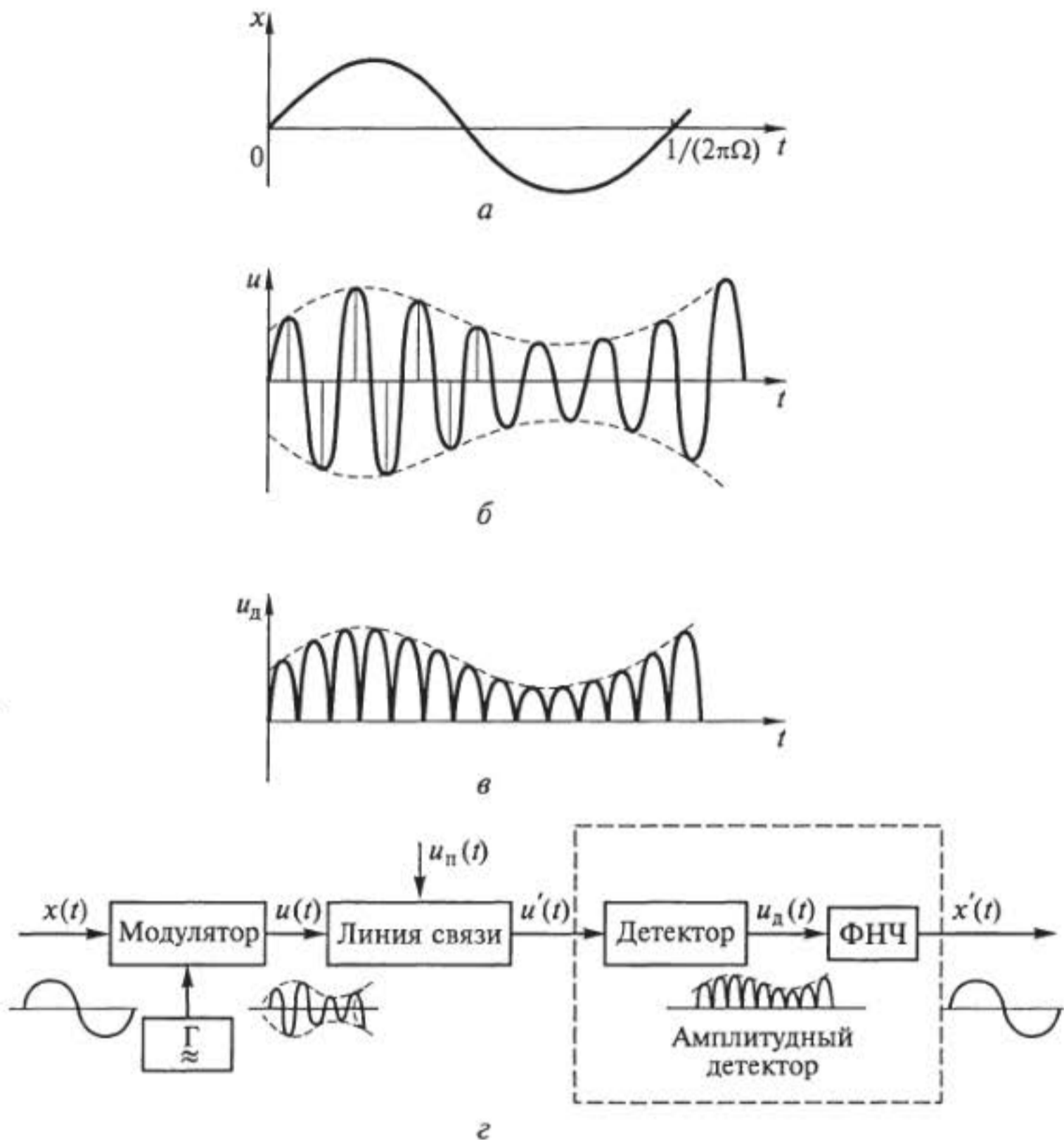


Рис. 14.7. Амплитудная модуляция:

$a$  — входной сигнал;  $b$  — модулированный сигнал;  $c$  — детектированный сигнал;  $d$  — структурная схема преобразования сигнала

где  $U_0$  — амплитуда несущего сигнала;  $X$  — амплитуда входного сигнала;  $m = kX/U_0$  — коэффициент модуляции.

Тогда выражение для модулированного сигнала будет иметь вид

$$u(t) = U_0(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega_0 t.$$

Раскрыв скобки, по теореме произведения косинусов получим

$$u(t) = U_0 \left[ \cos \omega_0 t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t \right],$$

т. е. модулированный сигнал состоит из трех составляющих с частотами  $\omega_0$ ,  $\omega_0 + \Omega$  и  $\omega_0 - \Omega$  и соответственно с амплитудами  $U_0$  и

$m \frac{U_0}{2}$ . Следовательно, полоса пропускания линии связи должна быть для такого сигнала не менее  $2\Omega$ .

Если входной сигнал  $x(t)$  является периодическим с частотой  $\Omega$ , но имеет сложную форму, то его согласно преобразованию Фурье можно представить в виде суммы составляющих гармоник с частотами  $\Omega, 2\Omega, 3\Omega$  и т. д. Соответственно в спектре модулированного сигнала появятся составляющие с частотами  $\omega_0 \pm 2\Omega, \omega_0 \pm 3\Omega$  и т. д. При импульсных и непериодических входных сигналах этот ряд оказывается бесконечным, но мощность высших гармонических составляющих очень мала, и практически спектр модулированного сигнала можно считать ограниченным.

Таким образом, независимо от формы сигнала  $x(t)$  в результате модуляции происходит перенос его спектра из низкочастотной области в высокочастотную: с частоты  $\Omega$  на частоту  $\omega_0 \pm \Omega$ . Частота высокочастотного колебания  $\omega_0$  выбирается в зависимости от вида и полосы пропускания линии связи. Само по себе модулированное колебание информации не несет, поэтому при приеме производят его обратное преобразование, выделяя исходный низкочастотный сигнал. Такое преобразование называется *демодуляцией*, а соответствующее устройство *демодулятором*.

Для демодуляции АМ-колебаний сигнал  $u(t)$  пропускают через амплитудный детектор, в качестве которого используют одно- или двухполупериодный выпрямитель. В результате получают демодулированный сигнал  $u_d(t)$ , форма которого (для двухполупериодного выпрямителя) показана на рис. 14,7, в. В этом сигнале присутствует исходная составляющая с частотой  $\Omega$ , для выделения которой используют фильтр низких частот (ФНЧ) с соответствующей АЧХ.

Существенным недостатком метода амплитудной модуляции является его низкая помехоустойчивость. Это происходит потому, что сигнал помехи  $u_n(t)$  с частотой  $\Omega_n$ , всегда присутствующий в линии связи, складываясь с полезным сигналом  $u(t)$ , изменяет прежде всего его амплитуду. А так как амплитуда АМ-колебания является информативным параметром, то после демодуляции выделенный сигнал  $x'(t)$  (см. рис. 14.7, г) заметно отличается от переданного сигнала  $x(t)$ .

При *частотной* модуляции частота несущего колебания изменяется в соответствии с информационным сигналом  $x(t)$  (рис. 14.8):

$$u(t) = U_0[\cos \omega_0 + \Delta\omega x(t)]t,$$

где  $\Delta\omega$  — девиация частоты.

При *фазовой* модуляции изменяется фаза несущего колебания в соответствии с информационным сигналом:

$$u(t) = U_0[\cos \omega_0 t + \Delta\phi x(t)],$$

где  $\Delta\phi$  — девиация фазы.



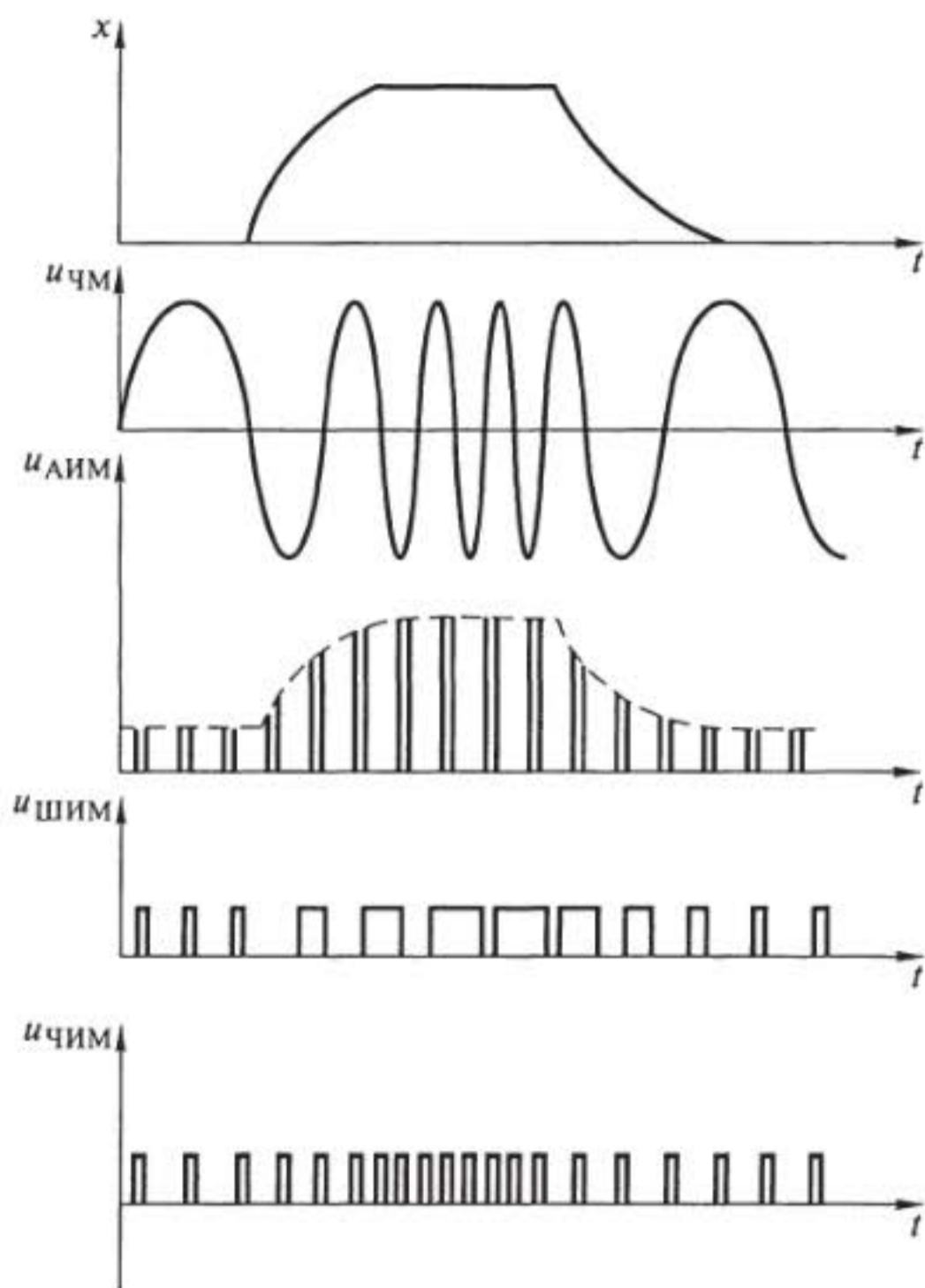


Рис. 14.8. Некоторые виды модуляции

При частотном и фазовом методах модуляции требуется более широкая полоса пропускания линии связи, чем при амплитудном, но зато они значительно более помехоустойчивы.

Для того чтобы обеспечить двустороннюю передачу сигналов, на каждом конце линии связи должны быть и модулятор, и демодулятор. В совокупности такое устройство называют *модем*. В системах передачи данных модем является основной частью устройства преобразования сигналов (УПС).

### Импульсные методы модуляции

В импульсных методах модуляции несущим колебанием является периодическая последовательность прямоугольных импульсов. Модулятор в соответствии с изменением низкочастотного сигнала изменяет какой-либо параметр этой последовательности (см. рис. 14.8) импульсов: амплитуду (*амплитудно-импульсная модуля-*

ция — АИМ), частоту (*частотно-импульсная* модуляция — ЧИМ), длительность (*широотно-импульсная* модуляция — ШИМ), момент появления (*фазоимпульсная* модуляция — ФИМ) и др.

Принципиальное отличие импульсных методов модуляции от непрерывных заключается в том, что с их помощью можно передавать значения сигнала лишь в отдельные моменты времени — моменты передачи очередных импульсов. Следовательно, непрерывные сигналы (например, телеметрические) при импульсной модуляции необходимо подвергать квантованию по времени. Структурная схема системы с импульсной модуляцией аналогична схеме, показанной на рис. 14.7, з. Для демодуляции сигнала необходимо измерять тот параметр импульсов, который несет информацию (амплитуду, длительность, частоту и т. д.).

### Цифровые методы модуляции

Рассмотренные ранее методы модуляции позволяют в принципе абсолютно точно передать значение сигнала (непрерывные — в любой момент времени, импульсные — в отдельные моменты времени). Однако точность передачи при практическом использовании этих методов ограничена воздействием помех и неидеальностью характеристик модулятора, линии связи, демодулятора и других устройств, участвующих в передаче сигнала.

Несравнимо более высокую точность передачи сигнала обеспечивают дискретные, или цифровые, методы модуляции, так как в этом случае сигнал подвергается квантованию как по времени, так и по уровню.

При этом, увеличивая число уровней квантования (и соответственно разрядность кода), можно сделать ошибку квантования по уровню сколь угодно малой. Естественно, что за это приходится расплачиваться увеличением времени передачи сигнала или расширением требуемой полосы пропускания линии связи (если увеличивать частоту следования импульсов). Представление дискретного по времени и уровню сигнала в виде цифрового кода осуществляется по определенным правилам в соответствии с принятым методом кодирования. Устройства, осуществляющие кодирование сигнала и его обратное преобразование — декодирование, называют соответственно *кодером* и *декодером*.

Так как при цифровых методах модуляции информацию несет не какой-либо параметр импульсов, а вид кодовой комбинации, то при приеме нет необходимости измерять искаженные в линии связи амплитуду, длительность или частоту импульсов с неизбежной при этом ошибкой измерения. Следует только решить, есть импульс в определенный момент времени или его нет. Этим обстоятельством и объясняются столь высокие точность и помехоустойчивость цифровых методов модуляции. Так, если точность не-

прерывных и импульсных систем ТИ составляет 0,5...1,0 %, то цифровые системы позволяют достигнуть точности 0,05...0,1 % и выше.

Цифровые методы модуляции обеспечивают передачу информации без накопления ошибок за счет преобразования сигнала в пунктах ретрансляции (см. рис. 14.6), что позволяет создавать системы с практически неограниченной дальностью действия. Кроме того, цифровые сигналы не требуют дополнительных преобразований при вводе-выводе из ЦВМ, широко применяемых в телемеханике.

Все это обусловило исключительное использование цифровых методов для передачи телемеханической информации.

### 14.5. АСУ технологическими процессами и производством

Одной из областей применения средств телемеханики является построение на их основе АСУ технологическими процессами и производством.

*Автоматизированная система управления технологическими процессами (АСУ ТП)* — это система для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический процесс в соответствии с принятым критерием управления. Автоматизированной она называется потому, что является человеко-машинной системой, т. е. предполагает участие в управлении и ЭВМ, и человека-оператора.

Основными причинами необходимости участия человека в процессе управления являются недостаточная гибкость и надежность автоматической системы. Возникновение непредвиденных ситуаций в ОУ или случайный сбой в системе управления (прежде всего в ЭВМ) при отсутствии оператора могут привести к возникновению аварийного режима; оператор в данном случае выполняет функции контроля действий автоматической части системы. Также причинами участия человека в управлении технологическими процессами являются сложность в отдельных случаях стыковки ЭВМ с регуляторами и экономические соображения.

Степень участия оператора в работе АСУ может быть различной (рис. 14.9). В одних случаях ЭВМ используют только для сбора

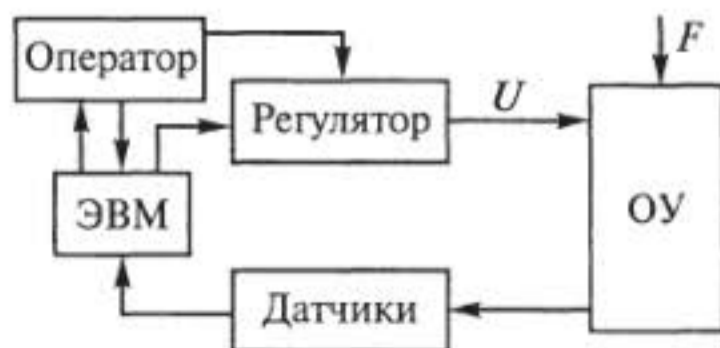


Рис. 14.9. Схема участия оператора и ЭВМ в АСУ

и предварительной обработки данных о ходе технологического процесса, а формирование и выдачу управляющих воздействий осуществляет оператор; в других — ЭВМ производит расчеты и предлагает оператору оптимальные варианты управления и т.д. Соответственно различают информационные, управляющие и вспомогательные функции АСУ ТП.

*Информационными функциями АСУ являются:*

контроль соответствия технологических параметров процесса заданным значениям;

измерение отдельных параметров процесса по запросу оператора;

отображение и регистрация информации о ходе технологического процесса;

обнаружение и сигнализация о возникновении опасных и аварийных ситуаций;

расчет оптимальных режимов работы оборудования и вариантов управления.

К *управляющим* функциям АСУ ТП относятся автоматическая выдача управляющих воздействий на технологические объекты, а также автоматические пуск и остановка различного оборудования.

*Вспомогательные* функции включают в себя учет выпуска продукции и загрузки оборудования, связь данной АСУ с АСУ верхнего уровня, а также автоматическую диагностику и контроль функционирования системы. Чем совершеннее и надежнее автоматизированная система, тем больше функций по реализации управления она осуществляет автоматически.

Системы АСУ ТП используют для управления самыми различными объектами; укажем наиболее типичные из них:

группа станков с ЧПУ, для которых необходимо обеспечить оптимальную загрузку;

парогенераторная установка большой мощности, представляющая собой сложный объект с экстремальной характеристикой и переменными параметрами;

автоматическая линия производства интегральных схем, в которой несколько десятков различных технологических установок;

нефтепровод большой протяженности, в котором расстояние между пунктом управления и контролируемые пунктами может составлять тысячи километров;

атомный реактор, энергоблок на электростанции, доменная печь и т.д.

Таким образом, АСУ ТП в общем случае представляет собой многоточечную систему, в которой широко применяются средства вычислительной техники различной сложности, а передача информации осуществляется средствами телемеханики.

Для того чтобы при большом разнообразии ОУ конкретные АСУ ТП можно было проектировать на основе типовых блоков,

используют принцип *агрегатизации структуры* — возможность компоновки системы из унифицированных автономных функциональных блоков различного назначения, которые легко стыкуются между собой.

Существует агрегатная система средств телемеханической техники (АССТТ), номенклатура функциональных блоков которой позволяет компоновать телемеханические комплексы самого различного назначения.

Типовыми блоками АССТТ являются аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, преобразователи кодов, коммутаторы, блоки управления выполнением отдельных телемеханических функций, блоки оперативной памяти, устройства обработки информации, блоки синхронизации, блоки сопряжения с различными устройствами ввода-вывода и др. Агрегатная система средств телемеханической техники входит в Государственную систему приборов (ГСП). Комплексы АССТТ могут работать по различным каналам связи: по выделенной физической цепи, по телеграфным и телефонным каналам (как выделенным, так и коммутируемым), а также по радиоканалам.

Для обеспечения необходимой надежности АСУ ТП в комплексах АССТТ предусматриваются многократное резервирование аппаратуры, защитное кодирование и обратная связь при передаче информации.

Допускается сопряжение АССТТ с системами вычислительной техники. В процессе эксплуатации возможности конкретных комплексов могут быть легко расширены за счет наращивания аппаратуры и замены отдельных блоков. Назовем выпускающиеся отечественной промышленностью комплексы АССТТ:

ТМ-120 для построения автоматизированной системы управления технологическими процессами трубопроводного транспорта;

ТМ-800 для электростанций и других предприятий с сосредоточенными объектами;

ТК-210 для управления системами жилищно-коммунального хозяйства.

Указанные системы обеспечивают централизацию управления из одного ПУ, причем все их функции реализуются чисто аппаратным путем.

В настоящее время происходит переход к выпуску телемеханических комплексов второй очереди АССТТ-2, основанных на микропроцессорах и микроЭВМ. В этих комплексах значительно расширяются функции КП, обеспечивается возможность перепрограммирования, что позволяет строить как централизованные, так и децентрализованные АСУ ТП. В целом комплексы АССТТ-2 представляют собой многомашинные системы, в которых происходит обмен информацией между ЭВМ контролируемых пунктов и пункта управления.

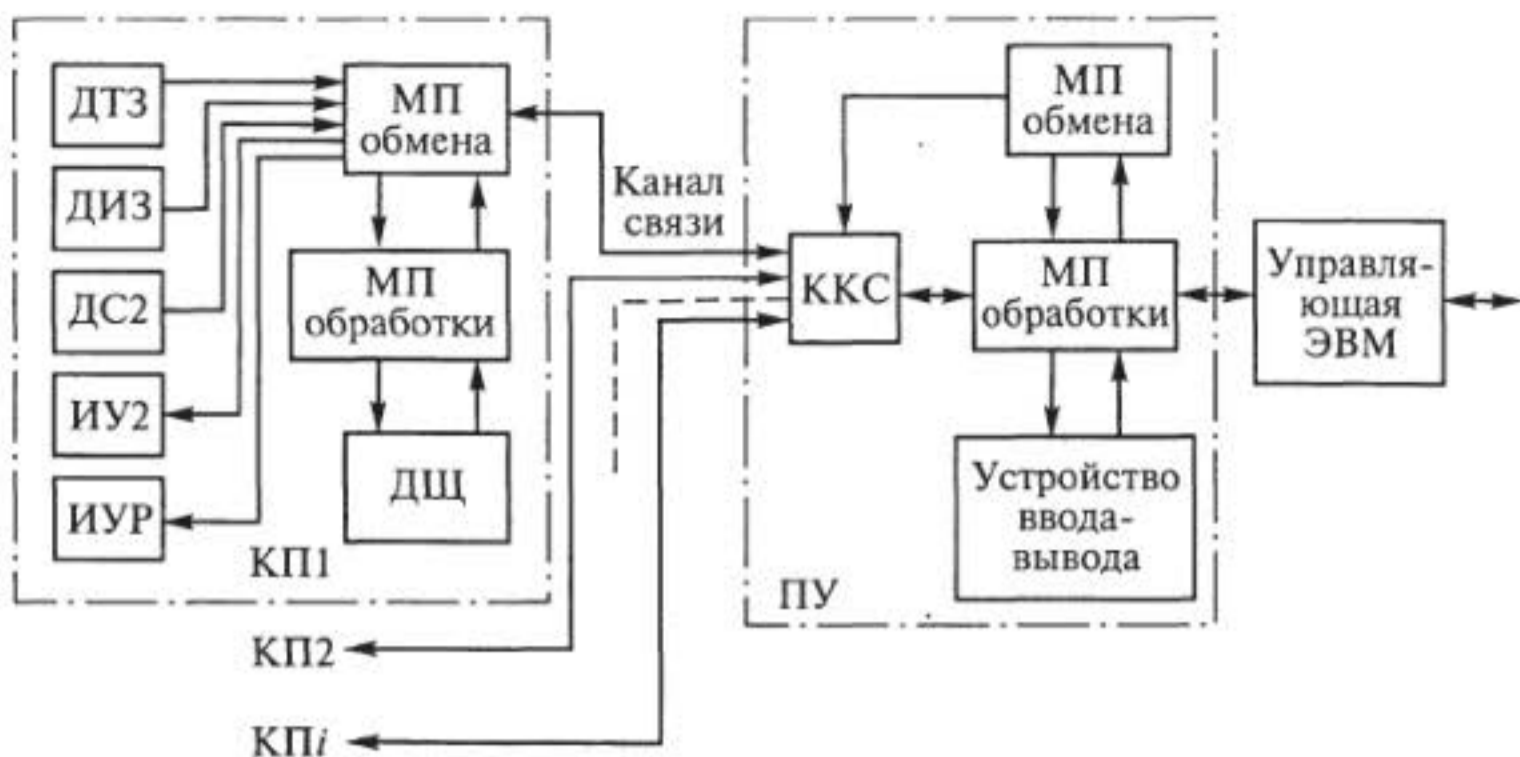


Рис. 14.10. Обобщенная структурная схема АСУ ТП

Рассмотрим обобщенную структурную схему АСУ ТП (рис. 14.10). Основой КП являются два микропроцессора (МП), один из которых обеспечивает сбор и обмен информацией, а другой — ее обработку и воспроизведение.

Микропроцессор обмена обслуживает до 512 датчиков текущих значений — ДТЗ (телеизмерение текущее) до 256 датчиков интегральных значений — ДИЗ (телеизмерение интегральное) до 512 датчиков состояний двухпозиционных объектов — ДС2 (телесигнализация). Он также выдает около ста двухпозиционных команд соответствующим исполнительным устройствам — ИУ2 (телеуправление) и уставки (предписанные значения) местным регуляторам — ИУР (телерегулирование) и управляет обменом информацией по каналу связи с ПУ или другими КП. Конечно, сигналы всех датчиков и команды должны быть унифицированы.

Микропроцессор обработки производит предварительное сжатие передаваемых данных, хранит уставки, обеспечивает вывод информации на местный диспетчерский щит (ДЩ).

При отказе одного микропроцессора другой выполняет его функции, обеспечивая работоспособность КП, но с меньшей скоростью.

Аналогично построен и пункт управления, также содержащий два микропроцессора. Коммутатор каналов связи (ККС) под управлением микропроцессора обмена обеспечивает связь с сотней и более КП по различным каналам, позволяя строить быстродействующие САУ с самой различной структурой (радиальной, кольцевой, древовидной и т.д.). Функциями микропроцессора обработки ПУ являются реализация принятого алгоритма управления, прогнозирование аварийных ситуаций, регистрация простоев оборудования, преобразование телемеханических адресов в техноло-

гические наименования, управление вводом-выводом информации. Микропроцессор обработки обеспечивает связь с управляющей ЭВМ, а через нее — с ЭВМ высшего уровня, позволяя строить иерархические системы.

Рассмотренные схемы соответствуют управляющему вычислительному телемеханическому комплексу УВТК-300, предназначенному для АСУ ТП предприятий химической, металлургической и горнодобывающей промышленности; аналогично построен комплекс широкого применения ТК-301 и другие комплексы АССТТ-2. Все они имеют достаточно совершенное математическое обеспечение, затраты на которое уже сейчас достигают 60...70% от общей стоимости системы. В дальнейшем, очевидно, будет происходить все более полное слияние систем телемеханики, передачи данных и средств вычислительной техники.

В САУ процесс управления осуществляется полностью автоматически, без участия человека; в АСУ ТП человек участвует в управлении лишь в силу несовершенства системы. В отличие от этих систем автоматизированные системы управления производством (АСУП) специально предназначены для совершенствования и оптимизации взаимодействия человека с производством (а более широко — с окружающей средой) с учетом экономических и социальных факторов. Автоматическая система управления производством включает в себя человека и как «управляющее устройство», и как «объект управления».

Управление производством обычно осуществляется в условиях большого числа задающих воздействий (показатели выпуска продукции, номенклатура, себестоимость, прибыль и т.д.), разнообразных и трудно учитываемых возмущающих воздействий (качество и ритмичность поступления сырья, исправность оборудования, производительность труда, число работающих и т.п.) и различного рода ограничений (скорость протекания технологических процессов, производственная мощность предприятия, штат, квалификация работников и пр.). В столь сложной системе трудно выделить какой-либо один критерий оптимальности. Чаще всего в качестве такого критерия (как наиболее универсального) используют прибыль.

С технической точки зрения процесс управления производством сводится к сбору и обработке больших массивов информации, что позволяет выработать оптимальный алгоритм управления. Естественно, что для этого используют соответствующие технические средства и прежде всего ЭВМ. Таким образом, автоматическая система управления — это человеко-машинная система, обеспечивающая автоматизированный сбор и обработку информации, необходимой для оптимизации управления в различных сферах человеческой деятельности.

АСУ строятся по иерархическому принципу, при котором система низшего уровня является соподчиненной частью системы

высшего уровня. В зависимости от уровня управления различают общегосударственную автоматизированную систему (ОГАС), отраслевые автоматизированные системы управления (ОАСУ), автоматизированные системы управления предприятием (АСУП) и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

В зависимости от выполняемых функций выделяют автоматизированные системы организации управления (куда относятся ОГАС, ОАСУ, АСУП), а также территориальные и технологические АСУ.

Системы организации управления оперируют с информацией, представленной в основном в виде документов. В АСУ ТП носителями информации являются электрические сигналы. Все шире развиваются интегрированные АСУ, выполняющие и организационные, и технологические функции.

Любая автоматическая система управления состоит из математических, программных средств и комплекса технических средств (КТС). На рис. 14.11 представлена структура КТС интегрированной АСУП. Объектом управления такой системы является производственный процесс, в результате протекания которого ресурсы предприятия (материалы, энергия, оборудование, рабочая сила) преобразуются в продукцию предприятия.

Для обработки информации в АСУП может использоваться одна или несколько ЭВМ средней производительности с высокоразвитой системой ввода-вывода, установленные в вычислительном центре (ВЦ) предприятия.

Наряду с обработкой информации на ЭВМ все в большей степени возлагаются функции по реализации принятого алгоритма управления, обеспечивающего оптимальное протекание управляемого производственного процесса.

Для сбора информации о ходе производственного процесса используют как различные автоматические устройства (датчики, устройства счета продукции и т. д.), так и устройства ручного ввода. Простейшими устройствами для сбора информации являются устройства подготовки данных (УПД) на машинных носителях. Устройства ручного ввода обычно входят в состав комбинированных устройств ввода-вывода информации, а их конкретный состав и функциональные возможности определяются тем, для связи с каким именно работником они предназначены: с оператором, кладовщиком, бухгалтером, инженером или руководителем предприятия.

Специально для АСУП разработаны регистраторы производства, позволяющие вводить информацию с клавиатуры, а также с предварительно подготовленных машинных носителей. Некоторые модели регистраторов допускают предварительную обработку информации.



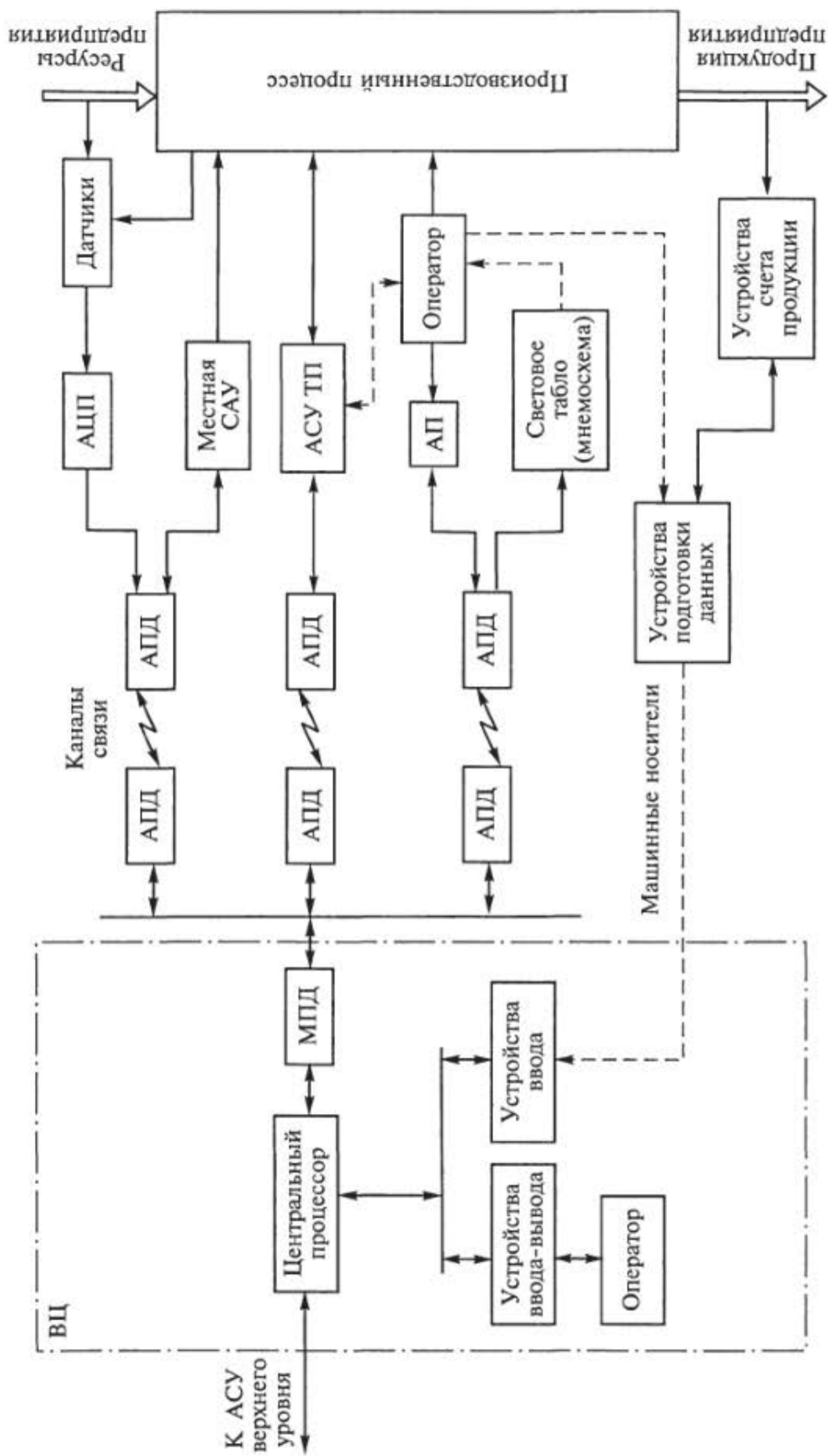


Рис. 14.11. Структура комплекса технических средств интегрированной АСУП

Наиболее универсальными устройствами ручного сбора информации в АСУ являются разработанные в рамках ЕС ЭВМ *абонентские пункты* (АП), содержащие устройства ввода информации с клавиатуры и различных машинных носителей; устройства вывода информации на экранные пульта (дисплеи), а также печатающие устройства и графопостроители, позволяющие вести обмен как знаковой, так и графической информацией.

Устройства управления абонентских пунктов реализуют алгоритм работы, обеспечивающий режим активного диалога оператора с ЭВМ, производя подключение АП к каналам связи; преобразуя внутренний код представления информации АП в код передачи; обеспечивая работу выносных пультов, подключаемых к данному АП; позволяя производить предварительную обработку информации в автономном режиме.

Наиболее совершенные модели АП, содержащие собственные запоминающие устройства и допускающие возможность перепрограммирования, являются, по сути, мини-ЭВМ.

Для передачи информации в АСУ используют системы передачи данных, содержащие аппаратуру передачи данных, каналы связи и мультиплексоры передачи данных (МПД).

В состав аппаратуры передачи данных (АПД) входят:

устройства преобразования сигналов (модемы для телефонных и телеграфных каналов) к виду, пригодному для передачи по каналам связи;

устройства защиты от ошибок, обеспечивающие помехоустойчивое кодирование и декодирование передаваемой информации;

устройства автоматического вызова и ответа, предназначенные для автоматического установления соединений с требуемым абонентом при работе по коммутируемым каналам связи.

Вид используемых в АСУ каналов связи определяется расстоянием между источником и получателем информации, объемом передаваемых данных, требованиями к достоверности их передачи. Обычно используются стандартные телеграфные (при скорости передачи до 200 бит/с) и телефонные (при скорости передачи до 9600 бит/с) каналы связи как выделенные (т.е. постоянно закрепленные за данной парой источник—получатель), так и коммутируемые.

Для сопряжения каналов связи с каналами ввода-вывода ЭВМ используют мультиплексоры передачи данных, которые производят подключение требуемого АП к ЭВМ, управляют процедурой обмена информацией с учетом особенностей конкретного АП (режима обмена, метода синхронизации, метода защиты от ошибок, кода и скорости передачи). Удаленные МПД (УМПД) используются для объединения нескольких низкоскоростных каналов связи в один высокоскоростной канал путем частотного или временного уплотнения.

Управляющие воздействия на производственный процесс в АСУП осуществляются как автоматически непосредственно от ЭВМ, так и вручную через операторов и других работников предприятия. Автоматические воздействия осуществляют различные исполнительные устройства и местные автоматические регуляторы, уставки для которых рассчитывает ЭВМ. Для осуществления ручных управляющих воздействий производят вывод управляющей информации из ЭВМ в удобной для восприятия человеком форме. Для этого используют различные печатающие устройства, графопостроители и экранные пульта, подключаемые как автономно, так и в составе АП.

В АСУП применяют также различные специализированные устройства индикации (световые табло, мнемосхемы), позволяющие персоналу следить за ходом производственного процесса и оперативно воздействовать на него.

АСУП обычно связана с АСУ более высокого уровня (отраслевой или территориальной). Технически это означает связь между ЭВМ АСУП и соответствующей ЭВМ высшего уровня. Для осуществления такой связи может использоваться общегосударственная система передачи данных (ОГСПД).

Комплекс технических средств АСУ всегда разрабатывается как открытая система, позволяющая легко изменять его состав, например при изменении технологии производства или расширении функций АСУ.

В настоящее время АСУ внедряются в самые различные сферы человеческой деятельности: строительство и транспорт, научные исследования и статистику, торговлю и бытовое обслуживание и т.д. Соответственно расширяется номенклатура и совершенствуются характеристики устройств ввода-вывода систем передачи данных и, конечно, вычислительных систем.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое телемеханика?
2. Какова структурная схема телемеханической системы?
3. Какие виды линий связи используются в телемеханических системах?
4. Что представляют собой одноуровневая и многоуровневая системы телемеханики?
5. Каково назначение систем телеизмерения, телеуправления, телерегулирования и передачи данных?
6. Каково назначение основных элементов телемеханики: источника информации, распределителя, передатчика и др.?
7. Каким образом можно уменьшить число каналов связи в системах телемеханики?
8. В чем состоит различие небалансных и балансных систем телеизмерения?

9. Как работает радиорелейная линия связи?

10. Как происходит преобразование сигнала при амплитудной модуляции?

11. Каковы принципы частотной, фазовой и цифровой модуляций сигналов?

12. Какова роль оператора и ЭВМ в автоматизированной системе управления?

13. Поясните обобщенную структурную схему автоматической системы управления технологическими процессами.

14. Как взаимодействуют технические средства интегрированной автоматической системы управления предприятием?

## Экспериментальное определение динамических характеристик объектов регулирования

Наиболее достоверные динамические характеристики действующих промышленных объектов могут быть получены экспериментальным путем. Эти объекты представляют собой, как правило, многоемкостные системы с различными сопротивлениями, запаздываниями и нелинейными зависимостями, поэтому аналитически определить их динамические свойства по конструктивным и физическим данным весьма сложно.

*Методы определения.* При экспериментальном определении динамических свойств объекта анализируют характер переходного или установившегося колебательного процесса, вызванного специально внесенными на вход объекта возмущениями либо случайными эксплуатационными возмущениями.

В первом случае используют, как правило, три типа возмущений:

однократное скачкообразное возмущение, которому соответствует переходный процесс, называемый кривой разгона (или временной характеристикой);

однократное импульсное возмущение, которому соответствует переходный процесс, называемый импульсной характеристикой (или функцией веса);

периодические возмущения, повторяющиеся с определенной частотой, которым соответствует установившийся процесс колебаний выходной величины; по кривым изменения входной и выходной величин определяют частотные характеристики объекта.

Во втором случае динамические характеристики определяют путем статистического анализа кривых изменения во времени обычных эксплуатационных значений входной и выходной величин объекта без внесения специальных возмущений. Однако обработка громоздкого экспериментального материала требует больших усилий, поэтому этот метод не может быть рекомендован для широкого практического использования.

При выборе метода экспериментального определения динамических свойств объекта следует исходить из характера поставленной задачи, условий проведения опытов, допустимых по технологическим требованиям отклонений исследуемой выходной величины объекта и характера случайных эксплуатационных возмущений.

Так, кривые разгона можно получить проще и быстрее, чем частотные характеристики, однако в этом случае отклонения выходной величины от номинального значения обычно значительнее, и случайные эксплуатационные возмущения больше искажают результаты. Следовательно, для выбора регулятора и его настроек вполне достаточно кривых разгона объекта, а для исследования его устойчивости удобнее исполь-

зовать частотные характеристики. Необходимо также иметь в виду, что теория автоматического регулирования позволила создать достаточно простые и достоверные приближенные методы взаимного перестроения этих двух характеристик объекта. Таким образом, если условия проведения опытов на агрегате обуславливают метод определения динамических характеристик, полученные результаты обычно можно представить в форме, наиболее удобной для решения поставленной задачи.

При исследовании сложного, многомерного объекта, переходный процесс в котором зависит от различных физических величин, динамические свойства объекта следует определять отдельно по каждой из этих величин. Таким образом, многомерный объект рассматривается как совокупность соответствующего числа одномерных объектов, переходные процессы в которых протекают независимо друг от друга. При этом предполагают, что перекрестные связи в агрегатах и процессах либо вовсе отсутствуют, либо незначительны, и в первом приближении ими можно пренебречь. Так, конечно, бывает не всегда, но в большинстве случаев это справедливо. Поэтому на реальных объектах практически всегда исследуют какой-либо определенный участок от регулирующего органа до места измерения соответствующей выходной величины.

Объектом регулирования в дальнейшем будем называть (кроме тех случаев, где это специально оговорено) сложное динамическое звено, в сочетании с которым работает регулятор. В это звено входят рассматриваемый участок агрегата, чувствительный элемент и все средства измерения выходной величины, а также регулирующий орган, изменяющий поступление регулирующей среды по команде регулятора (рис. П.1.1). Для того чтобы выбрать регулятор и его настройки, необходимо знать динамические свойства именно такого звена системы регулирования, так как совокупность свойств всех его элементов определяет условия работы регулятора. Поэтому регулятором мы будем называть собственно регулирующее устройство, вырабатывающее по определенному закону регулирующее воздействие и реализующее его через исполнительный механизм.

Таким образом, входной величиной объекта является положение регулирующего органа, следовательно, возможная нелинейность его характеристики будет отражена в характеристиках объекта. Разумеется, следует рассматривать лишь те регулирующие органы, которые войдут в систему автоматического регулирования.

Принять положение регулирующего органа в качестве входной величины целесообразно еще и потому, что его же рассматривают обычно и как выходную величину регулятора. Это упрощает в дальнейшем расчеты.

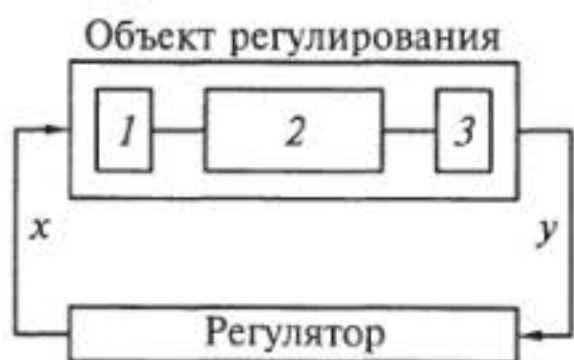


Рис. П.1.1. Объект регулирования в замкнутой системе :

1 — регулирующий орган; 2 — агрегат; 3 — измерительный элемент

Однако, так как неправильно выбранные и рассчитанные регулирующие органы могут ухудшить характеристики объекта и условия работы регулятора, целесообразно наряду с положением регулирующего органа рассматривать и регистрировать входную величину собственно агрегата, т.е. расход регулирующей среды (греющей или охлаждающей жидкости в теплообменных аппаратах; топлива в печах и котлах; воздуха при регулировании процесса горения; жидкости при регулировании уровня и т. п.). Это позволит выявить необходимость замены неудачно выбранных регулирующих органов.

*Нелинейность объекта; перекрестные связи.* Большинство реальных промышленных объектов не являются строго линейными, что всегда следует иметь в виду при изучении их динамических характеристик.

Динамические и статические свойства объекта, как и других звеньев и системы регулирования в целом, характеризуются определенными параметрами — коэффициентами передачи, постоянными времени и др. Нелинейными являются объекты (звенья, системы), параметры которых изменяются при изменении состояния объекта — режима его работы, нагрузки и т. п. Статические характеристики объекта, иллюстрирующие связи между значениями его входных и выходных величин в установившихся состояниях, будут в этом случае нелинейными, а дифференциальные уравнения переходных процессов (динамические характеристики) будут представлять собой нелинейные дифференциальные уравнения, коэффициенты которых зависят от значений переменных.

Нелинейность, если она существенная, приводит к часто наблюдаемому изменению экспериментальных динамических характеристик объектов, особенно при больших возмущениях или значительных изменениях нагрузки объекта. Поэтому определение динамических характеристик объектов, технологическим режимам которых свойственны широкие диапазоны изменения нагрузки, следует проводить при различных режимах (хотя бы при двух видах нагрузки — высокой и пониженной). Сравнение полученных при этом результатов позволит оценить степень нелинейности объекта и допустимые пределы линеаризации его характеристик. На объектах с узким диапазоном изменения нагрузки обычно достаточно провести опыты при номинальном режиме.

В отдельных случаях выходная величина объекта, характеризующая состояние агрегата и ход технологического процесса, может зависеть вследствие наличия перекрестных связей от нескольких входных величин. Тогда необходимо провести опыты с возмущениями по каждой из этих величин отдельно. Полученные результаты позволят оценить степень зависимости между этими величинами. Следовательно, в ходе опытов по определению динамических характеристик целесообразно контролировать, а иногда и регистрировать изменения во времени не только входной и выходной величин объекта, но и тех величин, изменение которых может сказаться на характере переходного процесса. Так, например, исследуя изменение уровня воды в барабане парового котла, при возмущении по расходу воды следует регистрировать также изменения паровой нагрузки и давления пара в барабане, а при возмущении по расходу пара — расход воды; при определении кривой разгона

по температуре в одной из зон многозонной нагревательной печи следует регистрировать расход топлива не только в этой, но и в соседних зонах. Это позволяет лучше контролировать стабильность условий опыта, оценивать достоверность полученных результатов, а иногда и вносить в них необходимые поправки.

**Средства измерения.** В опытах по определению динамических характеристик важен правильный выбор средств измерения и регистрации входных и особенно выходных величин. Если на объекте уже установлена определенная система автоматического регулирования, то для измерения выходной величины следует использовать те измерительные приборы, которые входят в данную систему. В этом случае определяют и затем используют для расчета общие характеристики звена, включающего в себя объект, импульсные линии и измерительный прибор, сигнал от которого поступает на регулятор.

Регистрация изменения входной величины объекта, как правило, не вызывает затруднений. Ее можно производить либо при непосредственном наблюдении, определяя момент внесения возмущения и его величину по указателю положения регулирующего органа, либо по приборам, измеряющим расход соответствующей регулирующей среды. При исследовании быстро протекающих процессов целесообразно снабжать регулирующие органы электрическими датчиками и регистрировать изменения автоматически.

При регулировании сравнительно медленно протекающих процессов (изменений температуры, влажности и др.) выходные (и входные) величины объекта рекомендуется регистрировать с помощью обычного многоточечного прибора, например типа потенциометра ЭПП-09. В общем случае достаточно установить для этого на потенциометре время цикла 5 или 3 с и скорость перемещения диаграммной бумаги до 1440 мм/ч.

Для увеличения масштаба записи измеряемой величины рекомендуется использовать потенциометр с нестандартной градуировкой шкалы (с пределами измерения 2 или даже 1 мВ). При измерении величины таким узкопредельным прибором необходимо «подавить» его нерабочий диапазон. Это можно осуществить, подключив стабилизированный источник тока (сухой элемент) навстречу измеряемой ЭДС через делитель напряжения  $R_3$  специальной приставки (рис. П1.2). Наряду со значительным увеличением масштаба записи при этом повышается точность измерения. Для изменения масштаба регистрации служит реостат  $R_1$  приставки. После прикидочных опытов масштабы регистрации можно скорректировать.

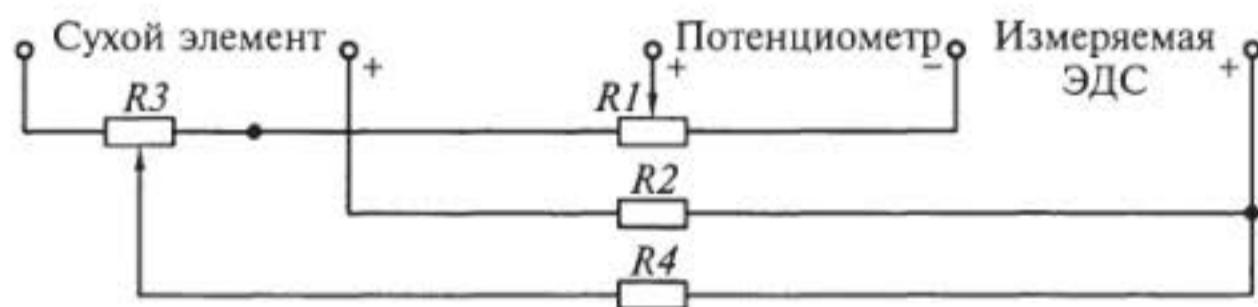


Рис. П1.2. Схема образующей приставки:

$$R_1 = 35 \text{ Ом}; R_2 = 1000 \text{ Ом}; R_3 = 5 \text{ кОм}; R_4 = 2,4 \text{ кОм}$$



Такая регистрация обычно позволяет получать диаграммы, пригодные для непосредственной обработки без дополнительных перестроений. При этом сигнал можно подавать параллельно на регистрирующий и стационарный измерительный прибор.

При определении динамических характеристик объектов с быстро протекающими процессами для измерения таких величин, как давление, разрежение или расход в трубопроводах, в качестве первичных промышленных измерительных приборов с электрическим сигналом на выходе рекомендуется использовать быстродействующие мембранные компенсационные и колокольные дифманометры. Регистрацию измеряемых величин рекомендуется проводить в этих случаях на шлейфовом осциллографе (например, типа МПО-2) при скорости перемещения ленты или бумаги 4... 10 мм/с.

Неправильный выбор чувствительных элементов и другой аппаратуры измерения выходной величины так же, как и регулирующих органов, может привести к искажению действительных динамических характеристик агрегата. Поэтому при проектировании системы автоматического контроля и регулирования (когда еще методы и аппаратуру измерения только предстоит выбрать) целесообразно определять динамические свойства агрегата в «чистом» виде — без искажения их измерительной аппаратурой. К выбору средств измерения и регистрации для подобных опытов необходимо подходить особенно строго.

Все измерительные приборы, состоящие из чувствительных элементов, усилителей и регистрирующих устройств, являются сложными динамическими системами, и их точность определяется также и динамическими свойствами. Поэтому при измерении нестационарных физических величин необходимо наряду с обычными статическими ошибками измерительной аппаратуры учитывать и ее частотный диапазон, т.е. диапазон частот, в котором динамическая ошибка измерения не превышает допустимого значения.

При выборе чувствительных элементов для измерения температуры пламени и газообразных сред следует иметь в виду, что контактные методы обладают значительно большей инерционностью, чем методы оптической пирометрии. Чувствительные элементы оптических пирометров являются оптико-электрическими системами, инерционность которых практически ничтожна. Их частотный диапазон при промышленных измерениях практически неограничен. Применяемые при измерениях усилители электрических сигналов чувствительных элементов, имеющие высокий коэффициент усиления и широкий частотный диапазон, также не вносят заметных искажений. Звеном, вносящим динамическую погрешность, в этих случаях может оказаться регистрирующее устройство, если это обычные промышленные регистрирующие приборы (электронные потенциометры, мосты и др.). Однако этой ошибки можно практически полностью избежать, если воспользоваться для регистрации выходного сигнала шлейфовым или электронно-лучевым осциллографом.

Для измерения температуры нагрева металла, температуры рабочего пространства или других медленно изменяющихся температур объектов с большой тепловой емкостью можно использовать контактные методы

с такими чувствительными элементами, как термопары, термометры сопротивления и манометрические термометры в защитных чехлах. Во многих случаях вносимые ими динамические погрешности невелики. Если же погрешности значительны, их можно исключить, зная динамические характеристики этих чувствительных элементов.

Аналогичные требования к динамике измерения предъявляются и при определении характеристик объекта по влажности, концентрации, содержанию и другим физическим величинам, которые изменяются относительно медленно.

Измерение нестационарных давлений можно производить чувствительными элементами с упругими мембранами и датчиками электрических сигналов на выходе. Верхний предел частотного диапазона неискаженных измерений в этом случае определяется собственной частотой колебаний чувствительного элемента (может быть принят порядка  $10^5$  рад/с для мембранных чувствительных элементов с емкостными или тензометрическим датчиками и датчиками электрического сигнала и  $10^4$  рад/с для элементов с индукционными датчиками), т.е. практически он неограничен. Такие высокие динамические качества этих чувствительных элементов обеспечиваются при размещении их непосредственно в измеряемой среде. Импульсные линии, соединяющие объект с прибором, и другие дополнительные емкости сужают частотный диапазон неискаженных измерений, однако и в этих случаях он достаточно высок для определения динамических характеристик промышленных объектов.

В мембранных приборах компенсационного типа, где положение упругой мембраны стабилизируется автоматически, динамические свойства определяются параметрами применяемой следящей системы; верхний предел частотного диапазона таких приборов, естественно, ниже. В этих случаях ошибка оценивается на основе данных о динамике этих приборов.

Для измерения нестационарных давлений применяют также чувствительные элементы, изменяющие свои физические свойства при изменении давления.

Наибольшее распространение из приборов этой группы получили пьезометрические измерители давления, верхний предел частотного диапазона которых достигает  $2 \cdot 10^5$  рад/с.

При измерении нестационарных расходов обычно используют методы определения перепадов давлений на различных сужающих устройствах, например на диафрагмах, соплах, трубках Вентури. В этих случаях динамика измерений зависит от динамических свойств приборов, применяемых для измерения давления. При этом надо учитывать, что при измерении расхода всегда будут иметь место соединительные импульсные линии и различные дополнительные емкости, снижающие верхний предел частотного диапазона прибора, поэтому чем их меньше, тем лучше.

В тех случаях, когда нужно полностью исключить влияние измерительной аппаратуры, следует использовать практически безынерционные приборы: индукционные расходомеры с постоянным магнитным полем, ионизационные расходомеры с непрерывной ионизацией и ультразвуковые расходомеры (верхний предел частотного диапазона последних может достигать  $10^5$  рад/с).

Регистрацию выходной величины при определении характеристик собственно агрегата по таким параметрам, как давление, разрежение и расход, следует производить только с помощью осциллографа.

### Определение кривых разгона и импульсных характеристик

Кривой разгона отдельного элементарного звена или объекта в целом называется кривая изменения во времени выходной величины в переходном процессе, вызванном однократным и скачкообразным возмущением на входе, т.е. входной величины. При этом предполагается, что возмущение является мгновенным, а следовательно, представляет собой наиболее тяжелую форму возмущающего воздействия.

Кривые разгона статического (с самовыравниванием) и астатического (без самовыравнивания) объектов приведены на рис. П1.3. Характер конкретных кривых разгона зависит от числа емкостей и сопротивлений, составляющих объект, наличия чистого (транспортного) запаздывания и степени самовыравнивания.

*Методика эксперимента.* Для определения кривой разгона объекта, как и любого другого звена системы автоматического регулирования, рекомендуется воспользоваться схемой проведения опытов, приведенной на рис. П1.4.

В опытах прежде всего необходимо добиться установившегося состояния объекта по рассматриваемой величине. Для этого перед внесением возмущения следует поддерживать постоянным или близким к этому значению выходной величины объекта путем стабилизации его входной величины, нагрузки и других величин, влияющих на рассматриваемую выходную величину. Важно также стабилизировать и новое значение входной величины после возмущения до окончания переходного процесса.

До внесения возмущения установившийся режим желательно выдержать хотя бы в течение 2,0 ... 2,5 мин при измерении параметров медленно протекающих процессов (изменения температуры, влажности и т.п.) и 0,3 ... 0,5 мин для более быстро протекающих процессов (изменения расхода, давления и т.п.).

Значение выбранной для данной группы опытов нагрузки определяет начальные установившиеся значения выходной и входной величин объекта. Если допустимые пределы отклонения измеряемой выходной величины ограничены технологическими условиями, начальное установившееся ее значение рекомендуется принимать близким к одному из предельно до-

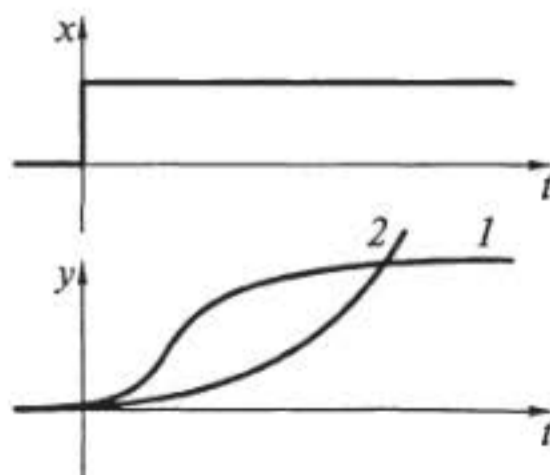


Рис. П1.3. Кривые разгона статического (1) и астатического (2) объектов

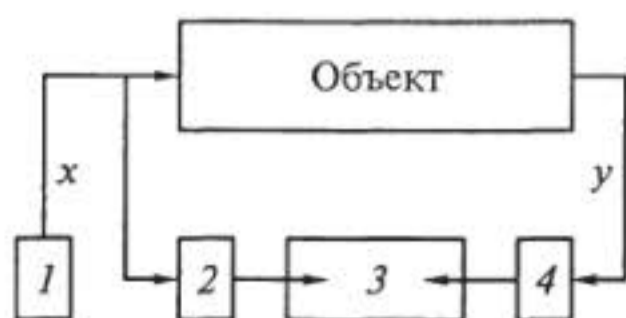


Рис. П1.4. Схема проведения опытов по определению кривой разгона:

1 — панель дистанционного управления регулирующим органом; 2 и 4 — датчики электрического сигнала соответственно входной и выходной величин; 3 — многоточечный регистратор (типа ЭПП-09)

пустимых значений, учитывая при этом предполагаемое направление возмущения и направление изменения выходной величины с тем, чтобы иметь возможность большой диапазон ее изменения.

Возмущение на входе объекта создается регулирующим органом, управляемым вручную или дистанционно.

При выборе значения вносимого возмущения в каждом отдельном случае следует учитывать условия работы объекта: общий уровень случайных эксплуатационных возмущений (помех), допустимый диапазон отклонений входной и выходной величин, примерный коэффициент передачи.

В общем случае при определении кривых разгона значение вносимого возмущения должно составлять 5 ... 15% от максимально возможного для данного режима значения входной величины. Увеличение вносимых возмущений нецелесообразно, так как это приводит к увеличению влияния нелинейности объекта и заметному нарушению технологического процесса; уменьшение же возмущений, как правило, затрудняет выделение кривой разгона из случайных переходных процессов (помех).

Как следует из определения кривой разгона, возмущение должно вноситься мгновенно, а практически — как можно быстрее. В тех случаях, когда практически мгновенное изменение входной величины невозможно из-за большого времени перемещения регулирующего органа или исполнительного механизма (соизмеримого с запаздыванием), следует учитывать фактическое время возмущения  $t_{\text{в}}$  перемещения регулирующего органа из начального установившегося положения в новое или изменения расхода и при внесении возмущения (рис. П1.5). Впоследствии при обработке данных эксперимента это позволит получить достаточно точную кривую разгона строго по ее определению.

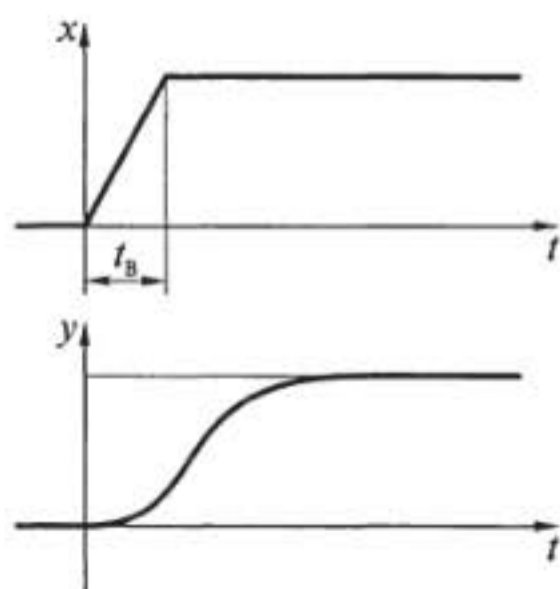


Рис. П1.5. Кривая разгона при немгновенном изменении входной величины

При определении кривых разгона астатических объектов, не обладающих свойством самовыравнивания, переходный процесс заканчивается при достижении установившегося значения скорости изменения выходной величины объекта; после этого можно считать опыт законченным.

Для статических объектов, обладающих самовыравниванием, момент окончания переходного процесса, а следовательно, и опыта является момент достижения нового установившегося значения выходной величины объекта.

Для того чтобы получить достаточно полные данные об объекте, кривые разгона следует определять при возмущениях в обоих направлениях, причем желательно повторить опыты хотя бы по три раза для каждого из режимов.

Однако в ряде случаев допустимый диапазон отклонения выходной величины ограничивается технологическими требованиями и достигнуть в ходе опыта нового установившегося ее значения невозможно. В этих случаях кривую разгона можно получить путем несложной экстраполяции начального участка переходного процесса, а также опытным путем при внесении импульсного возмущения.

Строгое импульсное возмущение должно представлять собой возмущение бесконечно большой величины в бесконечно малое время. Однако практически, так как внесение подобных возмущений конечно же невозможно, импульсное возмущение (рис. П1.6) берется большим, чем в обычных опытах по определению кривых разгона, т. е. порядка 15...25 % от максимально возможного значения входной величины. Когда выходная величина после скачкообразного изменения входной величины приблизится (с учетом выбега) к предельно допустимому значению, следует изменить входную величину в обратном направлении, т. е. установить ее первоначальное значение. Переходный процесс (и опыт) закончится в этом случае в тот момент, когда вновь установится первоначальное значение выходной величины.

*Обработка результатов эксперимента.* Примеры кривых разгона реальных объектов регулирования приведены на рис. П1.7 (величины по оси  $y$  даны в относительных единицах).

Определим по кривой разгона параметры, характеризующие динамические свойства объекта (рис. П1.8).

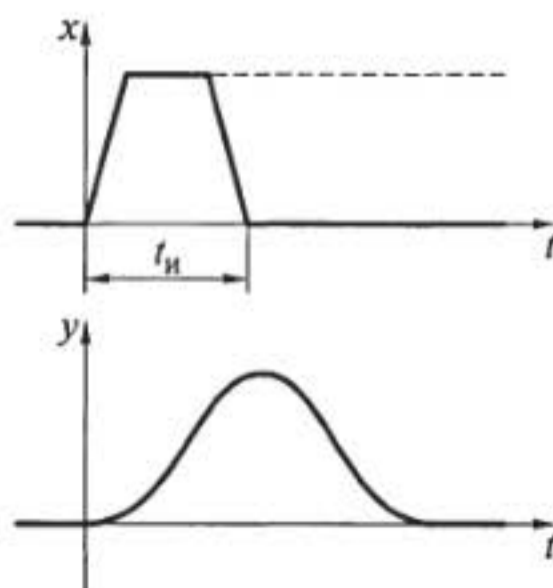


Рис. П1.6. Импульсное возмущение и импульсная характеристика

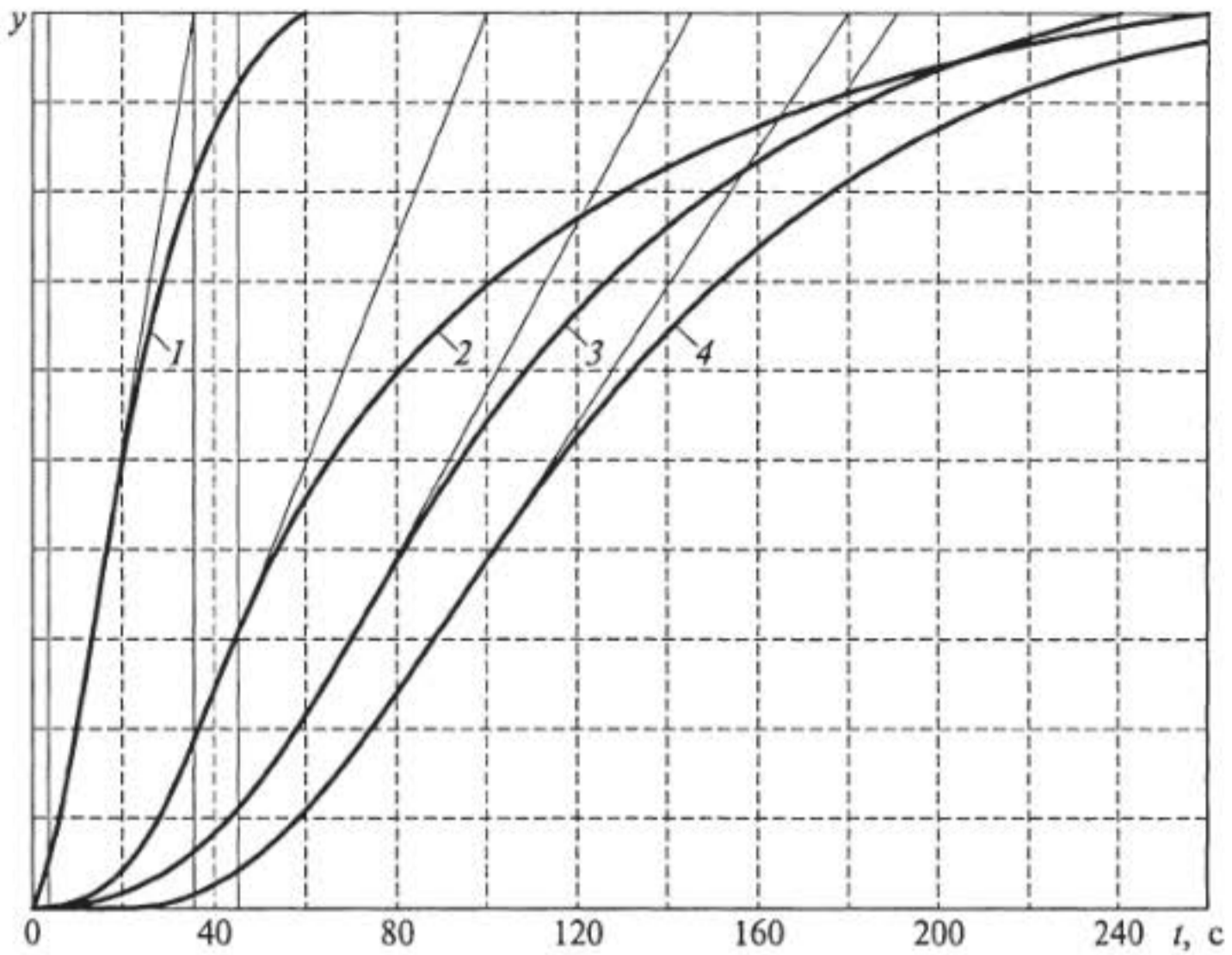


Рис. П1.7. Кривые разгона регулируемых параметров реальных промышленных объектов (доменной печи):

1 — давления на колошнике; 2 — температуры дутья; 3 — температуры купола воздухонагревателя; 4 — влажности дутья



Рис. П1.8. График для определения статического объекта динамических параметров по кривой разгона

1. *Запаздывание.* Если в точке максимальной скорости изменения выходной величины (точка  $A$ ) провести касательную  $BC$  к кривой разгона и продолжить ее до пересечения с линией начального установившегося значения выходной величины (точка  $B$ ), то отрезок времени от момента внесения возмущения до точки пересечения касательной с осью (отрезок  $OB$ ) определит общее (суммарное) запаздывание объекта  $\tau$ , которое складывается из чистого (транспортного) и емкостного (переходного) запаздываний. Поскольку решение основных практических задач при расчете систем регулирования не требует разделения этих составляющих, далее будем использовать только суммарное значение, называя его запаздыванием объекта.

2. *Постоянная времени.* Отрезок времени от момента пересечения касательной с линией начального установившегося значения до момента ее пересечения с линией нового установившегося значения (отрезок  $BC'$ ) называется постоянной времени объекта  $T_0$ . Постоянная времени — это условное время изменения выходной величины от начального до нового установившегося значения, если бы это изменение происходило со скоростью постоянной и максимальной для данного переходного процесса. Очевидно, что постоянная времени имеет место лишь у статических объектов.

Кривые разгона объектов управления с самовыравниванием представляют собой в общем случае S-образные кривые, ибо это, как правило, объекты второго или более высоких порядков (т.е. переходные процессы в таких линейных или линеаризованных объектах описываются дифференциальными уравнениями второго или более высокого порядка).

Оценка динамических свойств таких объектов лишь постоянными  $\tau$  и  $T_0$  объясняется тем, что практически такие сложные объекты можно аппроксимировать с достаточной степенью точности двумя последовательно включенными элементарными звеньями: звеном с чистым запаздыванием  $\tau$  и звеном первого порядка с постоянной времени  $T_0$  (рис. П1.9).

Дифференциальное уравнение звена с чистым запаздыванием можно записать в виде

$$y(t) = x(t - \tau).$$

Дифференциальное уравнение звена первого порядка имеет вид

$$T_0 y' + y = kx.$$

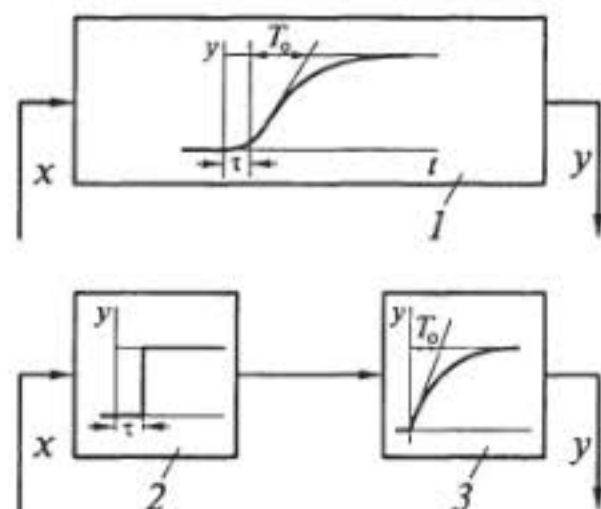


Рис. П1.9. Аппроксимация сложного объекта элементарными звеньями:

1 — реальный статический объект; 2 — звено чистого запаздывания; 3 — звено первого порядка

Кривая разгона такой аппроксимирующей системы элементарных звеньев — это экспонента с постоянной времени  $T_0$ , смещенная относительно начала координат (момента внесения возмущения) на значение запаздывания  $\tau$ .

Очевидно, что для объектов, близких к первому порядку, расхождение реальных и аппроксимированных подобным образом кривых разгона не может быть существенным.

Для большого числа реальных объектов регулирования (температуры, влажности и т. п.) переходные процессы могут быть описаны с большей точностью лишь уравнениями второго порядка:

$$T_2^2 y'' + T_1 y' + y = kx,$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — постоянные времени.

Для большинства промышленных объектов показатель демпфирования (степень затухания)  $T_1/T_2$  в этих случаях обычно более двух. Следовательно, переходный процесс не носит колебательного характера, и кривая разгона в этом случае с достаточной точностью также может быть аппроксимирована отрезком времени чистого запаздывания  $\tau$  и экспонентой (рис. П1.10).

3. Коэффициент передачи. Для статического объекта коэффициент передачи  $k_0$  представляет собой изменение его выходной величины при переходе из начального в новое установившееся состояние, отнесенное к единичному возмущению на входе. Единичным возмущением будем считать 1 % хода регулирующего органа или единицу измерения расхода регулирующей среды.

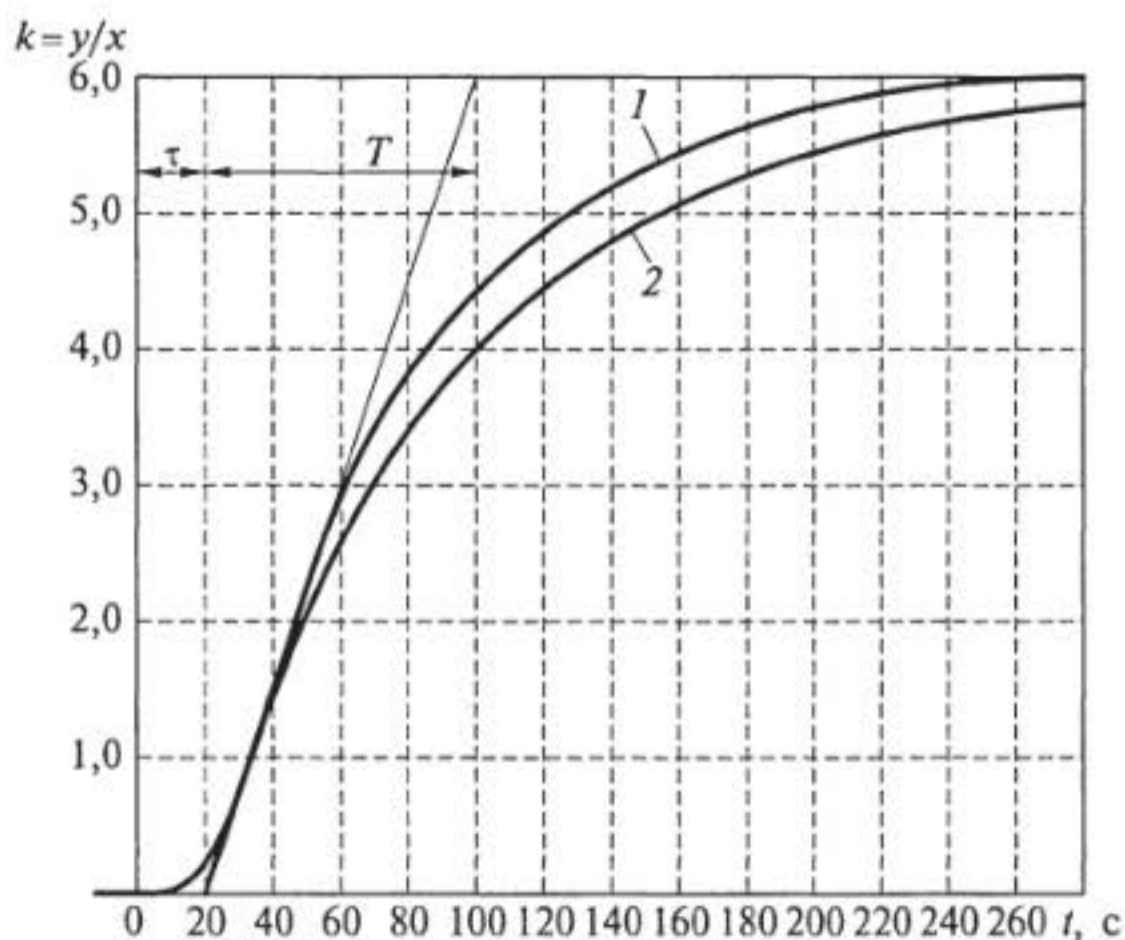


Рис.П1.10. Экспериментальная (1) и аппроксимированная (2) кривые разгона



Таким образом, коэффициент передачи объекта (см. рис. П1.10) определяется по кривой разгона следующим образом:

$$k = \frac{y(\infty) - y(0)}{\Delta x},$$

где  $y(0)$  — значение выходной величины в начальном установившемся состоянии;  $y(\infty)$  — то же, в новом установившемся состоянии;  $\Delta x$  — величина вносимого возмущения на входе (в процентах от хода регулирующего органа).

Для данного примера  $k = 6$ .

Свойство самовыравнивания статических объектов, т.е. их способность восстанавливать нарушенное при возмущении равновесие и стремление выходной величины к новому установившемуся значению, в некоторых случаях оценивают не коэффициентом передачи, а так называемой степенью самовыравнивания  $\rho$ , представляющей собой отношение изменения входной величины к изменению выходной. При этом обычно используют относительные значения этих величин: входную величину — по отношению к полному ходу регулирующего органа или расходу регулирующей среды, а выходную — к максимально возможному по технологическому режиму заданному значению выходной величины.

Таким образом, коэффициент самовыравнивания

$$\rho = \frac{\Delta x y_3}{[y(\infty) - y(0)]100} = \frac{y_3}{k} 10^{-2},$$

где  $y_3$  — заданное значение выходной величины.

Кривые разгона астатических объектов первого и второго порядков показаны на рис. П1.11. Пересечение касательной, проведенной к кривой в точке максимальной скорости изменения выходной величины, с линией начального установившегося значения определяет запаздывание объекта  $\tau$ . Для астатических объектов также можно условно считать коэффициентом передачи установившееся значение скорости изменения выходной величины при единичном возмущении.

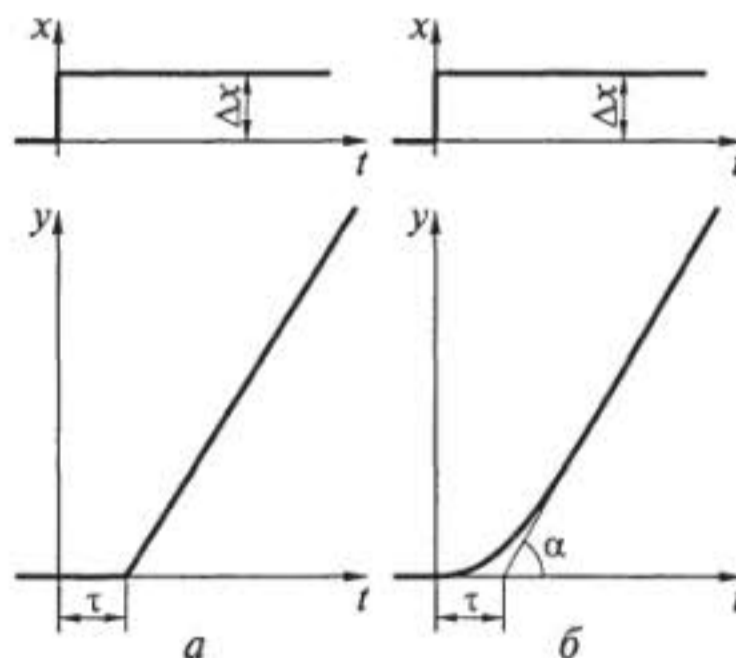


Рис. П1.11. Кривые разгона астатических объектов первого (а) и второго (б) порядков

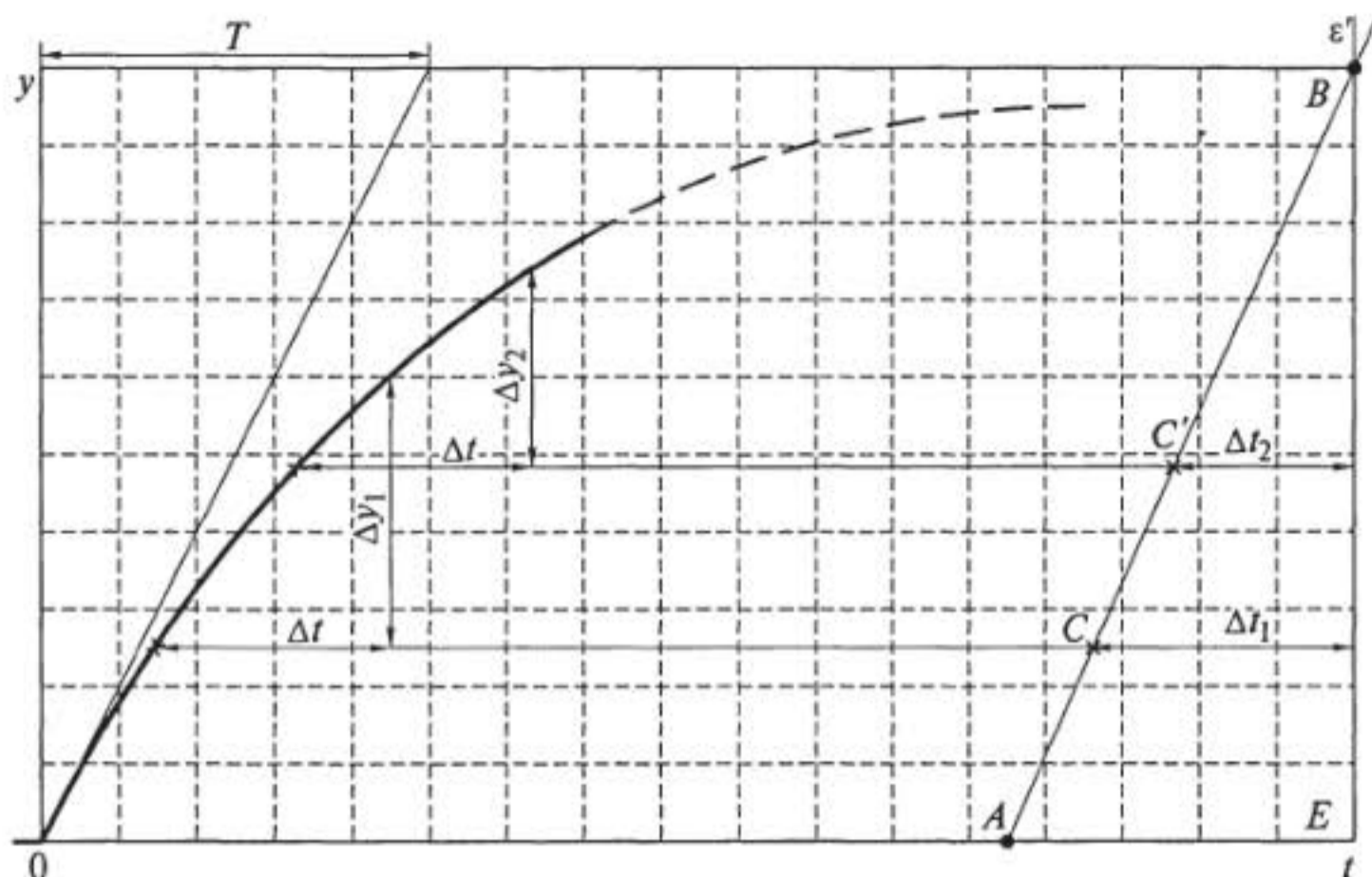


Рис. П1.12. Экстраполяция кривой разгона

Тангенс угла наклона касательной к оси абсцисс  $\text{tg}\alpha$  определяет скорость изменения выходной величины  $y$  при данном возмущении входной величины  $\Delta x$ . Тогда коэффициент передачи астатического объекта

$$k = \frac{\text{tg}\alpha}{\Delta x}$$

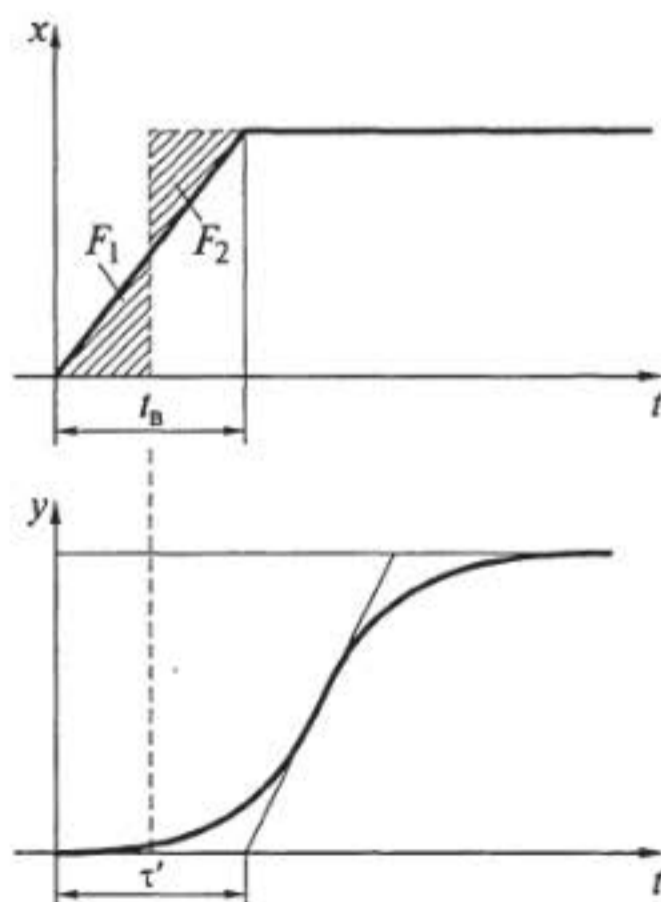


Рис. П1.13. Определение запаздывания с учетом времени внесения возмущения

Так по экспериментальным кривым разгона определяют параметры, характеризующие динамические свойства объекта: запаздывание  $\tau$ , постоянную времени  $T_0$  и коэффициент передачи  $k$ .

Если статическим объектом по условиям проведения опыта не было достигнуто новое установившееся состояние и при этом зарегистрирована лишь начальная часть кривой разгона, то эта часть кривой может быть экстраполирована (рис. П1.12): на экспериментальной кривой следует выбрать две точки и определить для равных отрезков времени  $\Delta t$  соответствующие отрезки  $\Delta y_1$  и  $\Delta y_2$ . Отложив от вертикальной прямой  $EE'$  отрезки, равные  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$ , как показано на рис. П1.12, через точки  $C$  и  $C'$  провести прямую  $AB$  до пересечения с  $EE'$ . Отрезок  $BE$  определит новое установившееся значение выходной величины, что позволит найти постоянную времени и коэффициент передачи объекта. Если запаздывание объекта соизмеримо с временем нарастания возмущения  $t_B$ , то при определении значения  $\tau$  следует заменить истинное возмущение типовым скачкообразным (рис. П1.13). Момент внесения скачкообразного возмущения условно выбирают при равных площадях треугольников  $F_1$  и  $F_2$ . Для наиболее распространенного случая равномерного нарастания возмущения

$$\tau = \tau' - \frac{t_B}{2}.$$

## Выбор регуляторов

Основным вопросом при выборе регуляторов является вопрос правильности определения характеристики регулятора применительно к динамическим свойствам объекта.

При отсутствии регулятора внесенное возмущение вынуждает регулируемую величину объекта изменяться по некоторой кривой, определяемой свойствами данного объекта. Максимальное отклонение регулируемой величины в этих условиях зависит от значения возмущения:

$$\sigma_{\max} = \rho \lambda_0,$$

где  $\rho$  — коэффициент, отражающий свойства объекта;  $\lambda_0$  — значение возмущающего воздействия.

Продолжительность отклонения регулируемой величины определяется временем действия возмущения на объект. Если включить регулируемый объект в систему регулирования, то можно уменьшить абсолютное значение отклонения  $\sigma_{\max}$  и время, в течение которого это отклонение будет продолжаться.

Однако регуляторы с различными характеристиками обеспечивают разные результаты регулирования, что вызывает необходимость их выбора в соответствии со свойствами регулируемого объекта. При правильно выбранном регуляторе и соответствующей его настройке степень затухания процесса регулирования должна быть примерно равна 0,75 (при этом значении обеспечивается наиболее благоприятное изменение регулируемой величины).

### Выбор регуляторов на основании ориентировочных сведений о проектируемом объекте

При отсутствии сведений о динамических свойствах проектируемого объекта выбор регуляторов следует производить по аналогии с действующими объектами или же на основании предположительных соображений о свойствах данного объекта, учитывая при этом критерии, приведенные в табл. П2.1.

*Импульсные регуляторы* применяются для объектов без большого запаздывания, обладающих средней емкостью, при постоянной или плавно и мало меняющейся нагрузке и соблюдении условия

$$\tau/T_0 > 0,5 \dots 1,0.$$

*Двухпозиционные регуляторы* применяются для объектов без большого запаздывания, обладающих большой емкостью, при постоянной или очень мало меняющейся нагрузке и соблюдении условия  $0 < \tau/T_0 < 0,2$ .

## Критерии выбора регуляторов по роду действия

Тип регулятора	Критерий
Импульсный	$\tau/T_0 > 0,5 \dots 1,0$
Релейный	$0 < \tau/T_0 < 0,2$
Непрерывный	$\tau/T_0 > 0$

$\tau$  — время запаздывания;  $T_0$  — постоянная времени объекта.

Эти регуляторы применяются также для объектов с одной емкостью, не обладающих свойством самовыравнивания. Хорошая работа двухпозиционных регуляторов во многом зависит от инерционности чувствительного элемента, которая должна соответствовать инерционности объекта.

Для двух- и более емкостных объектов двухпозиционное регулирование применяется редко: только в тех случаях, когда не требуется большая точность поддержания регулируемой величины.

*И-регуляторы* применяются для объектов с самовыравниванием, небольшим запаздыванием, имеющих любую мощность, при медленно меняющейся нагрузке.

Для получения оптимального переходного процесса в системе астатического регулирования необходимо выполнение следующих условий:

объект должен быть статическим;

постоянная времени объекта  $T_0$  должна быть в пределах 2 ... 40 с;

время емкостного запаздывания процесса в системе регулирования должно составлять не более 1/10 от постоянной времени объекта, т. е.  $\tau_n < 0,1 T_0$ ;

скорость перемещения регулирующего органа и коэффициент усиления регулятора должны выбираться в соответствии с емкостью объекта.

Также И-регуляторы с постоянной скоростью хорошо работают в объектах регулирования уровня, давления и температуры, но при обязательном условии, что чистое запаздывание  $\tau$  и время разгона  $T_p$  малы, а постоянная времени объекта  $T_0$  составляет не более 30 ... 40 с. При этом чем больше емкость объекта, тем больше должна быть скорость перемещения регулирующего органа, а следовательно, и скорость регулирования.

И-регулятор с постоянной скоростью перемещения регулирующего органа может применяться только при наличии у него некоторой зоны нечувствительности; в этом случае регулирование становится устойчивым, что достигается также при условии

$$1/(T_n \Delta) = A(1/T_0 + 1/T_p),$$

где  $T_n$  — время перемещения регулирующего органа;  $\Delta$  — зона нечувствительности регулятора;  $A$  — некоторая постоянная, зависящая от свойств объекта и характера возмущения.

При этом чем меньше  $T_n$ , тем больше должна быть зона нечувствительности  $\Delta$ .

Устойчивое регулирование И-регулятор обеспечивает при условии

$$T_n \geq 1/(4R^2C),$$

где  $R$  — коэффициент сопротивления (по выходу);  $C$  — коэффициент емкости объекта.

При регулировании уровня воды в баке коэффициент сопротивления

$$R = H/Q,$$

где  $H$  — уровень воды;  $Q$  — расход воды.

При регулировании температуры жидкости в баке коэффициент сопротивления

$$R = t_n/(Q_o - Q_s),$$

где  $t_n$  — потенциальное значение температуры;  $Q_o$  — количество теплоты, вносимое в объект;  $Q_s$  — количество теплоты, уносимое из объекта.

*П-регуляторы* применяются в объектах со средней емкостью, небольшим запаздыванием и при небольших изменениях нагрузки. Большей частью они применяются для одноемкостных объектов, реже для двухъемкостных. Для многоемкостных объектов пропорциональные регуляторы применяются ограниченно.

П-регуляторы могут обеспечить устойчивое регулирование объекта с самовыравниванием при условии

$$k_p k_o > (1/\sigma_{ст} - 1),$$

где  $k_p$  и  $k_o$  — соответственно коэффициенты передачи регулятора и объекта;  $\sigma_{ст}$  — статическая ошибка, и объекта без самовыравнивания при условии

$$1,57 > k_p \tau / T_o > 1/\sigma_{ст}.$$

*ПИ-регуляторы* применяются в объектах с любой емкостью, большим запаздыванием и при большой, но медленно меняющейся нагрузке.

Для объектов многоемкостных эти регуляторы применяются при  $\tau > 0,1 T_o$ .

*ПД-регуляторы* применяются в объектах со средней емкостью, при большом времени запаздывания и при малых изменениях нагрузки.

*ПИД-регуляторы* применяются в объектах с любой емкостью, очень большим запаздыванием и при больших и резких изменениях нагрузки.

Эти регуляторы нецелесообразно применять для объектов, в которых  $\tau/T_o > 1$ .

### Выбор регуляторов на основании расчета

Для действующего объекта при наличии кривых разгона либо частотных характеристик или для вновь проектируемого объекта, для которого кривые разгона сняты с аналогичного действующего объекта, выбор ре-

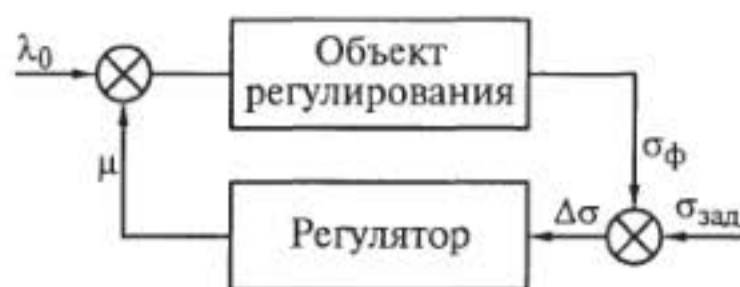


Рис. П2.1. Структурная схема системы регулирования

гуляторов следует производить на основании расчета. При известных  $k_o$ ,  $T_o$  и  $\tau$  система регулирования (рис. П2.1) для объектов с самовыравниванием, динамические свойства которых описываются дифференциальным уравнением первого порядка, может быть рассчитана по формуле

$$T_o \sigma_{\phi} + \sigma_{\phi}(t) = k_o [\mu(t - \tau) + \lambda_0(t - \tau)],$$

для объектов без самовыравнивания — по формуле

$$T_o \sigma_{\phi}(t) = k_o [\mu(t - \tau) + \lambda_0(t - \tau)],$$

где  $\sigma_{\phi}$  — фактическое отклонение регулируемой величины;  $\tau$  — текущее время;  $\mu$  — регулирующее воздействие,  $\lambda_0$  — возмущение по нагрузке.

Характер переходного процесса, т.е. показатель качества регулирования, определяется динамическими свойствами объекта, выбранным законом регулирования и коэффициентами управления этого закона (параметрами настройки). Коэффициенты управления и законы регулирования для различных типов регуляторов приведены в табл. П2.2.

В соответствии с технологическими требованиями к системе автоматического регулирования необходимо выбрать такой закон регулирования, который в совокупности со свойствами регулируемого объекта обеспечил бы выполнение этих требований. Технологические требования к переходным процессам системы регулирования зависят от требований к конкретному технологическому процессу и его режима.

Большинству технологических требований удовлетворяют три характерных переходных процесса (табл. П2.3).

На основании приведенных в табл. П2.3 данных делаем вывод, что показателями переходных процессов являются:

апериодического —  $\sigma_1$  и  $t_p$  (принимается  $\sigma_1 > \Delta\sigma = 0,05$ );

с 20%-м перерегулированием —  $\sigma_1$ ,  $t_1$ ,  $\tau'$  ( $t_1$  — время первого полупериода колебаний;  $\tau'$  — время вхождения регулируемой величины в заданную зону);

с минимальной квадратичной площадью отклонения регулируемого параметра —  $\Delta\sigma$ ,  $S$ ,  $\tau'$  ( $\Delta\sigma$  — динамическое отклонение регулируемой величины;  $S$  — чувствительность регулятора).

Пример выбора регулятора на основании расчета приведен в табл. П2.4.

Схема конкретного объекта регулирования для расчета представлена на рис. П2.2. Наибольшие значения  $k_o$  и  $T_o$  достигаются при минимальной нагрузке, при которой и снимают кривую разгона.

После выбора регулятора производят следующие поверочные расчеты:

Характеристики различных типов регуляторов

Обозначение регулятора	Название регулятора	Характер действия	Закон регулирования	Параметры настройки
Р	Постоянной скорости (релейный)	Производит перемещение регулирующего органа с постоянной скоростью при отклонении регулируемой величины от заданного значения во времени $t_r$ . При этом направление скорости перемещения регулирующего органа определяется знаком входного сигнала и не зависит от его значения	$\mu = \frac{Sh_0 \Delta \sigma}{T_n} \text{ при } [\Delta \sigma] > \frac{1}{2} \Delta;$ $\mu = 0 \text{ при } [\Delta \sigma] < \frac{1}{2} \Delta. \text{ Здесь } S \text{ — чувствительность регулятора; } h_0 \text{ — полный ход регулирующего органа; } \Delta \sigma \text{ — разность заданного и фактического изменения регулируемой величины; } \Delta \text{ — зона нечувствительности}$	$T_n; \Delta$
РД	Двухпозиционный (релейный)	Регулирующий орган в процессе регулирования занимает только два положения	$\mu = \mu_{\max} Sh_0 (\Delta \sigma - \varepsilon) \text{ при } \Delta \sigma > 0;$ $\mu = \mu_{\max} Sh_0 (\Delta \sigma + \varepsilon) \text{ при } \Delta \sigma < 0,$ где $\mu_{\max}$ — максимальное регулирующее воздействие; $\varepsilon$ — ширина петли гистерезиса релейного элемента	—
И	Интегральный (астатиический)	Перемещение регулирующего органа пропорционально интегралу отклонения регулируемой величины от заданного значения по времени	$\mu = \frac{1}{t_i} \int \Delta \sigma dt$	$t_i$



П	Пропорциональный (статический)	Перемещение регулирующего органа пропорционально отклонению регулируемой величины от заданного значения	$\mu = k_p \Delta \sigma$	$k_p$
ПИ	Пропорционально-интегральный (изодромный)	Перемещение регулирующего органа пропорционально сумме отклонения и интеграла отклонения регулируемой величины по времени	$\mu = k_p \left( \Delta \sigma + \frac{1}{t_i} \int \Delta \sigma dt \right)$	$k_p, t_i$
ПИД	Пропорционально-интегрально-дифференциальный (с производной)	Перемещение регулирующего органа пропорционально отклонению, интегралу отклонения по времени и скорости изменения регулируемой величины	$\mu = k_p \left[ \Delta \sigma + \frac{1}{t_i} \int \Delta \sigma dt + t_{пр} \Delta \dot{\sigma} \right],$ где $t_{пр}$ — время предварения, измеряемое приставкой*	$k_p, t_i, t_{пр}$

\* Приставка предварения дает воздействие на регулирующее устройство, которое заставляет регулирующийся орган перемещаться с некоторым временным опережением, возрастающим с изменением скорости регулируемой величины (регуляторы по первой производной).

## Характерные переходные процессы

Вид переходного процесса	Характерные особенности		Рекомендации по применению
	Положительные	Отрицательные	
Апериодический	Минимальное время регулирования. Отсутствие перерегулирования. Степень затухания $\psi = 1$ . Минимальное регулирующее воздействие	Большое динамическое отклонение регулируемой величины	При необходимости исключения влияния регулирующего воздействия данной системы на другие регулируемые величины сложного объекта
С 20%-м перерегулированием, т.е. с отношением двух соседних амплитуд колебаний $\sigma_2/\sigma_1 = 0,2$	Большое регулирующее воздействие. Небольшое динамическое отклонение. Степень затухания $\psi = 0,96$ . Минимальное время первого полупериода колебаний	Большое время регулирования	В случае если технологический режим объекта допускает перерегулирование регулируемой величины
С минимальной квадратичной площадью отклонения регулируемого параметра, т.е. с $\min \int \Delta\sigma^2 dt$	Малое динамическое отклонение	Большое время регулирования	В случае если технологический режим не допускает большого отклонения регулируемой величины

Выбор регулятора для объекта, заданного на рис. П.2.2

Наименование величины, которую требуется определить	Обозначение	Размерность	Формула	Вычисление
Вес жидкости в резервуаре	$G$	кг	$G = H \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \gamma$	$G = 1,4 \cdot \frac{3,14 \cdot 1,3^2}{4} \cdot 958,4 = 1780$
Постоянная времени объекта	$T_o$	с	$T_o = \frac{G(i_2 - \theta_3 C_3)}{G \min i_2}$	$T_o = \frac{1780(663,1 - 100 \cdot 1)}{10 \cdot 661,3} = 151$
Время запаздывания объекта	$\tau_o$	с	$\tau_o = \frac{L}{v}$ $L$ — расстояние от чувствительного элемента до регулирующего органа; $v$ — скорость движения воды по трубопроводу	$\tau_o = \frac{10}{1,5} = 6,7$
Постоянная времени регулятора	$T_p$	с	—	Принимаем $T_p = 14,8$
Время запаздывания регулятора	$\tau_p$	с	—	Принимаем $\tau_p = 9,5$
Расход теплоты при возмущении по расходу	$a$	ккал/с	$a = (\theta_3 C_3 - \theta_1 C_1) \lambda_1$	$a = (100 \cdot 1 - 35 \cdot 0,999) \cdot 2,5 = 162,6$

Наименование величины, которую требуется определить	Обозначение	Размерность	Формула	Вычисление
Расход теплоты при возмущении по температуре	$a$	ккал/с	$a = G_1 C_1 \lambda_2$	$a = 12 \cdot 0,999 \cdot 12 \approx 144$
Динамический коэффициент	$R_d$	—	$R_d = \frac{\Delta\sigma(G \min - G_2) C_3}{a}$	$R_d = \frac{5(10 - 0,1)}{162,6} = 0,31$ Принимаем значение $a$ по расходу, как большее
Общее время запаздывания	$\tau$	с	$\tau = \tau_0 + \tau_p$	$\tau = 6,7 + 9,5 = 16,2$
Отношение $\frac{\tau}{T}$	—	—	Пренебрегаем $T_p$ ввиду ее малого значения, тогда $T = T_0$	$\frac{\tau}{T_0} = \frac{16,2}{151} = 0,107$

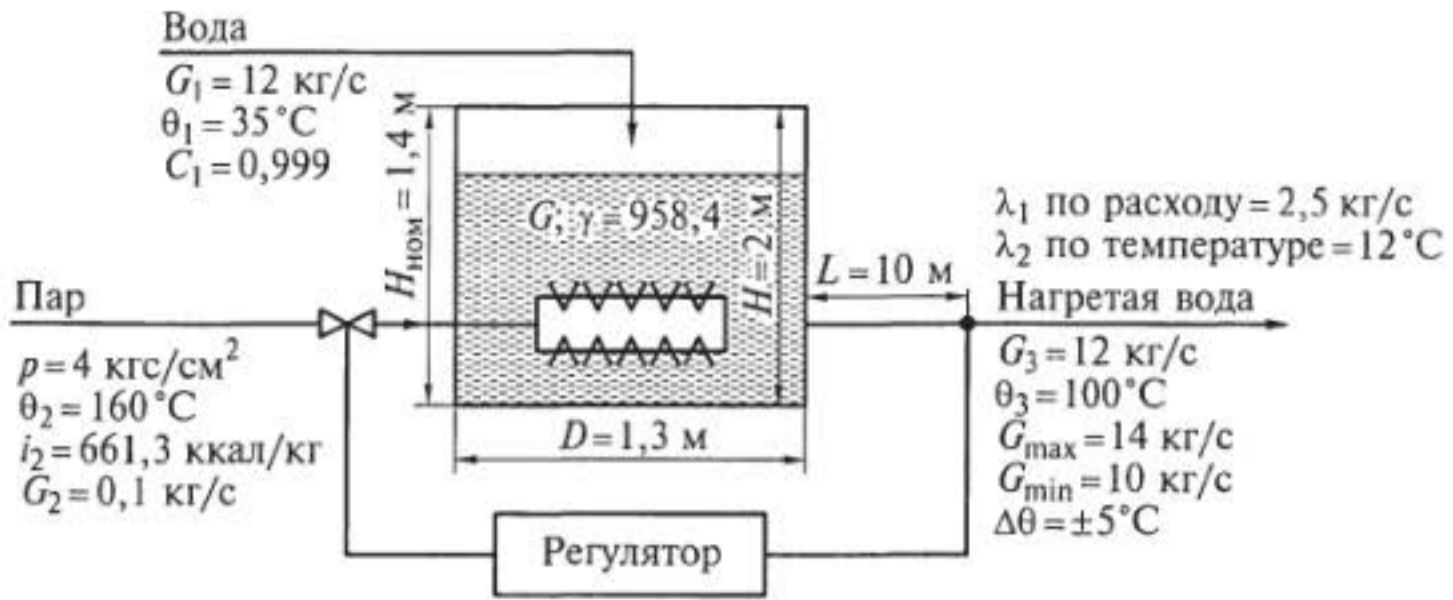


Рис. П2.2. Схема регулирования температуры воды путем смешивания с паром:

$G_1$  — скорость подачи воды;  $G_2$  — скорость подачи пара;  $G_3$  — скорость выхода воды;  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  — температура;  $C_1, C_3$  — удельная теплоемкость;  $p$  — давление пара;  $i_2$  — теплоемкость;  $G$  — вес воды в баке;  $\gamma$  — удельный вес воды;  $\lambda$  — регулируемая величина;  $\Delta\theta$  — дополнительный диапазон колебаний температуры

1) уточняют по кривым, показанным на рис. П2.3 ... П2.5, значение  $R_d$ , которое должно быть меньше расчетного (для рассматриваемого примера выбираем П-регулятор с 20%-м перерегулированием, тогда по рис. П2.4 находим  $R_d = 0,18$ );

2) по форме переходного процесса определяют максимальное динамическое отклонение регулируемой величины:

$$\Delta\sigma = R_d \lambda_2 k_o.$$

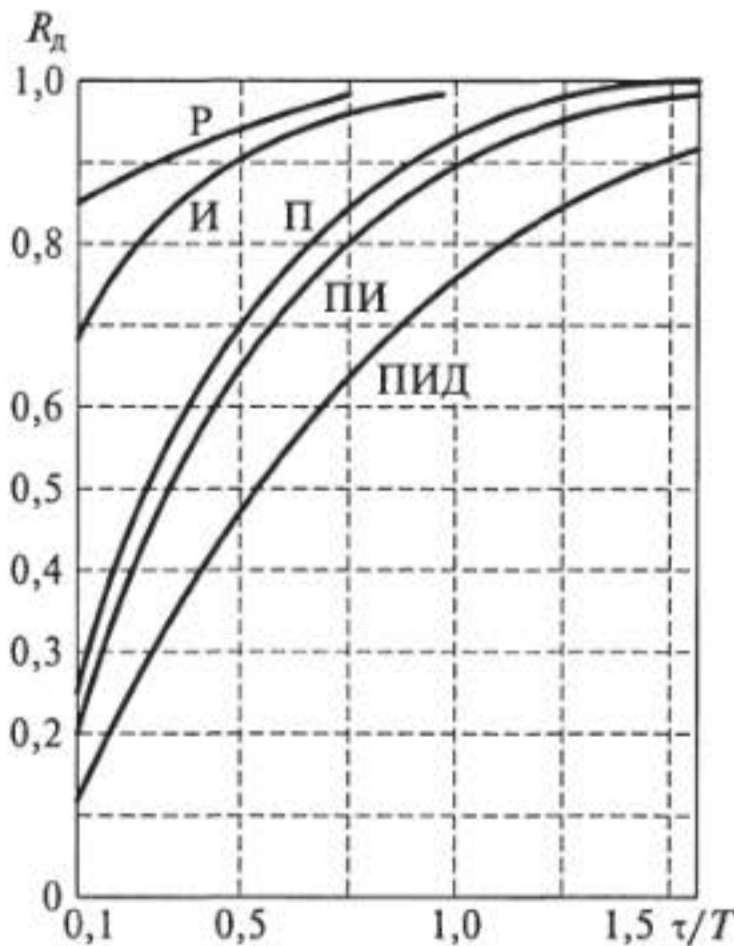


Рис. П2.3. Кривые выбора регулятора для аperiodического переходного процесса

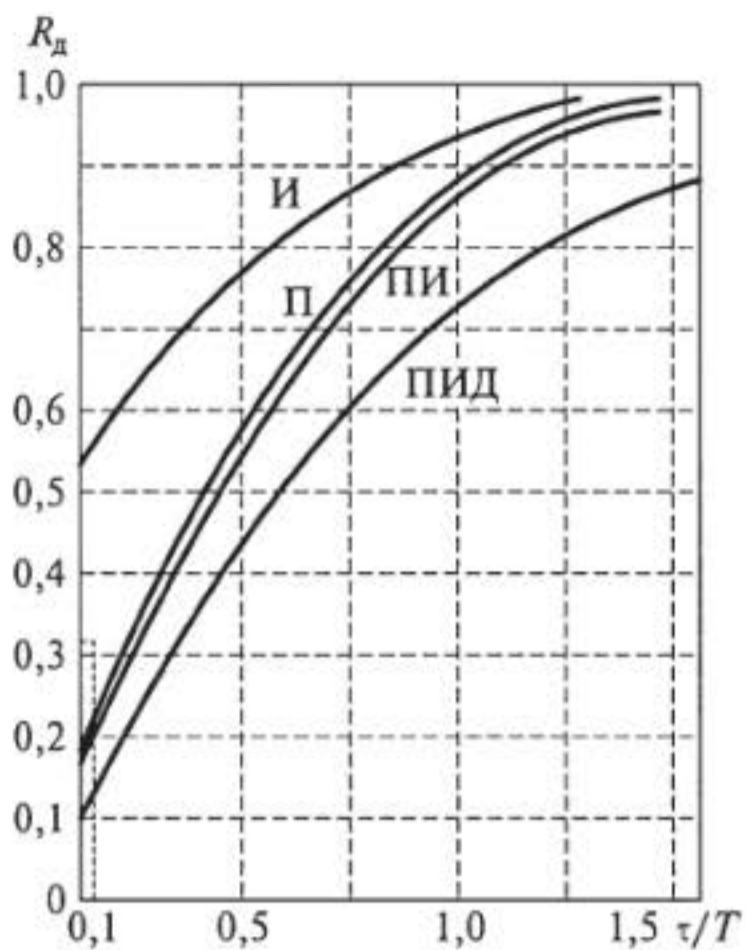


Рис. П2.4. Кривые выбора регулятора для переходного процесса с 20%-м перерегулированием

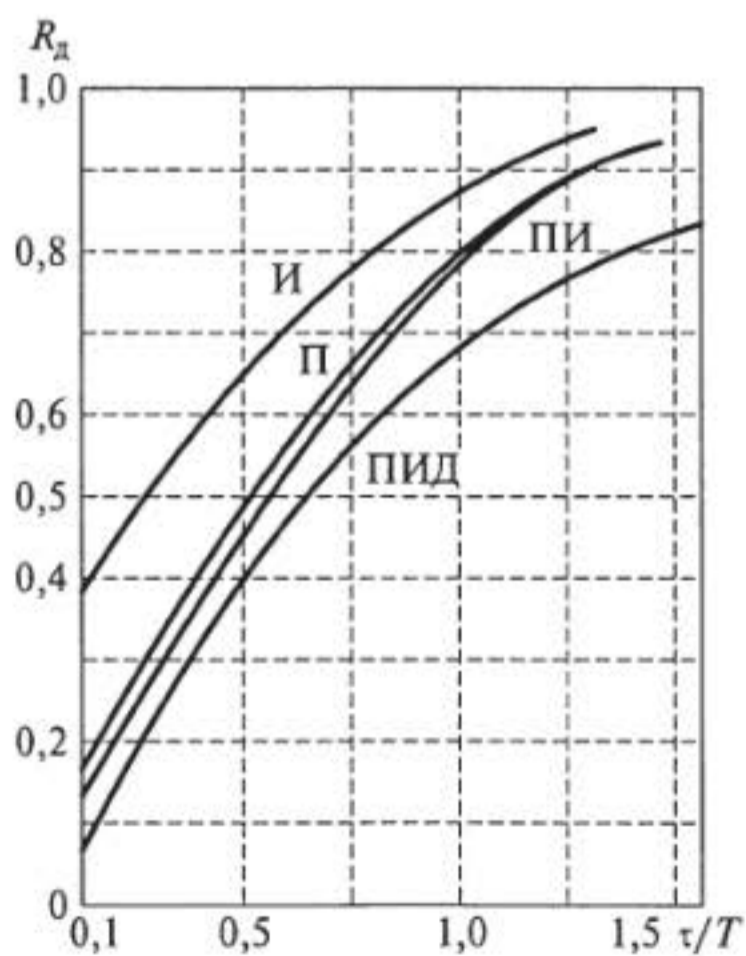


Рис. П2.5. Кривые выбора регулятора для переходного процесса с  $\min \int \Delta \sigma^2 dt$

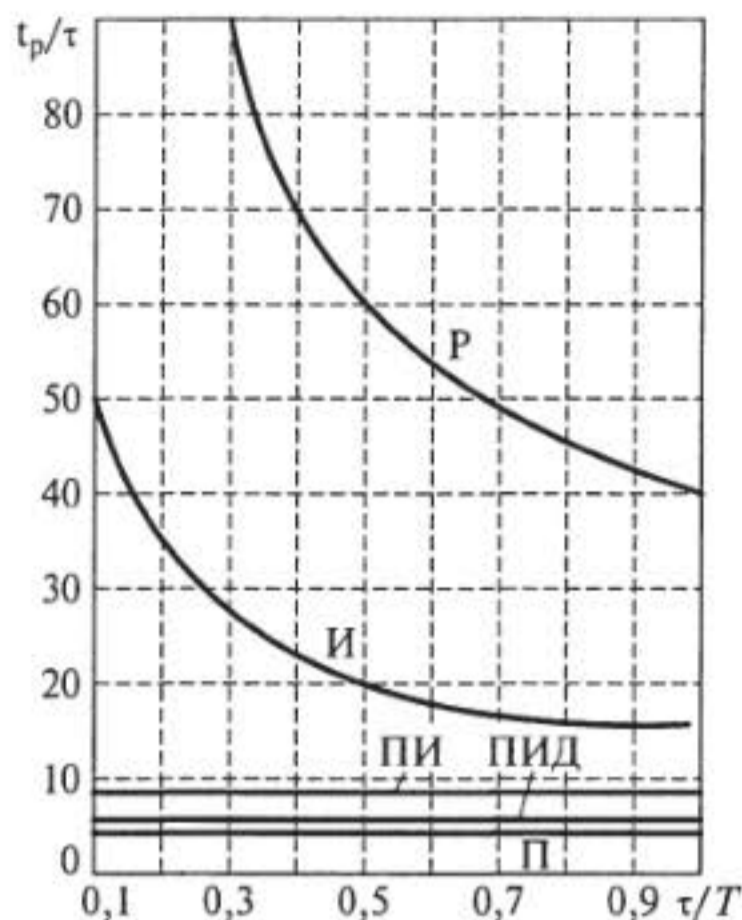


Рис. П2.6. График времени регулирования для апериодического процесса

Здесь

$$k_0 = \frac{\theta_3 C_3 - \theta_1 C_1}{(G_{\min} + G_2) C_3} = \frac{(100 \cdot 1 - 35 \cdot 0,999)}{(10 + 0,1)} = 6,42 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}}.$$

Тогда  $\Delta\sigma = 0,18 \cdot 2,5 \cdot 6,42 = 2,9^{\circ}\text{C}$ . По графикам, изображенным на рис. П2.6 ... П2.8, находят относительное время регулирования  $t_p/\tau_0$  для того же процесса на рис. П2.7. Оно равно 7, тогда  $t_p = 7 \cdot 16,2 = 113,4$  с. Полученное значение должно быть меньше заданного по технологическим требованиям.

Для П-регулятора полученное время регулирования проверяют по допустимой статической ошибке  $\sigma_{\text{ст}}$  путем нахождения ее относительного значения  $\sigma'_{\text{ст}}$  по графику, показанному на рис. П2.9, или по формуле

$$\sigma'_{\text{ст}} = \frac{\sigma_{\text{ст}}}{k_0 \lambda_0},$$

откуда

$$\sigma_{\text{ст}} = \sigma'_{\text{ст}} k_0 \lambda_0$$

(при  $\tau/T_0 = 0,107$  по рис. П2.9 получаем  $\sigma'_{\text{ст}} = 14\%$ ).

Тогда

$$\sigma_{\text{ст}} = \frac{14 \cdot 6,42 \cdot 2}{100} = 1,8^{\circ}\text{C}.$$

По технологическим требованиям считают полученное значение  $\sigma_{\text{ст}}$  допустимым.

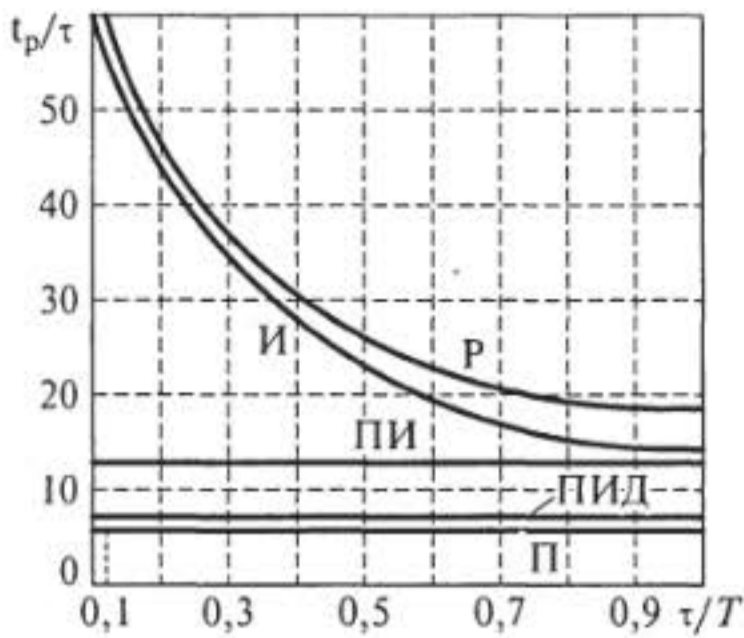


Рис. П2.7. График времени регулирования для процесса с 20%-м перерегулированием

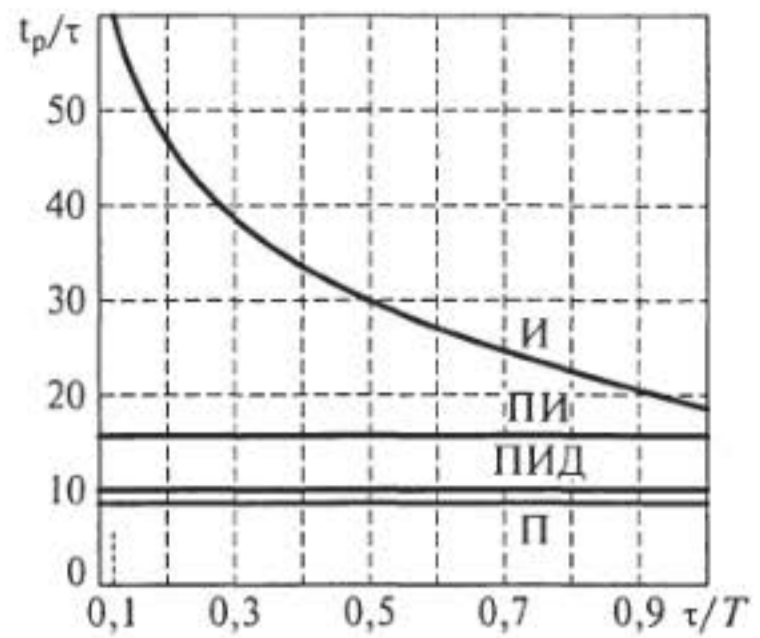


Рис. П2.8. График времени регулирования для процесса с  $\min \int \Delta\sigma^2 dt$

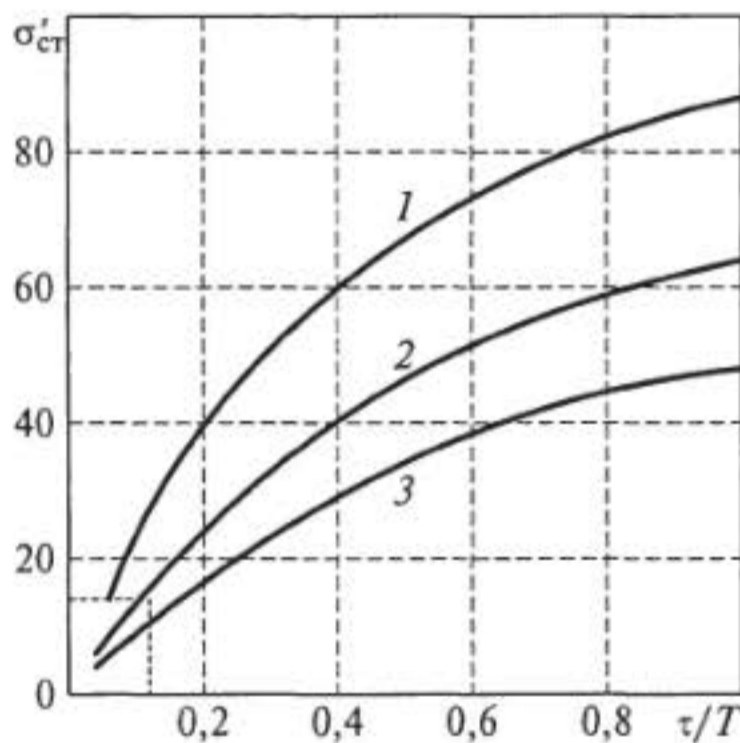


Рис. П2.9. График остаточного отклонения регулируемой величины: 1 — для апериодического процесса; 2 — для процесса с 20%-м перерегулированием; 3 — для процесса с  $\min \int \Delta\sigma^2 dt$

Таким образом, выбранный регулятор обеспечивает технологические режимы регулирования.

### Выбор оптимальных значений параметров регуляторов

Для каждого объекта с его характерными динамическими свойствами необходима соответствующая настройка регулятора. Оптимальные значения параметров настройки можно определить по специальным кривым, а также путем расчета. Однако на практике найденные значения параметров настройки корректируются при наладке регулятора по кривым регистрации регулируемой величины.



Приведем сведения, необходимые для приближенного определения значений параметров настройки.

*П-регулятор.* Чем больше предел пропорциональности, тем больше остаточное отклонение регулируемой величины. Чем меньше предел пропорциональности, тем больше амплитуда затухающих колебаний и больше время переходного процесса, но остаточное отклонение регулируемой величины в этом случае меньше.

Для пропорциональных регуляторов увеличение емкости объекта благоприятно влияет на качество регулирования, но при этом следует уменьшить пределы пропорциональности.

При наличии запаздывания надо увеличить пределы пропорциональности. Чем больше скорость перемещения регулирующего органа, тем выше устойчивость, а следовательно, и качество регулирования.

Необходимый предел пропорциональности

$$D = \frac{110V\tau}{\Delta P},$$

где  $V$  — скорость изменения регулируемой величины, выраженная в процентах приращения в единицу времени;  $\Delta P$  — перемещение регулирующего органа в процентах полного хода, вызвавшее возмущение.

Для объектов без самовыравнивания предел пропорциональности можно определить по формуле

$$D = iV\tau,$$

где  $i$  — коэффициент чувствительности измерительной части регулятора.

Для объектов с самовыравниванием предел пропорциональности определяется по формуле

$$D = \frac{2,6i}{\rho} \left[ \frac{V\rho\tau - 0,08}{V\rho\tau + 0,6} \right].$$

*И-регулятор.* С увеличением пределов пропорциональности уменьшается переходный период.

Необходимый предел пропорциональности определяется по формуле

$$D = \frac{110V\tau}{\Delta P}.$$

*ПИД-регулятор.* Необходимый предел пропорциональности для этих регуляторов приближенно определяют по формуле

$$D = \frac{83V\tau}{\Delta P}.$$

Не менее важным фактором для хорошей работы регулятора является рациональный выбор пределов зоны нечувствительности и скорости регулирования.

Регулятор не реагирует на отклонение регулируемой величины, если оно меньше значения  $\Delta/2$ .

Большая зона нечувствительности, равная  $\frac{\Delta}{2} 2 = \Delta$ , ухудшает качество регулирования, так как регулятор в этих пределах не может обнаружить возмущение. Регулятор начнет реагировать лишь тогда, когда значение регулируемой величины выйдет за пределы этой зоны. Наличие большой зоны нечувствительности вызывает увеличение запаздывания регулятора. Однако для регулятора с электроприводом зона нечувствительности не должна быть чрезмерно малой, так как в этом случае будут происходить излишне частые включения, что приведет к быстрому износу привода.

При наличии запаздывания регулятора или выбега исполнительного механизма колебания регулируемой величины значительно превысят ширину зоны нечувствительности; в этих случаях полезно иметь несколько бо́льшую зону нечувствительности. Однако при этом увеличится запаздывание регулятора.

Для многоемкостных объектов со значительным переходным запаздыванием зону нечувствительности следует сокращать. Это улучшит качество регулирования и не приведет к излишне частым включениям исполнительного механизма, так как график регулирования сравнительно большое время не будет выходить из зоны нечувствительности  $\Delta$ . При этом следует учитывать длительно допустимые отклонения  $\sigma_{\text{длит}}$  регулируемой величины. Следовательно, зона нечувствительности должна быть в пределах  $0,3 \dots 0,5\sigma_{\text{длит}}$ .

Скорость регулирования выбирается сравнительно небольшой при работе объекта на малых нагрузках. При переходе на большую нагрузку скорость регулирования увеличивается. Снижение скорости регулирования может повысить устойчивость регулирования лишь в очень редких случаях, например при астатическом регуляторе на объекте большой емкости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анхимюк, В. Л.* Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. — М. : Дизайн ПРО, 2002.
2. *Бессекерский, В. А.* Теория систем автоматического управления / В. А. Бессекерский, Е. П. Попов. — 4-е изд., перераб. и доп. — СПб. : Профессия, 2003.
3. *Горошков, Б. И.* Автоматическое управление : учебник / Б. И. Горошков. — М. : Академия, 2003.
4. *Егоров, А. И.* Основы теории управления / А. И. Егоров. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007.
5. *Жмудь, В. А.* Моделирование замкнутых систем автоматического управления : учеб. пособие для академического бакалавриата / В. А. Жмудь. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017.
6. *Загинайлов, В. И.* Основы автоматики / В. И. Загинайлов, Л. Н. Шеповалова. — М. : Колос, 2001.
7. *Мельников, А. А.* Теория автоматического управления техническими объектами автомобилей и тракторов : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / А. А. Мельников. — М. : Академия, 2003.
8. *Сазонов, Г. Г.* Основы теории автоматического управления (ТАУ) / Г. Г. Сазонов. — М. : Истек, 2003.
9. *Серебряков, А. С.* Автоматика : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Серебряков, Д. А. Семенов, Е. А. Чернов ; под общ. ред. А. С. Серебрякова. — М. : Издательство Юрайт, 2017.
10. *Шавров, А. В.* Автоматика / А. В. Шавров, А. П. Коломиец. — М. : Колос, 1999.
11. *Шишмарёв, В. Ю.* Автоматика : учебник / В. Ю. Шишмарёв. — М. : Академия, 2005.
12. *Шишмарёв, В. Ю.* Основы автоматического управления : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В. Ю. Шишмарёв. — М. : Академия, 2008.
13. *Шишмарёв, В. Ю.* Типовые элементы систем автоматического управления / В. Ю. Шишмарёв. — 5-е изд. — М. : Академия, 2011.
14. *Шишмарёв, В. Ю.* Теория автоматического управления : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / В. Ю. Шишмарёв. — М. : Академия, 2012.

## НОВЫЕ ИЗДАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «АВТОМАТИКА» И СМЕЖНЫМ ДИСЦИПЛИНАМ

1. *Ким, Д. П.* Теория автоматического управления. Линейные системы : учебник и практикум для академического бакалавриата / Д. П. Ким. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017.

2. *Ким, Д. П.* Теория автоматического управления. Линейные системы. Задачник : учеб. пособие для академического бакалавриата / Д. П. Ким, Н. Д. Дмитриева. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016.

3. *Ким, Д. П.* Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы : учебник и практикум для академического бакалавриата / Д. П. Ким. — 3-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2016.

4. *Ким, Д. П.* Теория автоматического управления. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. Задачник : учеб. пособие для академического бакалавриата / Д. П. Ким. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2017.

**Наши книги можно приобрести:**

**Учебным заведениям и библиотекам:**  
в отделе по работе с вузами  
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: vuz@urait.ru

**Частным лицам:**  
список магазинов смотрите на сайте urait.ru  
в разделе «Частным лицам»

**Магазинам и корпоративным клиентам:**  
в отделе продаж  
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru

**Отзывы об издании присылайте в редакцию**  
e-mail: red@urait.ru

**Новые издания и дополнительные материалы доступны  
в электронной библиотечной системе «Юрайт»  
biblio-online.ru**

*Учебное издание*

**Шишмарёв Владимир Юрьевич**

## **АВТОМАТИКА**

Учебник для СПО

Формат 60×90<sup>1/16</sup>.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 17,75.

**ООО «Издательство Юрайт»**  
111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4а.  
Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru