

ГЛАВА I
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ

§ 1. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ,
РЕГУЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ

Система управления обычно включает в себя как контроль фактического состояния объекта (системы) управления, так и поддержание состояния этой системы на заданном уровне (регулирование). В системе автоматического управления (САУ) все эти процессы выполняются без оператора по специальной программе. Однако автоматический контроль и регулирование могут рассматриваться и как самостоятельные процессы (системы).

Объектом управления (объектом регулирования) может быть устройство, требуемый режим работы которого должен поддерживаться извне специально организованными управляющими воздействиями, формируемыми управляющим устройством, или технологический процесс с заданным режимом его протекания.

Управление — это процесс формирования управляющих воздействий, обеспечивающих требуемое состояние или режим работы объекта управления, а также их реализацию.

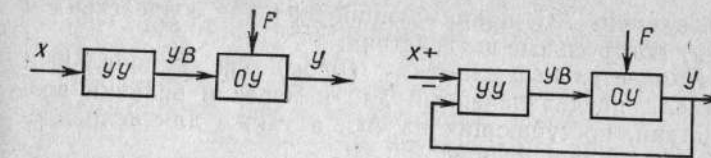
Регулирование — частный вид управления, когда задачей является обеспечение постоянства какой-либо физической величины либо ее изменение по заданному закону.

Управляющее устройство (автоматическое управляющее устройство) — устройство, обрабатывающее данные протекания процесса и при помощи исполнительного органа воздействующее на объект управления с целью обеспечения требуемого режима его работы или состояния.

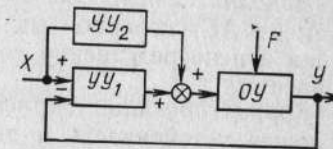
Внешнее воздействие — это не зависящее от системы воздействие внешней среды на автоматическую систему.

Внутреннее воздействие — воздействие одной части автоматической системы на другую.

Управляющее воздействие — целенаправленное воздействие управляющего устройства на объект управления.



1. Управление по разомкнутому циклу
УУ — управляющее устройство; ОУ — объект управления; X — задающее воздействие; УВ — управляющее воздействие; F — помехи; У — выходные координаты
2. Управление по замкнутому циклу. Знаки «+» или «-» характеризуют положительное или отрицательное значение задающего воздействия



3. САУ с комбинированным управлением

Контрольное воздействие — воздействие объекта управления на управляющее устройство.

Задающее воздействие — воздействие на входе автоматической системы от программного устройства.

Алгоритм управления — набор правил, по которым изменяется управляющее воздействие.

Выходные (управляемые, регулируемые) координаты — величины, характеризующие текущее состояние объекта управления.

Возмущающие воздействия (помехи) — воздействия, возникающие в результате взаимодействия автоматической системы с внешней средой и вызывающие непланируемые изменения выходных координат.

Предписанное значение выходной координаты — значение величины, определяемое требуемым режимом работы.

Действительное значение выходной координаты — значение выходной величины, соответствующее фактическому состоянию объекта управления.

Ошибка управления — разность между предписанным и действительным значением выходной координаты автоматической системы.

Функциональный элемент (функциональный блок) — конструктивно обособленная часть автоматической системы (АС), выполняющая определенную функцию.

Воспринимающий элемент (блок) — функциональ-

ный элемент АС, принимающий внешние воздействия и (или) контрольные воздействия.

Измерительный элемент (блок) — функциональный элемент, предназначенный для измерения величин воздействий, поступающих на АС, а также для исправления ошибок управления.

Усилительно-преобразовательный элемент (блок) — функциональный элемент АС, воспринимающий сигналы измерительного элемента, усиливающий их и преобразующий в вид, приемлемый для исполнительного механизма.

Исполнительный элемент (блок) — функциональный элемент АС, перерабатывающий управляющие воздействия и непосредственно воздействующий на объект управления.

Корректирующий элемент — устройство в АС, улучшающее устойчивость и динамические свойства.

Динамическое звено — элементарное звено, которое изменяет функциональную зависимость воздействия, подаваемого на его вход, от времени.

Логическое звено — элементарное звено, осуществляющее логическую операцию И, ИЛИ, НЕ по отношению к воздействиям, поступающим на его входы.

САУ (САР) имеют следующую классификацию.

По *характеру алгоритма управления* различают: системы управления по разомкнутому циклу (рис. 1), характеризующиеся отсутствием обратной связи;

системы управления по замкнутому циклу (рис. 2), т. е. с обратной связью, при наличии которой на управляющее устройство УУ поступает информация об отклонении выходной величины Y от заданного значения, что позволяет сформировать управляющее воздействие UV , возвращающее Y в заданное положение;

комбинированные системы управления (рис. 3).

По *назначению*: системы автоматической стабилизации; системы программного управления; следящие системы.

По *принципу управления*, в том числе:

по характеру используемых для управления сигналов: непрерывные, дискретные (импульсные, релейные);

по характеру используемой информации об условиях работы: системы с жесткими законами управления и структурой; системы с изменяемыми структурой и законом управления, к которым относятся системы авто-

матической настройки, самообучающиеся и самоорганизующиеся системы;

по характеру математических соотношений: линейные и нелинейные.

По *количеству выходных координат объекта управления*: одномерные и многомерные. Последние делятся на системы связанного и несвязанного управления. В системах связанного управления отдельные управляющие устройства связаны друг с другом внешними связями. Входящая в состав многомерной системы отдельная система управления называется автономной, если управляемая ею выходная величина не зависит от значений остальных управляемых величин.

Элементы САУ (САР) имеют следующую классификацию.

По *функциональному назначению*: измерительные; усилительно-преобразовательные; исполнительные; корректирующие.

По *виду энергии*, используемой для работы: электрические, механические, гидравлические, пневматические, комбинированные.

По *наличию или отсутствию вспомогательного источника энергии*: активные, пассивные.

По *поведению в статическом режиме*: статические, астатические.

По *способу воздействия*: прямого действия, непрямого действия.

Все это многообразие условий и сами элементы (блоки) САУ (САР) связаны между собой по определенным схемам: структурным, функциональным, принципиальным и др.

Структурная схема (блок-схема) определяет основные функциональные части АС, их взаимосвязи и служит для общего ознакомления с системой.

Функциональная схема раскрывает назначение элементов АС, связи между ними и объектом управления, а также построение АС. Для этих схем применяются условные графические обозначения, главные из которых даны в прил. 1.

Принципиальной схемой называется изображение АС с помощью условных графических обозначений *всех* элементов системы и связей между ними (прил. 2). В СССР принят разнесенный способ изображения принципиальных схем, при котором различные

элементы *одного и того же* устройства размещают в разных местах схемы так, чтобы число пересечений проводов и их длина были минимальными.

§ 2. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Всякое автоматическое устройство представляет собой достаточно сложную систему, где каждый элемент имеет определенное назначение. Система автоматического измерения включает датчик (чувствительный элемент и элемент преобразования), усилители, линию связи и измерительный прибор. Для системы автоматического контроля необходимо наличие задающего элемента и элемента сравнения.

Принцип измерения заключается в сравнении измеряемой величины с другой величиной, условно принятой за единицу.

С точки зрения метрологии — науки об измерениях — различают два вида измерений:

прямые измерения — измерения, при которых определяемую величину находят путем непосредственного сравнения этой величины с единицей измерения. Например, измерение длины с помощью линейки;

косвенные измерения — определение измеряемой величины путем вычисления по результатам прямых измерений одной или нескольких величин, связанных с искомой функциональной зависимостью. При изучении некоторых физических явлений приходится исследовать зависимость одной какой-либо величины от ряда других, связанных определенными функциональными зависимостями между собой. Такие измерения называются совокупными.

Важную роль в устройствах автоматики играют задающие элементы. Они устанавливают требуемый параметр процесса, закон его изменения или порядок воздействия сигналов в ходе технологического процесса. В зависимости от назначения задающие элементы бывают стабилизирующие, программные, следящие и самонастраивающиеся.

Элемент сравнения (нуль-орган) сравнивает воспринимаемую величину с заданной и выдает их разность, т. е. рассогласование двух сигналов.

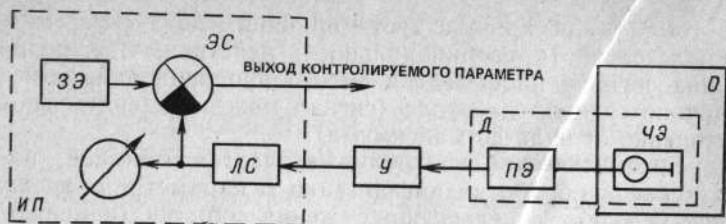
Каждый из названных элементов может быть дискретного действия, т. е. сигнал на выходе элемента от-

сутствует или присутствует (принцип «да» — «нет»), и аналогового (пропорционального) действия, т. е. величина сигнала на выходе элемента пропорциональна величине сигнала на входе (сигнал может изменяться постепенно от нуля до максимума).

Автоматический контроль — это автоматическое получение и обработка информации о параметре и внешних условиях с целью обнаружения событий (изменяющихся по произвольному закону), определяющих управляющее воздействие. Событием может быть любой качественный результат процесса, например, отклонение температуры от нормы в пропарочной камере, или количественный результат работы устройства, например, достижение грузом верхней точки (стрелы крана).

Система автоматического контроля может быть представлена следующим образом: восприятие информации (температура в пропарочной камере, положение башенного крана по отношению к упорам и пр.), преобразование этой информации в удобный для дальнейшего использования сигнал (электрический, гидравлический и пр.), промежуточное преобразование сигнала (усиление, модуляция и пр.), измерительное преобразование (преобразование в сигнал, удобный для получения результата, — запись, световой или звуковой сигнал и пр.), обнаружение признаков контролируемого параметра (температура выше нормы, механизм достиг определенного положения) по заданному закону.

В соответствии с этой последовательностью прохождения сигнала система автоматического контроля будет иметь следующую структурную схему (рис. 4): *ЧЭ* — чувствительный элемент — восприятие состояния объекта; *ПЭ* — преобразовательный элемент — преобразование состояния в сигнал; *Д* — датчик (первичный прибор) — восприятие и преобразование; *У* — усилитель, модуляр и пр. — промежуточное преобразование; *ЛС* — линия связи — передача и восприятие сигнала на расстоянии; *ИП* — измерительный прибор (вторичный прибор) — преобразование в сигнал, удобный для получения окончательного результата; *ЭС* — элемент сравнения — обнаружение признаков контролируемого параметра; *ЗЭ* — задающий элемент. Элемент сравнения, задающие элементы и приемник сигнала могут быть как в самом измерительном приборе (пунктир на схеме), так и вне его.



4. Структурная схема автоматического контроля

С точки зрения метрологии важной частью автоматического контроля является оценка достоверности (точности) измерений. Достоверность измерений количественно оценивается величиной погрешности.

Абсолютная погрешность измерения — это положительная или отрицательная разность между показанием измерительного прибора x_n и действительным значением измеряемой величины x_d : $\pm \Delta x = x_n - x_d$.

Относительная погрешность измерения δ_n — это отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженная в процентах: $\delta_n = (|\Delta x|/x_d) 100$. Например, если действительное значение температуры равно 108°C , а измерительное устройство показывает 105°C , то абсолютная погрешность показаний равна 3°C , а относительная погрешность $(3/108) 100 = 2,8\%$.

Поправкой называют величину, которая должна быть алгебраически прибавлена к показаниям прибора, чтобы получить действительное значение. Поправка равна погрешности показаний, взятой с обратным знаком. Поправки вводят только в показания более совершенных лабораторных приборов. В показания технических приборов поправки не вносятся. Здесь существуют два критерия оценки качества приборов: либо технический прибор обладает погрешностью меньше допустимой и тогда он годен к последующей эксплуатации, либо погрешность получается больше допустимой и тогда прибор не пригоден к применению.

Погрешности измерения подразделяются на систематические и случайные.

Систематической погрешностью называют составляющую погрешности, которая остается постоянной или изменяется по определенному закону при повторных измерениях. Систематические погрешно-

сти могут быть изучены, их значения определены, а результаты измерения уточнены путем внесения поправок. Постоянные систематические погрешности имеют определенный знак — «+» или «-».

Случайной погрешностью называют составляющую погрешности измерений, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Кроме того, в процессе измерения могут быть допущены грубые ошибки, существенно превышающие систематические или случайные погрешности, оправдываемые объективными условиями измерения. В возникновении таких ошибок чаще всего виновны сами наблюдатели и неисправности измерительной аппаратуры.

Измерительные приборы чаще оценивают не по абсолютной, а по приведенной погрешности или по классу точности.

Приведенной погрешностью γ_n называют относительную погрешность показаний, выраженную в процентах от верхнего предела измерения прибора (диапазона измерений или длины шкалы, так называемого нормируемого значения x_n): $\gamma_n = (|\Delta x|/x_n) 100$.

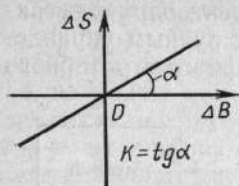
Для приборов, имеющих двустороннюю шкалу, погрешность относят ко всей шкале (например, для ртутного термометра со шкалой от -35 до $+50^\circ\text{C}$ — к значению 85°C), а для приборов, не имеющих нуля, погрешность определяют по отношению к значению, равному разности между верхним и нижним пределами измерения по шкале (например, для потенциометра со шкалой от 400 до 900°C — к значению 500°C).

Погрешности измерения могут быть основными и дополнительными.

Основная погрешность соответствует нормальным условиям работы прибора, в частности, определенной температуре окружающей среды, установленному значению напряжения источника питания, нормальному рабочему положению прибора и др.

Дополнительная погрешность вызывается воздействием внешних условий на прибор при различных отклонениях от нормальных условий работы.

Класс точности прибора в большинстве случаев численно равен сумме допустимых основной и дополнительной приведенных погрешностей, выраженной в процентах.



6. Зависимость перемещения движка реостата от единицы отклонения

7. Принцип действия полуавтоматической системы регулирования скорости движения роторного экскаватора



Требуемую зависимость можно осуществить, например, если изъять указательный прибор со стрелкой и заставить непосредственно движок реостата перемещаться под действием тока I , для чего надо поставить небольшой привод (сервопривод), как показано на рис. 7. Тогда прибор и связанный с ним привод реостата будут совместно осуществлять заданную зависимость, которая называется законом регулирования.

На этом примере ясно видно, что для полной автоматизации процесса регулирования по определенной программе нужно вместо разомкнутой системы (см. рис. 5) создать замкнутую систему (рис. 7), осуществляющую заданный закон регулирования автоматически — без помощи человека. В замкнутой системе входное воздействие (величина тока I) непосредственно зависит от значения выходной величины B . Эта непосредственная связь от выхода системы к ее входу называется обратной связью. Наличие обратной связи и создает замкнутый контур передачи воздействий в системе автоматического регулирования.

Обратная связь осуществляется с помощью устройства, которое служит не просто для регулирования величины B . Оно является, во-первых, чувствительным элементом, реагирующим на отклонение нагрузки от требуемого значения и, во-вторых, само передающее соответствующее воздействие на привод регулирующего реостата. Однако оператор должен установить величину

скорости движения экскаватора, которая затем и будет поддерживаться с помощью полуавтоматической системы управления, приведенной на рис. 7.

Характерной чертой большинства систем автоматического регулирования, кроме обязательного наличия обратной связи, является то, что слабые управляющие сигналы на входе, идущие от измерительного устройства, преобразуются в достаточно мощные воздействия на регулируемый объект. Здесь необходимо также предусмотреть задание системе любого желаемого режима работы (программы). Для этого на входе системы перед усилителем вводится «эталонная» величина (рис. 8), которая соответствует требуемой нагрузке B_0 . Эта величина I_0 сравнивается с I_1 прибора, которая отвечает фактической нагрузке. Разность $I = I_1 - I_0$ называется *рассогласованием* (ошибкой управления). Оно пропорционально отклонению B от требуемого значения B_0 , т. е. ошибке системы регулирования. Эта разность I и подается на усилитель, питающий привод движка регулирующего реостата.

Как видно из примера, автоматическая система регулирования (управления) состоит из двух основных частей: объекта и регулятора (управляющего устройства).

В рассмотренной системе регулирования управляющее устройство автоматической системы состоит из следующих элементов: воспринимающего, устанавливаемого непосредственно на выходе объекта для обнаружения выходной координаты (тока якоря электродвигателя рабочего органа), измерительного элемента, ряда усилительно-преобразовательных элементов и исполнительного устройства (реостата с его приводом), в который входит исполнительный элемент (реостат).

Все функциональные элементы управляющего устройства в той или иной форме последовательно преобразуют сигнал. Сигнал выхода системы (ток якоря электродвигателя рабочего органа) преобразуется воспринимающим элементом в сигнал, удобный для сравнения его с эталоном (измерением его величины). Величина контрольного воздействия должна быть постоянной, но она изменяется в зависимости от внешних воздействий (например, изменение нагрузки, связанное с прочностью грунта) и внутренних воздействий. Воздействия на нашу систему могут носить как заранее планируемый характер, так и непланируемый (помехи).



8. Автоматическая система регулирования с задатчиком регулируемой величины (скорости движения роторного экскаватора)

С измерительного элемента сигнал (ток I_1) поступает на элемент сравнения, где происходит сравнение действительного значения выходной координаты и предписанного значения (алгебраическое сложение I_0 и I_1), т. е. определяется ошибка управления (величина I). Затем соответствующий элемент вырабатывает управляющее воздействие, которое поступает на исполнительное устройство. Таким образом, в нашей системе осуществляется регулирование — обеспечение постоянства выходной координаты (тока якоря или потребляемой мощности электродвигателя рабочего органа) объекта управления, состоящего из рабочего органа (режущего инструмента) и электропривода к нему (электродвигателя).

§ 4. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

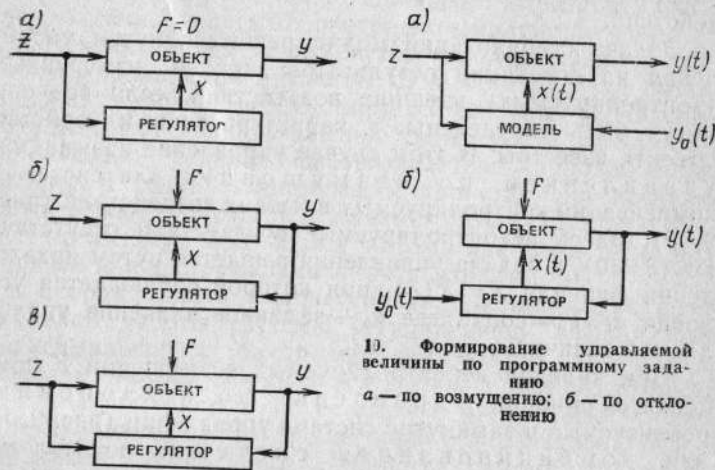
Принципы, положенные в основу автоматического управления, существенно различаются в зависимости от задач, поставленных перед системой, наличия характеристик объекта и характера получаемой информации.

Задачи, поставленные перед системой управления, можно разбить на несколько групп.

1. Стабилизация какой-либо управляемой величины. В этом случае необходимо с заданной точностью поддерживать постоянными те или иные значения управляемой величины.

2. Программное управление одной из управляемых величин. При этом закон изменения управляемой величины может быть как заранее известным и зада-

ваться оператором, обслуживающим систему управления (программное регулирование), так и автоматически соответствовать изменению какой-либо заранее неизвестной измеряемой величины (следающая система).



13. Формирование управляемой величины по программному заданию
а — по возмущению; б — по отклонению

9. Пути решения задачи стабилизации
а — управление по возмущению; б — управление по отклонению; в — управление по возмущению и отклонению

3. Самонастройка системы на оптимум какого-либо из показателей объекта или системы. Это может быть обеспечение экстремального значения управляемой величины или поддержание режима работы объекта, оптимального в определенных условиях его использования по назначению. Самонастройка может сочетаться и со стабилизацией, и с программным управлением.

Как указывалось выше, системы управления разделяются на разомкнутые и замкнутые (см. рис. 1, 2).

В разомкнутых системах управляющее воздействие задается без учета действительного значения управляемой величины на основании цели управления, характеристик объекта и известных внешних воздействий. Такое управление называется жестким, без обратной связи.

В замкнутых системах управляющее воздействие формируется в непосредственной зависимости от управляемой величины, значение которой контролируется.

Разомкнутые системы управления применяют при отсутствии влияния неконтролируемых возмущений. Они служат для стабилизации программного управления, а также для дистанционного управления (управления на расстоянии), но без применения корректирующих воздействий.

Задача стабилизации может решаться путем управления на основании результатов заранее измеренных (контролируемых) внешних воздействий, если все они могут быть определены, а характеристики и свойства объекта известны. В этом случае управление называется управлением по возмущению или системой компенсации контролируемых внешних воздействий (рис. 9, а). Здесь неконтролируемые воздействия отсутствуют ($F=0$), а задача управления решается путем нахождения функции $X=X(Z)$, при которой соблюдается условие $y=y_0=\text{const}$, где y_0 — заданное значение управляемой величины.

При наличии неконтролируемых возмущений F применяется принцип управления по отклонению, реализуемый в замкнутой системе управления (рис. 9, б), или комбинированная система по отклонению и возмущению (рис. 9, в). При управлении по отклонению воздействие на управляющую величину зависит от разности между управляемой величиной и заданной и направлено в сторону уменьшения этой разности.

Программное управление также может осуществляться разомкнутыми и замкнутыми системами.

Если существует точное математическое описание объекта, а все внешние воздействия контролируются, и путем регулирования по возмущению их влияние может быть сведено до нуля, то программное управление объектом может вестись по разомкнутой системе жесткого управления. При этом управлении задается такой закон изменения управляющей величины $X(t)$, который обеспечивает требуемый закон изменения управляемой величины $y(t)$ (рис. 10, а).

В системах, реализующих принцип программного управления по отклонению, на регулятор поступают две величины — требуемый закон изменения $y_0(t)$ и фактическое значение управляемой величины $y(t)$. В регуляторе сравнивается программное задание и регулируемая величина и вырабатывается управляющее воздей-

ствие $X(t)$, обеспечивающее минимальное значение расогласования (рис. 10, б).

Самонастраивающиеся системы управления решают задачи значительно более сложные и разнообразные, чем задачи, решаемые программными системами.

Первая задача таких систем — поддержание экстремума управляемой величины. Для этой цели на объект подают пробные воздействия со стороны управления, анализируют знак изменения управляемой величины и производят управляющее воздействие, приближающее режим к точке экстремума. Устройства, обеспечивающие режим работы управляемого объекта, близкий к оптимальному, называются автоматическими оптимизаторами или экстремальными регуляторами.

Вторая задача самонастройки — поддержание оптимальной работы системы регулирования по критерию максимального ее быстродействия. В этом случае показателем экстремума является время, в течение которого система приходит в соответствие с изменением условия регулирования. Это время может анализироваться с помощью специального устройства самонастройки. На основании анализа это устройство изменяет параметры регулятора таким образом, чтобы время регулирования было минимальным.

В сложных, не имеющих математического описания системах с многими неконтролируемыми воздействиями для нахождения оптимального условия работы необходимо запоминать различные режимы управления, учиться управлять. Это осуществляется самообучающимися системами автоматического управления, в которых с помощью специальных устройств запоминаются различные ситуации управления. В зависимости от входных и выходных величин автомат может выбирать из памяти системы соответствующие значения управляющих воздействий и соответственно воздействовать на объект. При этом могут реализоваться принципы воздействия как по возмущению, так и по отклонению.

§ 5. ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ

Главным элементом замкнутой системы управления (регулирования) является звено обратной связи, с помощью которого на основании информации о значении

Вариацией называют наибольшую разность между повторными показаниями приборов, соответствующими одному и тому же действительному значению измеряемой величины при неизменных внешних условиях. Например, если трехкратное измерение температуры кипящей воды при постоянном атмосферном давлении термометр показывает в первый раз $100,2^{\circ}\text{C}$, во второй раз — $99,6^{\circ}\text{C}$, в третий — $99,8^{\circ}\text{C}$, то вариация показаний термометра будет равна $0,6^{\circ}\text{C}$. Так же, как и погрешность, вариацию часто оценивают в процентах от верхнего предела измерений прибора (или от алгебраической разности верхнего и нижнего пределов измерений).

Существуют два близких по наименованию, но различных по смыслу термина: чувствительность и порог чувствительности.

Чувствительностью измерительного прибора называют отношение линейного или углового перемещения стрелки или пера прибора к единице измеряемой величины, вызвавшей это перемещение. Например, если у одного манометра перемещение стрелки равно 6 угловым делениям на единицу давления, а у второго — 10 делениям, то второй более чувствителен, чем первый.

Порогом чувствительности измерительного прибора называют наименьшее изменение измеряемой величины, способное вызвать малейшее перемещение стрелки или пера прибора. Порог чувствительности у измерительных приборов возникает прежде всего за счет трения в кинематических звеньях. Поэтому при определении порога чувствительности требуется предварительно исключить влияние вариаций, возникающих по другим причинам.

Погрешности, вариации и порог чувствительности по сравнению с измеряемыми величинами относительно невелики, и в обычных условиях их принято оценивать величинами с двумя значащими цифрами. Например, приведенная погрешность $0,83\%$, а не $0,826\%$.

Совокупность действий, производимых с целью оценки погрешностей приборов, называют *поверкой*.

§ 3. ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЕ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Для пояснения принципа действия всякой автоматической системы управления рассмотрим регулирование скорости движения (подачи) роторного экскаватора в зависимости, например, от прочности грунта.

На рис. 5 показана блок-схема электропривода рабочего органа роторного экскаватора с ручным управлением. Нагрузка B на валу электропривода роторного



5. Принцип действия системы регулирования скорости движения роторного экскаватора

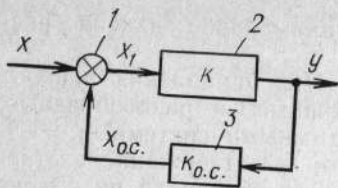
экскаватора зависит от прочности грунта. В свою очередь ток якоря электропривода I является функцией нагрузки на рабочем органе. Шкалу прибора, измеряющего ток I , можно проградуировать в величине нагрузки B . Человек, обслуживающий экскаватор, следя за углом поворота φ стрелки прибора, читает на его шкале значение нагрузки B . В зависимости от того, в какую сторону она отклонилась от требуемого значения, человек производит перемещение S движка реостата, изменяющего частоту вращения электродвигателя и скорость движения экскаватора в соответствующую сторону.

Автоматизируя этот процесс, прежде всего надо проанализировать функции человека в нем. Человек здесь осуществляет перемещение движка реостата в зависимости от наблюдаемого им отклонения нагрузки.

Такой простейшей зависимостью является пропорциональность между перемещением движка реостата и величиной отклонения с учетом направления (знака) этого перемещения (рис. 6):

$$\Delta S = K \Delta B,$$

где ΔB — нежелательное отклонение нагрузки от некоторого требуемого заданного программой ее значения B_0 ; K — коэффициент пропорциональности, который показывает, сколько, например, сантиметров перемещения ΔS движка реостата приходится на каждую единицу отклонения.



11. Структурная схема звена, охваченного обратной связью
1 — элемент сравнения; 2 — управляемое звено; 3 — звено обратной связи

управляемого параметра таким образом формируется управляющее воздействие, что объект управления находится в состоянии, отвечающем поставленной цели управления. Связь, с помощью которой соединяется выход всей системы с ее входом, называется главной или внешней обратной связью. Связь, с помощью которой передается воздействие от выхода какого-либо звена на его вход или на вход одного из предыдущих звеньев, т. е. обратная связь, охватывающая лишь часть звеньев системы, называется местной или внутренней связью.

Все звенья основной цепи, охваченные главной обратной связью, образуют основной замкнутый контур САР, содержащие только одну главную обратную связь, называются одноконтурными. Автоматические системы, содержащие дополнительные обратные или дополнительные прямые связи, называются многоконтурными.

При помощи главной обратной связи измеряется в каждый момент времени действительное значение регулируемой величины и передается на вход системы к элементу сравнения. Последний сравнивает действительное и заданное значения регулируемого параметра, определяет величину рассогласования и в соответствии с этим воздействует на управляющее устройство с целью устранения рассогласования.

На рис. 11 показано звено 2, охваченное обратной связью 3 с коэффициентом передачи (усиления) $K_{0.c.}$

Коэффициентом передачи называется отношение приращения выходного сигнала ΔY к входному ΔX : $K_{0.c.} = \Delta y / \Delta X$.

Входной сигнал через обратную связь 3 поступает к элементу сравнения 1, в которой происходит алгебраическое сложение входного сигнала X с сигналом обратной связи $X_{0.c.}$ Если сигнал обратной связи $X_{0.c.}$ складывается с входным сигналом X , такая обратная связь называется положительной, а если вычитается — отрицательной. Значит,

$$X_1 = X \pm X_{0.c.}$$

Для звена без обратной связи

$$y = KX = KX_1,$$

с обратной

$$X_{0.c.} = K_{0.c.}y.$$

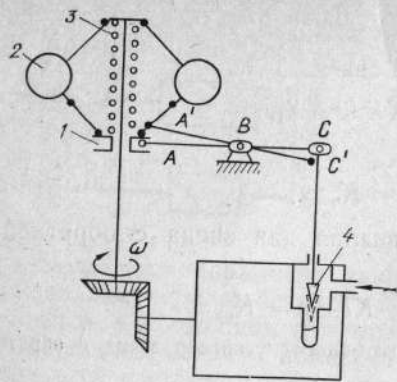
Решая совместно уравнения для звена с обратной связью, получаем

$$y = KX / (1 \pm KK_{0.c.}) = K_{рез}X,$$

где $K_{рез}$ — результирующий коэффициент усиления звена с обратной связью;
знак «—» в знаменателе действителен для положительной обратной связи, «+» — для отрицательной.

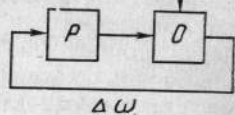
У жестких безынерционных связей выходной сигнал $X_{0.c.}$ зависит только от y , т. е. они могут быть представлены алгебраической функцией с обратной связью.

Рассмотрим обратную связь на примере автоматического регулятора. Все строительные и дорожные машины, оснащенные дизельными двигателями внутреннего сгорания ДВС, имеют центробежные регуляторы. Их назначение — увеличивать подачу топлива в цилиндры ДВС (например, у бульдозеров в момент резания грунта ножом) и уменьшать ее при холостом ходе. Упрощенная схема такого регулятора показана на рис. 12. Исполнительным органом регулятора на данной схеме является игла 4, изменяющая подачу топлива в двигатель (в действительности у дизеля перемещается не игла, а рейка топливного насоса высокого давления). Если бульдозер выполняет переход от резания грунта к его транспортировке, то сопротивление перемещению уменьшается и создается избыточный крутящий момент, а скорость вращения вала двигателя начинает расти. Под действием возросшей центробежной силы расходятся грузики 2, преодолевая силу пружины 3 чувствительного элемента регулятора, муфта 1 регулятора поднимается вверх и игла 4 опускается вниз. Уменьшается подача топлива в двигатель, и уменьшается скорость вращения вала двигателя. Таким образом регулятор противодействует изменению регулируемой величины — скорости вращения, стремится стабилизировать ее значение.



12. Регулятор частоты вращения дизельного ДВС
1 — муфта; 2 — грузики; 3 — пружина; 4 — игла (дозатор топлива)

13. Структурная схема регулятора ДВС



На рис. 13 показана структурная схема рассматриваемого регулятора. Здесь объект регулирования O (дизельный двигатель) подвергается как изменению нагрузки (пунктирная стрелка), так и управляющему воздействию регулятора P (сплошная стрелка). Это вызывает изменение скорости вращения двигателя $\Delta\omega$, оказывающее обратное воздействие на регулятор (показано жирной линией со стрелкой). Следовательно, такой регулятор обладает отрицательной обратной связью, т. е. уменьшение скорости вращения вала двигателя вызывает увеличение подачи топлива и наоборот.

§ 6. КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

В нашей стране разработана Государственная система приборов (ГСП), в рамках которой начат выпуск датчиков, преобразователей, приборов, исполнительных механизмов и других средств и устройств автоматизации с унифицированными входными и выходными сигналами. Конструкции устройств, охваченных ГСП, также унифицированы. Введение такой системы способствует широкому внедрению стандартных элементов и модулей в средствах автоматизации и сокращению неоправданного увеличения их номенклатуры.

Рассмотрим некоторые положения ГСП. Так, для

унификации блоков, приборов и устройств электрической ветви ГСП для сигналов тока желательны диапазоны: 0—5 мА; 0—20 мА; а для сигналов напряжения: 0—10 мВ; 0—100 мВ; 0—1 В; 0—10 В; частотные характеристики ограничены диапазоном 1500—2500 Гц. Для пневматической ветви, согласно ГСП, выделен диапазон давления сжатого воздуха 20...100 кПа.

По функциональному признаку все изделия ГСП разделяются на четыре группы устройств (средств автоматики).

1. Средства для получения информации о параметрах состояния объектов контроля, регулирования или управления, называемые измерительными элементами или датчиками. В эту группу входят первичные измерительные преобразователи (переводят контролируемый параметр в выходную физическую величину: напряжение, ток, усилие и т. д.) и нормирующие преобразователи, переводящие выходной сигнал в унифицированный.

2. Средства для приема, передачи и переработки измерительной информации, а также для преобразования и передачи управляющих команд, включающие усилители сигналов, каналы связи, преобразователи и сравнивающие устройства, называемые преобразующими элементами. В эту группу входят устройства телемеханики, телесигнализации, телеуправления, устройства согласования и др.

3. Средства для получения информации о задачах автоматического контроля, регулирования или управления, включающие запоминающие и программные устройства, преимущественно на базе микропроцессов и микроЭВМ, которые называются задающими элементами.

4. Средства для регулирования параметров контролируемых процессов, называемые исполнительными элементами. Они состоят из усилителей входных сигналов и исполнительных механизмов, преобразующих эти сигналы в энергию механических перемещений.

В некоторых автоматических системах присутствуют не все перечисленные элементы, однако отдельные элементы могут выполнять сразу несколько функций. Например, центробежный регулятор частоты вращения вала двигателя прямого действия является как измерительным элементом, так и исполнительным устройством.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое автоматизация процессов?
2. Что такое объект управления, управляющее устройство?
3. Как классифицируются системы автоматического управления по назначению — задачам, стоящим перед системами?
4. Каковы основные функциональные элементы системы автоматического измерения?
5. Основные виды погрешностей.
6. Что понимается под классом точности прибора?
7. Что такое управление по отклонению, по возмущению?
8. Что понимается под экстремальным управлением?
9. Что такое кибернетика?
10. Каково главное назначение обратной связи в системах управления и регулирования?

ГЛАВА II

ДАТЧИКИ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ

§ 7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ДАТЧИКОВ

Датчик (измерительный преобразователь) — средство измерения, которое преобразует измеряемую физическую величину в сигнал для передачи, обработки или регистрации.

Основные функции датчиков — преобразование одной физической величины (давления, температуры, перемещения и т. д.) в другую, обычно электрическую. Первый преобразователь, непосредственно воспринимающий параметр состояния (например, температуру, давление, перемещение машин и их частей), называется *чувствительным элементом* датчика. Параметр состояния как физическая величина может быть представлен в единицах ее измерения (например, давление — в Па) или в косвенных показателях (например, то же давление — пропорционально величине электрического сопротивления). После основного (воспринимающего) элемента в системе датчика может устанавливаться другой преобразователь, служащий для получения в удобной форме сигнала о параметре. Вид выходного сигнала зависит от условий дальнейшего его использования.

В простейшем случае датчик состоит из одного преобразующего элемента, выполняющего две функции: восприятия и преобразования. К таким датчикам относятся, например, термометр сопротивления, термопара. Сложные датчики могут состоять из большего числа преобразующих элементов, каждый из которых в других устройствах может использоваться как самостоятельный датчик. Параметр состояния, воспринимаемый чувствительным элементом, называется входной величиной датчика, а сигнал последнего преобразующего элемента — выходной величиной.

Датчики классифицируют по характеру входного и выходного сигналов, а также по принципу действия. По входному сигналу (по назначению) различают датчики температуры, перемещения (скорости), давления и др. По выходному сигналу датчики делят на неэлектрические и электрические, а последние — на параметрические и генераторные. По принципу действия различают датчики активного сопротивления, емкостные, электромагнитные, термоэлектрические и др. В *параметрических* датчиках под действием входного сигнала изменяется какой-либо параметр датчика (сопротивление, емкость, индуктивность) и соответственно его выходная величина. Для работы параметрических датчиков требуется внешний источник энергии. *Генераторные* датчики под действием входного сигнала генерируют ЭДС и не требуют дополнительного источника энергии. Такие датчики включают термопары, фотоэлементы, генераторы напряжения.

Свойства датчиков определяются их статическими, динамическими и частотными характеристиками и оцениваются рядом показателей.

Чувствительность датчика определяют исходя из его статической характеристики. Чувствительность K равна отношению изменения выходного сигнала ΔY к изменению входного сигнала ΔX ($K = \Delta Y / \Delta X$) и является размерной величиной. У линейных датчиков чувствительность во всем рабочем диапазоне измерений одинакова, а уравнение статики имеет вид: $Y = KX + X_0$.

Инерционность датчика заключается в запаздывании появления или исчезновения сигнала на выходе по сравнению с моментом появления или исчезновения сигнала на входе.

Минимальное значение входного сигнала, которое

можно обнаружить с помощью данного датчика, составляет его порог чувствительности, а максимальное значение входного сигнала, которое может быть воспринято датчиком без искажения и повреждения, — предел преобразования. Разница между пределом преобразования и порогом чувствительности составляет *динамический диапазон* измерения.

На СДМ устанавливают электрические и неэлектрические датчики. Полученные с их помощью данные в дальнейшем используют для информирования машиниста о состоянии узлов и агрегатов машины и для автоматического регулирования контролируемых процессов. В первом случае на приборном щитке устанавливают вторичные датчики (указатели), преобразующие сигнал первичного датчика в сигнал, удобный для визуального наблюдения (световая и стрелочная индикация). Во втором случае датчик является частью системы автоматического регулирования.

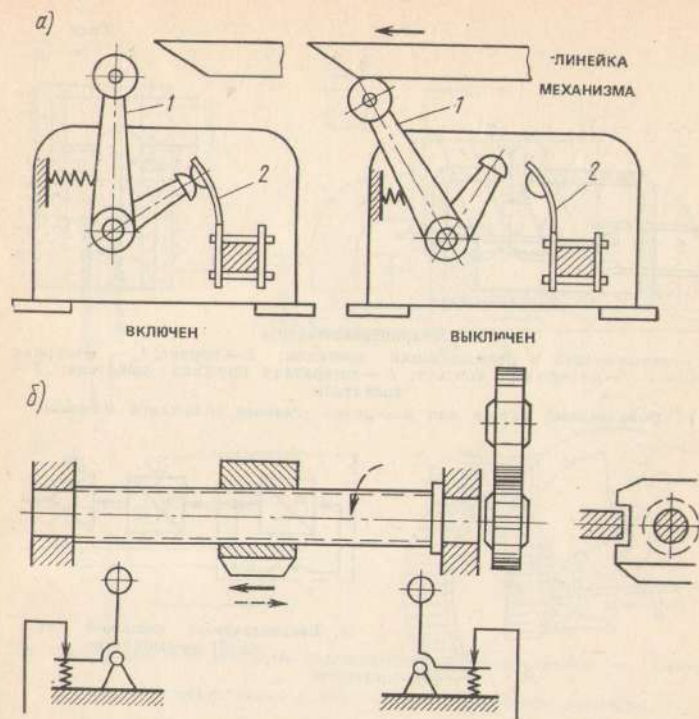
§ 8. ДАТЧИКИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Устройства, служащие для получения информации о положении элементов, устройств, механизмов или их частей путем преобразования линейных или угловых перемещений в электрические или другие величины, называются датчиками перемещения или положения.

Простейшее устройство двухпозиционного (релейного) типа для контроля положения механизмов или их частей — концевой или путевой выключатель.

Контактный концевой (конечный) выключатель рычажного типа, ограничивающий линейное перемещение (рис. 14, а) работает следующим образом. При достижении механизмом или его частью какого-либо крайнего положения этот механизм нажимает на рычаг 1 концевой выключателя, который переключает контактную группу 2.

Для ограничения углового перемещения механизма служит, например, шпindelный выключатель (рис. 14, б). Он имеет винт, соединенный с валом механизма через зубчатую или цепную передачу, при вращении которого гайка (кулачок) перемещается до наезда на левый или правый выключатель. В редукторных выключателях вращение от вала механизма передается рычагу выключателя через червячный редуктор, а также

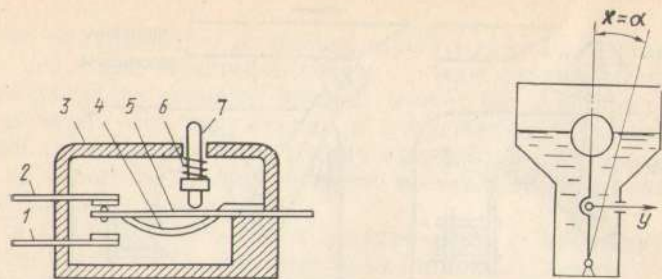


14. Концевые выключатели
а — рычажный; б — шпindelный; 1 — рычаг; 2 — контактная группа

замыкающие и размыкающие кулачковые шайбы, смонтированные на его выходном валу.

В слаботочных системах автоматического управления распространены так называемые микропереключатели (рис. 15). Они имеют один замыкающий 1 и один размыкающий 2 контакты, расположенные в корпусе 3. С помощью пружины 4 и толкателя 7 приводится в действие подвижный контакт 5. Толкатель приводится в движение рабочим органом машины, положение которого контролируется. В приведенной схеме концевой выключатель выключает привод рабочего органа, когда последний достигает крайнего положения. Второй контакт концевой выключателя может быть использован для включения, например, механизма реверса.

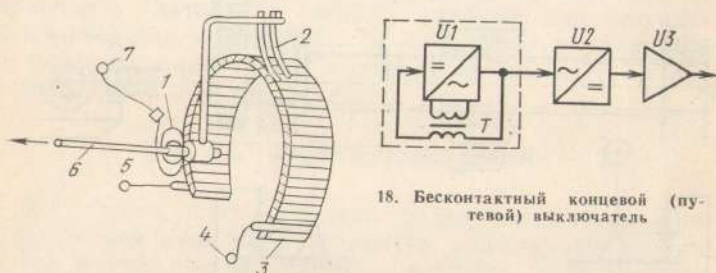
Датчики углового положения (ДУП) предназначены для автономного контроля углового по-



15. Микропереключатель

1, 2 — замыкающий и размыкающий контакты; 3 — корпус; 4 — фигурная пружина; 5 — подвижный контакт; 6 — возвратная пружина толкателя; 7 — толкатель

16. Поплавковый датчик для измерения углового положения машины



18. Бесконтактный концевой (путевой) выключатель

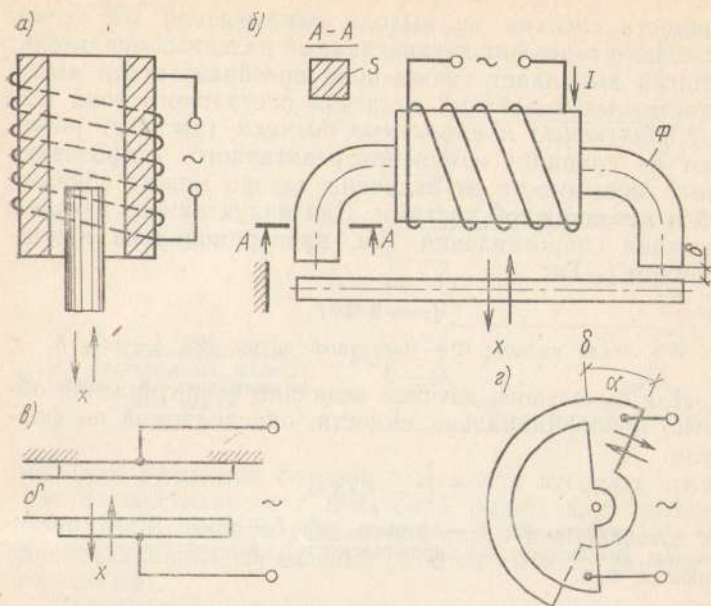
17. Реостатный датчик

1 — пружина (электропроводная); 2 — перемещающийся контакт; 3 — обмотка на каркасе; 4, 5, 7 — выводы обмотки; 6 — ось

ложения рабочего органа или рамы СДМ. Они бывают маятниковые или поплавковые (рис. 16). Отклонение машины от горизонтали вызывает поворот корпуса датчика и перемещение штока, с которым связан золотник распределителя.

На рис. 17 показан реостатный датчик сопротивления непрерывного действия, представляющий собой реостат с перемещающимся контактом 2. Подвижный контакт жестко укреплен на оси, которая связана с положением механизма. Каждому угловому положению оси соответствует определенная величина сопротивления реостата.

В схемах автоматики помимо контактных датчиков положения применяют индуктивные, емкостные, магнитные, полупроводниковые и другие бесконтактные дат-



19. Преобразователи величины перемещения в индуктивное и емкостное сопротивление

а, б — индуктивные элементы; в, г — емкостные элементы

чики, а также фотоэлементы и гамма-электронные реле. Применение указанных датчиков имеет ряд преимуществ по сравнению с механическими датчиками вследствие отсутствия непосредственного механического контакта между контролируемым движущимся объектом и чувствительным элементом.

На рис. 18 показана функциональная схема бесконтактного концевой выключателя. Преобразователь выключателя представляет собой полупроводниковый генератор. Возникновение или отсутствие в цепи ЭДС U_1 зависит от наличия металлического экрана между его обмотками T . Металлическим экраном может служить выступающий язычок (зубец) на тонком вращающемся диске (для измерения угловых перемещений) или на рейке (для линейных перемещений). С целью повышения разрешающей способности выключателей, уменьшения габаритов чувствительного элемента и обратного воздействия его на контролируемый элемент, а также для получения большей

мощности сигнала на выходе выключателя $U3$ схема последнего содержит двухкаскадный релейный усилитель, который выполняет также роль преобразователя высокочастотных колебаний в сигнал постоянного тока $U2$.

Индуктивные и емкостные датчики (рис. 19) работают на принципе изменения реактивного сопротивления в зависимости от величины зазора между подвижной и неподвижной частями. Для индуктивного датчика величина сопротивления, Ом, пропорциональна индуктивности L , Гн:

$$L = W\Phi/I,$$

где W — число витков; Φ — магнитный поток, Вб; I — ток, А.

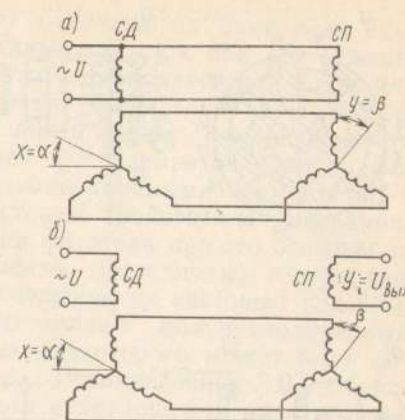
Для емкостного датчика величина сопротивления обратно пропорциональна емкости, определяемой по формуле

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon S/\delta,$$

где C — емкость, Ф; S — площадь, м²; δ — зазор, м; ε — относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 — электрическая постоянная, Ф/м.

Для измерения углов рассогласования механически не связанных валов, например при дистанционном управлении объектами, могут использоваться специальные электрические машины — сельсинны. Сельсин имеет две обмотки: однофазную и трехфазную, которая состоит из соединенных в звезду трех однофазных обмоток, магнитные оси которых сдвинуты на 120° относительно друг друга. Одна из обмоток располагается на статоре, другая — на роторе.

Сельсинная связь состоит из двух сельсинов: сельсина-датчика СД и сельсина-приемника СП. Концы трехфазных обмоток СД и СП соединяются, однофазная обмотка СД подключается к источнику переменного напряжения. Если однофазная обмотка СП также подключается к тому же источнику питания, сельсинная связь работает в индикаторном (силовом) режиме (рис. 20, а). При повороте ротора СД на некоторый угол α в обмотке статора возникают токи, создающие в ней магнитный поток. При взаимодействии этого потока с магнитным потоком ротора СП, повернутого на угол β , возникает синхронизирующий момент, который стремится устранить рассогласование. Вследствие тре-



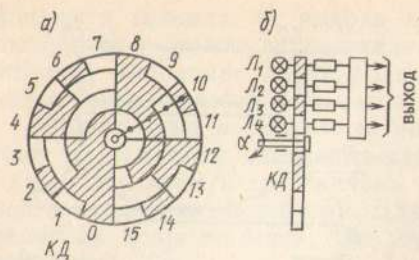
20. Сельсинная связь
а — индикаторный (силовой) режим; б — трансформаторный режим

ния при вращении роторов и момента нагрузки слежение осуществляется с некоторой ошибкой, т. е. $\alpha \neq \beta$. Этот режим работы сельсинной связи используется для дистанционного управления работой объекта (индуктивная схема).

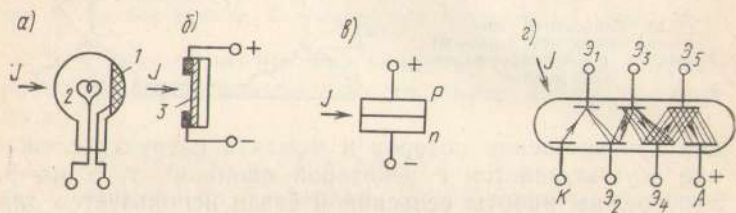
Однофазная обмотка СП может не подключаться к источнику питания (рис. 20, б). В этом случае сельсинная связь работает в трансформаторном режиме и используется как датчик, входным сигналом которого является угол поворота СД (угол рассогласования γ), а выходным — напряжение в однофазной обмотке СП, близкое к $U_{сп} = U_0 \cos \gamma$. Синхронизирующий момент при этом незначителен.

Цифровые датчики углов поворота — основные элементы измерительных систем с цифровым отсчетом. Они являются датчиками дискретного действия. Наиболее широкое применение получили датчики с кодирующим диском (рис. 21).

Кодирующие диски КД наиболее часто выполняются либо контактными, либо с фотоэлектрическим считывающим устройством. В первом случае рисунок кода наносится на диск токопроводящим материалом, считывание производится при помощи щеток, во втором — имеются прозрачные участки (рис. 21, а) кодовой маски. Диск КД просвечивается источником света — лампой Л, расположенной по одну сторону (рис. 21, б), по другую сторону диска располагаются фотоэлементы или фотодиоды. Угол считывается при помощи закодирован-



21. Цифровой датчик углов поворота



22. Фотоэлектрические датчики

а — схема фотоэлемента; б — схема фоторезистора; в — схема фотодиода; г — схема фотоумножителя; 1 — катод; 2 — анод; 3 — слой полупроводника

ного сигнала. Обычно для записи применяют систему двойного счисления.

Фотоэлектрические датчики применяют для дистанционного измерения перемещений. Принцип работы этих датчиков основан на фотоэлектрическом эффекте. Различают следующие фотоэлектрические датчики: фотоэлементы, фоторезисторы, фотодиоды и фототриоды.

Фотоэлемент — это устройство, в котором под действием падающего на него света возникает фототок. Они бывают электровакуумными и полупроводниковыми.

Электровакуумный фотоэлемент представляет собой стеклянную вакуумную колбу с нанесенным внутри с одной стороны слоем катода и с центральным анодом (рис. 22, а). В этом устройстве фотоэлектрический ток насыщения прямо пропорционален величине светового потока J , поглощаемого катодом.

Фоторезисторы — это устройства, имеющие светочувствительный слой однородного полупроводника (селен, сурьма и др.) (рис. 22, б).

Работа фоторезистора основана на изменении сопротивления полупроводникового слоя при его освещении. Следует отметить, что у фоторезисторов изменяется характеристика (величина силы тока) при изменении температуры окружающей среды. Чувствительность фоторезисторов выше, чем фотоэлементов. Однако фотоэлементы являются безынерционными элементами, в то время как фоторезисторам свойственна инерционность процесса нарастания фототока при его освещении.

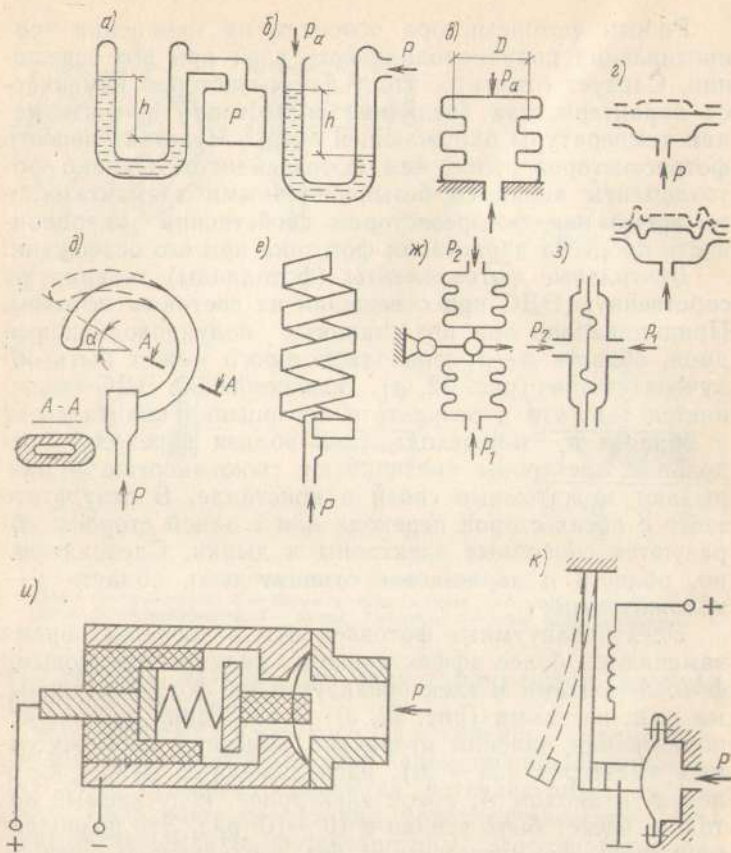
Вентильные фотоэлементы (фотодиоды) генерируют собственную ЭДС при освещении их световым потоком. Принципиально они представляют полупроводниковый диод, область $p-n$ -перехода которого может быть облучена светом (рис. 22, в). Возникновение ЭДС объясняется тем, что в результате поглощения кванта света в области $p-n$ -перехода (или вблизи перехода) отдельные электроны увеличивают свою энергию и разрывают межатомные связи в кристалле. В результате этого с обеих сторон перехода или с одной стороны образуются свободные электроны и дырки. Следовательно, область n заряжается отрицательно, область p — положительно.

Электровакуумные фотоэлементы в последнее время заменяются более эффективными полупроводниковыми фотоэлементами и электровакуумными фотоэлектронными умножителями (рис. 22, г). В последних за счет использования явлений вторичной эмиссии промежуточных эмиттеров ($\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_5$), расположенных между катодом K и анодом A , поток электронов, испускаемый катодом, может быть усилен в $10^5 - 10^6$ раз. Это позволяет применять фотоумножители без последующего усиления сигнала.

С точки зрения динамики фотодиоды безынерционны, однако их характеристики изменяются под воздействием температуры.

§ 9. ДАТЧИКИ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Любые перемещения тел в пространстве происходят только под силовым воздействием на них других тел или полей. Чтобы выявить эти силы и разумно управлять ими, применяют различные силовые датчики. Их условно можно разделить на следующие группы: датчики усилий (давления), непосредственно воспринимаю-



23. Чувствительные элементы давления

a — U-образная запаянная трубка; *б* — U-образная незапаянная трубка; *в* — сильфон; *г* — мембрана; *д, е* — трубчатые пружины; *ж, з* — дифференциальные датчики; *и, к* — контактный и тепловой датчики давления

щие давление жидкостей и газов; датчики деформации твердых тел; датчики колебаний.

Давление — сила, приходящаяся на единицу площади. При определении давления применяют в основном первичные преобразователи силы, связанные: с изменением высоты столба жидкости, перемещением упругих элементов, электрическим сопротивлением или электрической силой.

В табл. 1 приведены основные чувствительные элементы датчиков силового воздействия, показанные на рис. 23—28.

Как показано на рис. 23, действие механических чувствительных элементов давления сводится к зависимости (кроме жидкостных элементов)

$$\Delta b = k \Delta p,$$

где Δb — величина перемещения элемента, мм;
 k — коэффициент, обуславливающий геометрические размеры и механические свойства элемента;
 Δp — изменение давления, Па.

Для жидкостного U-образного элемента уровень жидкости равен:

$$h = (p - p_a) / \gamma,$$

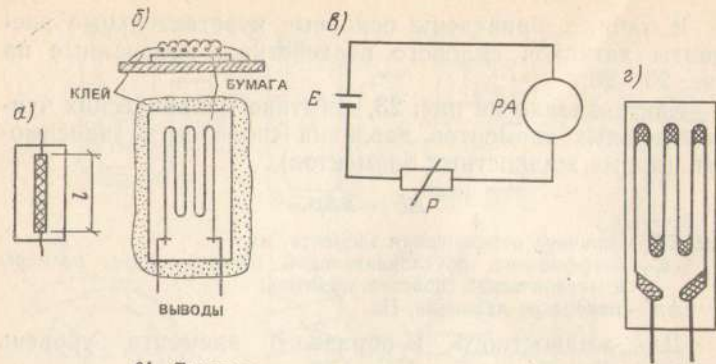
где p — давление в сосуде (давление рабочей среды), Па;
 p_a — атмосферное давление, Па;
 γ — удельный вес жидкости, Н/м³.

1. Классификация и принцип действия чувствительных элементов датчика силового воздействия

Параметр	Чувствительный элемент	Преобразуемый параметр	Схема на рис. №
Давление	Жидкостный	Высота столба жидкости от давления	23, а, б
>	Сильфон	Перемещение свободного конца герметичной гофрированной трубки	23, в
>	Мембрана	Перемещение плоскости гофрированной пластины	23, г, и, к
>	Трубчатая пружина	Угол раскручивания пружины	23, д, е
Деформация (давление)	Тензометр	Электрическое сопротивление	24, 25
Колебания (упругая деформация)	Пьезоэлектрический кристалл	Электрический заряд элемента (пьезоэлектрический эффект)	27, 28

Все рассмотренные элементы, кроме жидкостного с запаянной трубкой, являются дифференциальными, так как элементы находятся под действием разности давлений $p - p_a$.

При необходимости измерять разность давлений в двух точках p_1 и p_2 удобнее применять специальные



24. Тензометрические чувствительные элементы
 а — тензолит; б — проволочный элемент; в — схема включения датчика; г — фольговый элемент

дифференциальные чувствительные элементы, используя те же сильфоны или мембраны (рис. 23, ж, з).

При частых колебаниях давлений упругие чувствительные элементы вследствие их инерционности применять нецелесообразно, а иногда и невозможно. В этих случаях, а также в случае определения деформации (результат воздействия давления на тело) применяют специальные *тензометрические* или *пьезоэлектрические датчики*.

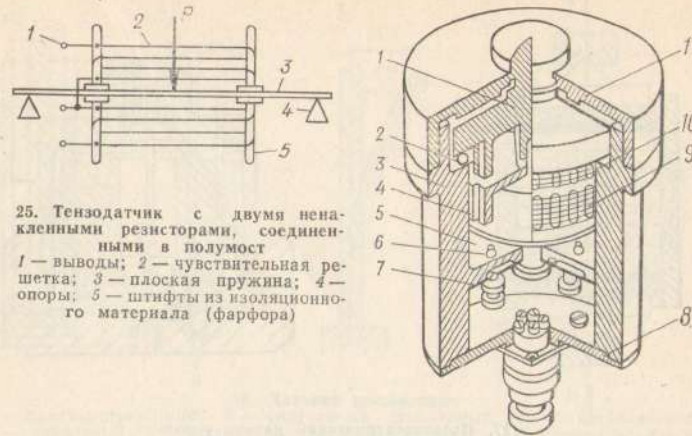
Принцип действия тензометрических датчиков (рис. 24) основан на тензометрическом эффекте — зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента (уголь, графит, металл, полупроводник) от его деформации.

Элементы, выполненные в виде стержня из порошка угля, сажи или графита, наклеенного на полоску бумаги (рис. 24, а), называются *тензолитами*.

Более широкое распространение получили датчики с проволочными чувствительными элементами (рис. 24, б). На полоску бумаги наклеивают зигзагообразную тонкую константовую или нихромовую проволоку с медными выводами.

Схема включения датчика изображена на рис. 24, в. При изменении силы P изменяются размеры тела (детали), на которые наклеен тензодатчик. Это вызывает изменение его длины и, следовательно, его электрического сопротивления, регистрируемого прибором $РА$.

Датчики, в которых проволочная решетка заменена



25. Тензодатчик с двумя ненаклонными резисторами, соединенными в полумост
 1 — выводы; 2 — чувствительная решетка; 3 — плоская пружина; 4 — опоры; 5 — штифты из изоляционного материала (фарфора)

26. Датчик ДСТБ-С-016

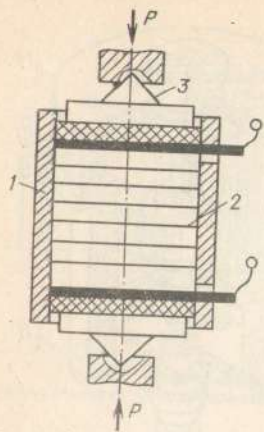
1 — упругий элемент; 2 — опорный шарикоподшипник; 3 — корпус; 4 — опора тензорезисторов; 5 — каркас компенсационных резисторов; 6 — проходной изолятор; 7 — плата контактная; 8 — нижняя крышка; 9 — резистор температурной компенсации; 10 — тензорезистор; 11 — верхняя крышка

решеткой из тонкой фольги, обладают значительно меньшей чувствительностью к поперечным деформациям, так как на закруглениях решетка имеет значительно большее сечение, в связи с чем чувствительность этого датчика к поперечным деформациям ничтожна.

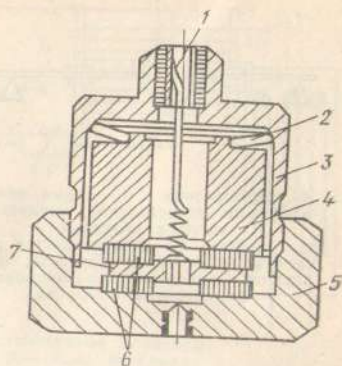
В практике испытаний конструкций применяют датчики с непетлевой решеткой, которые практически не имеют поперечной чувствительности. Решетка в этих датчиках образуется пучком параллельных тонких проволок, которые располагаются один от другого на расстоянии 0,2—0,6 мм и последовательно соединяются низкоомными перемычками из тонкой фольги. Эти датчики, как и фольговые, обеспечивают высокую стабильность измерений.

Деформации при высоких температурах измеряют датчиками с термокомпенсированной решеткой, состоящей из двух материалов с различными температурными коэффициентами сопротивления, например из константана и меди.

В последние годы более широко применяются полупроводниковые тензорезисторы, которые обладают зна-



27. Пьезоэлектрический датчик усилий
1 — корпус; 2 — пьезоэлектрические пластины; 3 — опорная плита

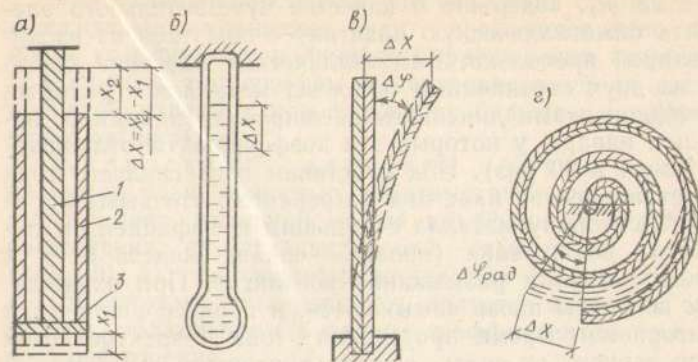


28. Пьезоэлектрический вибродатчик
1 — токоприемник; 2 — пружина; 3 — корпус; 4 — инерционный элемент; 5 — основание корпуса; 6 — пьезоэлектрические шайбы; 7 — электрод

чительно большей тензочувствительностью, чем константановые проволочные и фольговые. Коэффициент тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов достигает 100 и даже 200, тогда как у константановых равен 2. Но температурные характеристики полупроводников тензорезисторов значительно хуже константановых.

Кроме наклеиваемых тензорезисторов в системах автоматического управления применяют ненаклеиваемые проволочные тензорезисторы. Они обладают рядом ценных качеств, основное из которых — высокая стабильность нулевой точки. Но ненаклеиваемые тензорезисторы имеют сложную конструкцию (рис. 25), что затрудняет их изготовление и повышает стоимость. Однако в ряде случаев это оправдано. Так в конструкции датчика ДСТБС-016 (рис. 26), предназначенного для измерения сжимающих усилий, применены ненаклеиваемые тензорезисторы. Датчик используется в системах автоматического взвешивания материалов, хранящихся в бункерах и закрытых емкостях (см. гл. XI).

Принцип действия *пьезометрических датчиков* основан на преобразовании механической энергии в электрическую в соответствии с пьезоэлектрическим эффектом — возникновением электрических зарядов на по-



29. Датчики расширения
а — dilatометрический; б — жидкостный стеклянный; в — биметаллический; г — спиральный; 1 — внутренний стержень; 2 — наружный стержень; 3 — днонышко

верхностям некоторых кристаллов, например, титаната бария при механическом воздействии на них (рис. 27).

С точки зрения динамики эти датчики являются безынерционными элементами, поэтому их наиболее эффективно использовать в быстро протекающих динамических процессах. Для измерения упругих колебаний частей машин применяют вибродатчики (рис. 28). Здесь пьезоэлектрические шайбы 6 находятся между подпружиненной массой 4 и основанием корпуса 5 с резьбовым отверстием для крепления на вибрирующую поверхность. Благодаря инерции масса 4 оказывает на пьезокристаллы периодическое силовое воздействие с частотой колебаний контролируемого тела. Диапазон измерения колебаний от 15 до 30 000 Гц. Вибродатчики такого типа широко применяются для оценки технического состояния агрегатов СДМ, например топливоподающей аппаратуры дизельного ДВС. В этом случае вибродатчики крепятся на форсунки.

Датчики давления в системе смазки ДВС работают следующим образом. В *контактных* датчиках давления (см. рис. 23, и) при снижении давления ниже допустимого уровня мембрана перемещается и соединенный с ней подвижной контакт замыкает электрическую цепь, в которой установлена сигнальная лампа.

Датчики давления *электротеплового* типа, устанавливаемые в масляном канале блока цилиндров (см.

рис. 23, *к*), содержат в качестве чувствительного элемента биметаллическую пластину с обмоткой из изолированной проволоки. Биметаллическая пластина состоит из двух скрепленных полос из металлов с разными коэффициентами линейного расширения (например, латуни и инвара, у которых эти коэффициенты отличаются почти в 20 раз). Под действием протекающего тока биметаллическая пластина нагревается, что вызывает ее изгиб в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения (инвара — сплава железа 64% и никеля 36%) и размыкание контактов. При охлаждении контакты вновь замыкаются, и процесс циклически повторяется. Время протекания тока в электрической цепи зависит от силы сжатия контактов. При малом давлении масла контакты сжаты слабо, и они замыкаются редко.

С увеличением давления мембрана выгибается влево, соответственно увеличивается прогиб биметаллической пластины и время протекания электрического тока по цепи, которая соединяет датчик давления с указательным прибором на щитке в кабине машиниста.

§ 10. ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Для контроля и регулирования температуры различных процессов используют методы, основанные на явлениях теплового расширения тел (с различными коэффициентами расширения), изменения давления газа внутри замкнутого объема или электрического сопротивления проводников и полупроводников при изменении температуры, на термоэлектрических явлениях.

Датчики расширения преобразуют изменение температуры в перемещение конца стержня или уровня жидкости. Их принцип действия заключается в следующем.

Дилатометрический элемент — простейший элемент расширения (рис. 29, *а*) состоит из двух стержней — внутреннего 1 и наружного 2. Оба стержня жестко укреплены на донышке 3. Коэффициент линейного расширения наружного стержня, имеющего форму трубки, в 10—20 раз больше коэффициента расширения внутреннего стержня, изготовленного из инвара или керамики. Активный стержень, имеющий больший коэффициент линейного расширения, делают из цветных металлов (меди, латуни) или стали.

При одинаковой степени нагрева обеих стержней их относительное удлинение будет пропорционально разности коэффициентов линейного расширения стержней, приращению температуры и первоначальной их длине, принятой равной длине стержня с большим коэффициентом расширения.

Жидкостные элементы расширения являются разновидностью дилатометрических. Пассивный элемент, имеющий малый коэффициент линейного расширения, представляет собой стеклянную трубку (рис. 29, *б*), заполненную жидкостью (например, этиловым спиртом). Эта жидкость является активным элементом, обладающим большим коэффициентом линейного расширения.

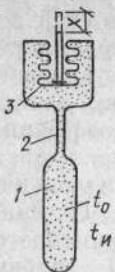
Биметаллический чувствительный элемент представляет собой две металлические пластины с различными коэффициентами линейного расширения, сваренные между собой (рис. 29, *в*). При изменении температуры свободный конец биметаллической пластины перемещается в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения, а изменение угла изгиба пропорционально изменению температуры.

Датчик температуры электротеплового типа с биметаллической пластиной аналогичен электротепловому датчику давления (см. рис. 23, *к*) и представляет собой герметический патрон с наружной резьбой для ввинчивания в головку блока цилиндров ДВС. С увеличением температуры охлаждающей жидкости деформация пластины увеличивается, что приводит к уменьшению средней силы тока в цепи. Это изменение и воспринимается указателем температуры в кабине машиниста СДМ.

В ряде случаев чувствительность датчиков с биметаллической пластиной можно повысить за счет длины элемента, в частности, путем применения спиральных элементов (рис. 29, *г*).

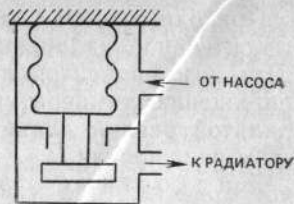
Манометрические чувствительные элементы (рис. 30) представляют собой герметичную систему, состоящую из термобаллона 1 и упругого элемента 3, соединенных между собой капиллярной трубкой 2. Система заполнена газом или жидкостью. В качестве упругих элементов могут быть использованы как сильфоны, так и мембраны, пружины и др.

Измеряемая температура t_n воспринимается термобаллоном 1. Нагревание его приводит к повышению



30. Манометрический чувствительный элемент

1 — термобаллон; 2 — капиллярная трубка; 3 — упругий элемент; t_n — измеряемая температура; t_0 — температура среды термобаллона



31. Термостат для регулирования температуры охлаждающей жидкости двигателя

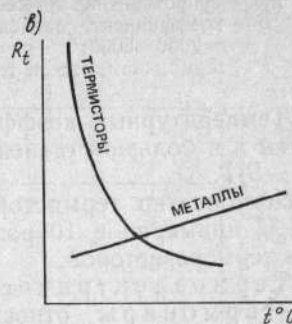
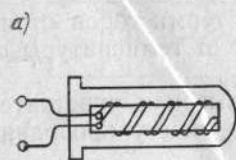
давления газа или жидкости, находящихся в практически постоянном объеме. В упругом элементе изменение давления преобразуется в перемещение.

С целью уменьшения влияния атмосферного давления термоэлементы часто заполняют азотом или другим газом под давлением. Относительное изменение давления в них пропорционально изменению температуры.

Некоторые датчики расширения широко используются на всех СДМ с двигателями внутреннего сгорания. Так, датчиком температуры в системе охлаждения двигателя служит термостат (рис. 31). Он представляет собой гофрированный баллон (сильфон), внутри которого находится легкоиспаряющаяся жидкость или твердый наполнитель с большим коэффициентом линейного расширения (например, церезин). При повышении температуры баллон удлиняется, а при понижении — сокращается. При этом закрепленный на баллоне клапан включает и отключает радиатор, поддерживая таким образом необходимую температуру.

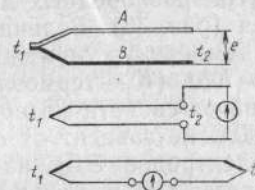
Чувствительные элементы термометров сопротивления (рис. 32) представляют собой тонкую металлическую проволоку, намотанную на каркас (терморезистор), или полупроводниковый термисторный элемент, защищенные кожухом. Электрические элементы сопротивления и термисторы предназначены для определения температуры путем измерения величины сопротивления металла или полупроводника, которое изменяется при их нагреве.

Для проводниковых терморезисторов используют чистые металлы: медь, никель, платину. Их статическая ха-



32. Чувствительные элементы термометров сопротивления

а — проводниковый; б — полупроводниковый; в — статические характеристики



33. Схемы включения термопар

актеристика в диапазоне 0—100 °С практически линейна (рис. 32, в):

$$R = R_0 (1 + \alpha t),$$

где R_0 — сопротивление при 0 °С, Ом;

t — температура, °С;

α — температурный коэффициент электрического сопротивления, $\alpha = (4-6) \cdot 10^{-3} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Для никелевых терморезисторов характерно высокое удельное электрическое сопротивление и большие значения α , что позволяет выполнять датчики малых размеров.

Полупроводниковые элементы (термисторы) изготовляют из смеси окислов никеля, марганца, кобальта, магния, титана, спрессованных и спеченных при высокой температуре в виде стержней, шайб, дисков и бусинок. Они имеют экспоненциальную характеристику (рис. 32, в):

$$R = R_{20} \exp [B (293 - T)/293T],$$

где R_{20} — сопротивление термистора при 20 °С;
 B — коэффициент, зависящий от свойств материала, $B = 2000—5000$;
 T — термодинамическая температура.

Температурный коэффициент α термисторов отрицателен и в большой степени зависит от температуры $\alpha = -B/T$.

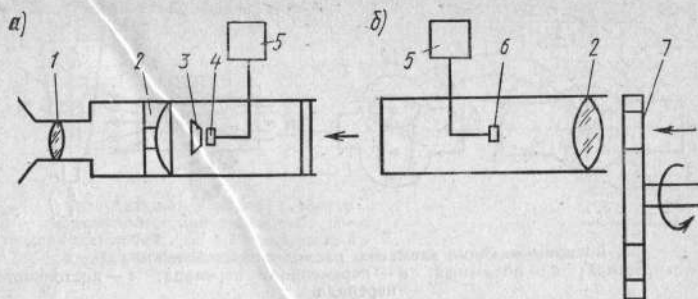
Достоинство термисторов — их высокая чувствительность, примерно в 10 раз большая, чем у проводниковых терморезисторов.

Термоэлектрические преобразователи-термопары относятся к устройствам генераторного типа. Они работают на принципе возникновения термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) в двух сваренных друг с другом разнородных металлах A и B при нагреве места спая (рис. 33). Величина ЭДС пропорциональна разности температур Δt между спаем и свободными концами $e = K\Delta t$ (K — термоэлектрический коэффициент, зависящий от свойств материалов термопары). Величина термо-ЭДС не зависит от формы и геометрических размеров электродов. ЭДС на свободных концах термопары объясняется тем, что энергия свободных электронов в разных материалах неодинакова и по-разному зависит от температуры. Однако с ее увеличением энергия свободных электронов возрастает. Это вызывает их поток к холодному концу термопары, где накапливается отрицательный заряд. Разное число свободных электронов и вызывает разность потенциалов e на их свободных концах. При замыкании свободных концов потечет электрический ток, величина которого пропорциональна разности $t_1 - t_2$.

В практике измерений температуры место соединения электродов термопары с более высокой температурой называют горячим или рабочим спаем, а с более низкой — холодным или свободным. С помощью термопар точно измеряется лишь разность температур рабочего и свободного спаев, поэтому температура последнего должна поддерживаться постоянной.

Конструктивное исполнение термопар зависит от назначения. Чаще всего электроды термопары с рабочим спаем помещают в герметизированной трубке из нержавеющей стали или фарфора, предохраняющих электроды от механических и других повреждений.

Материалом термопар обычно являются: хромель-



34. Упрощенная схема пирометров

a — радиационного; b — фотоэлектрического цветового; 1 — окуляр; 2 — сферическое зеркало-объектив; 3 — зеркало; 4 — термопара; 5 — регистрирующая аппаратура; 6 — фотоэлемент; 7 — светофильтр на вращающемся диске

копель, хромель-алюмель, платино-платинородий и др. Генерируемая ими ЭДС составляет 0,01—0,07 мВ/°С.

Для повышения чувствительности термопар (до 1 мВ/°С) их изготавливают из полупроводников.

В качестве вторичных приборов к термопарам подключают пирометрические милливольтметры, потенциометры и электронные усилители.

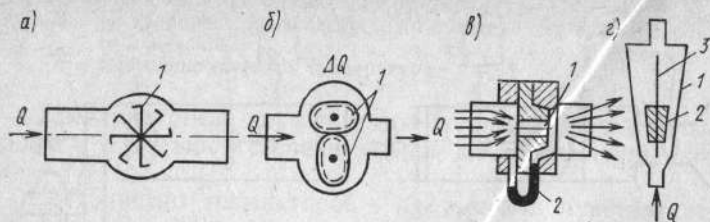
Пирометрами называют приборы, предназначенные для измерения температуры по тепловому излучению. Это бесконтактные измерители температуры, т. е. приборы не нуждаются в непосредственном контакте с объектом измерения. Необходимо только обеспечить такие условия, чтобы тепловое излучение объекта, температура которого измеряется, попадало в объектив пирометра.

По принципу действия различают пирометры: радиационные (суммарного излучения), в которых используется энергия излучения широкой спектральной области;

яркостные (монохроматические), работающие в достаточно узкой области длин волн;

цветовые, которыми регистрируется отношение спектральных яркостей при двух длинах волн.

Кроме классификации по принципу действия, пирометры различают по назначению (промышленные, лабораторные, прецизионные), измеряемой температуре (низкотемпературные, высокотемпературные, многопредельные), области длины волн (инфракрасные, световые, ультрафиолетовые).



35. Воспринимающие элементы расходов жидкостей и газов
 а — скоростной; б — объемный; в — переменного перепада; г — постоянного перепада

Автоматические пирометры, в которых приемником теплового излучения является фотозаэлемент, фотодиод или фотосопротивление, называются *фотопирометрами*.

В системах автоматического регулирования широкое распространение получили пирометры суммарного излучения (радиационные), отличающиеся простотой и надежностью датчика. У таких пирометров выходной сигнал датчика, кроме низкотемпературных, достаточен для использования показывающего прибора без усилителя. Основной недостаток радиационных пирометров — большая методическая погрешность измерения.

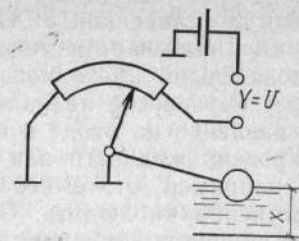
Радиационный пирометр рефлекторного типа (рис. 34, а) состоит из сферического зеркала 2, которым тепловые лучи фокусируются на чувствительный элемент 4. Сигнал от чувствительного элемента регистрируется измерительным прибором 5. С помощью сферического зеркала 2, зеркал 3 и окуляра 1 пирометр визуально наводится на исследуемый объект.

В фотоэлектрическом цветовом пирометре (рис. 34, б) тепловые лучи проходят через фильтры 7, закрепленные на вращающемся с постоянной угловой скоростью диске, и объективом 2 фокусируются на чувствительном элементе 6. Чувствительным элементом может быть фотозаэлемент или фотосопротивление. Сигнал с выхода чувствительного элемента подается на регистрирующее устройство 5, которое состоит из усилителей, детектора, работающего синхронно с диском со светофильтрами, и логометра.

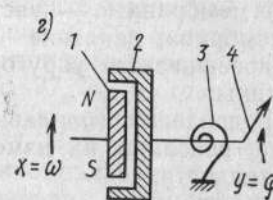
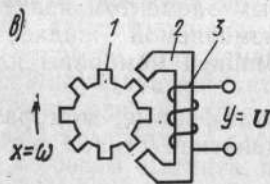
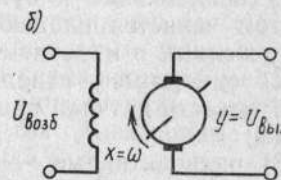
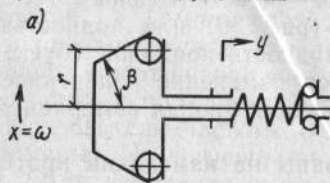
§ 11. ДАТЧИКИ РАСХОДА И УРОВНЯ

Различают следующие воспринимающие элементы расхода: скоростные, объемные, переменного и постоянного перепадов.

36. Поплавковый датчик уровня



37. Датчики угловой скорости
 а — механический центробежный; б — тахогенераторный; в — индукционный; г — магнитноиндукционный



Скоростной воспринимающий элемент (рис. 35, а) представляет собой крыльчатку 1, устанавливаемую в потоке жидкости (газов). Вал крыльчатки передает вращение на датчик системы регулятора.

Объемный воспринимающий элемент может иметь различное конструктивное исполнение. Например, в виде шестерчатого насоса (рис. 35, б), в котором овальные шестерни 1 при вращении за каждый оборот пропускают строго определенный объем жидкости. В качестве датчика расхода может применяться также аксиально-поршневой гидравлический двигатель, к валу которого и подключают измеритель.

Датчик с элементом переменного перепада (рис. 35, в) работает по принципу разности давления до и после дросселя 1, которое регистрируется манометром 2.

Датчик постоянного перепада — ротаметр (рис. 35, г) имеет в коническом корпусе 1 по-

плавок 2 с линейкой 3. Изменение расхода жидкости или газа вызывает изменение положения поплавка и, следовательно, проходного сечения между ним и корпусом. Равновесие поплавок наступает при выравнивании давления на входе и выходе среды из ротаметра.

Уровень жидкости или сыпучих материалов в отличие, например, от температуры, давления можно непосредственно наблюдать. Однако если это невозможно, то по принципу измерения различают приборы:

1) поплавковые и буйковые — чувствительным элементом является плавающий (рис. 36) или полностью погруженный в измеряемую жидкость поплавок (бук);

2) емкостные — используется изменение электрической емкости датчика при изменении уровня измеряемой среды;

3) радиоактивные — основаны на изменении протекающего через объект потока излучения при изменении уровня;

4) мембранные — чувствительным элементом является мембрана, давление столба измеряемой жидкости уравнивается упругой деформацией мембраны или пружины;

5) давления (поплавковые, сильфонные, мембранные) — основаны на измерении давления столба рабочей жидкости.

§ 12. ДАТЧИКИ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЯ

Датчики угловой скорости (тахометры) предназначены для измерения и регулирования скорости вращения валов. Наиболее распространены механические и электрические тахометры (рис. 37).

Статическая характеристика механических тахометров получается из равенства усилий со стороны грузов и пружины. Например, для варианта, показанного на рис. 37, а, $CY = mr\omega^2 \operatorname{tg} \beta$; $Y = mr\omega^2 \operatorname{tg} \beta / C$.

Отсюда $K = \Delta Y / \Delta \omega = 2mr\omega_0 \operatorname{tg} \beta / C$.

где m — масса шариков;

r — радиус расположения центра тяжести шариков;

β — угол наклона чашки;

ω_0 — установившаяся скорость вала тахометра;

C — жесткость пружины.

Электрические тахометры (тахогенераторы) представляют собой малогабаритные генераторы постоянного или переменного тока.

Тахогенераторы постоянного тока (рис. 37, б) выполняют с независимым (стабилизированным) возбуждением или возбуждением в виде постоянных магнитов. Напряжение генератора $U_{\text{вых}}$ пропорционально скорости вращения его ротора $U_{\text{вых}} = K\omega$. Статическая характеристика промышленных тахогенераторов линейна, погрешность измерений составляет 2—3 %.

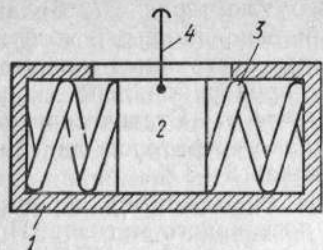
Синхронные тахогенераторы (трехфазные) переменного тока имеют ротор в виде постоянного магнита. При его вращении в обмотках статора наводится ЭДС с частотой и амплитудой, пропорциональными частоте вращения, которая и является выходным сигналом. Поскольку этот сигнал в качестве управляющего непосредственно использован быть не может, применяют преобразователи частоты ЭДС в ток (электронные частотомеры). Их погрешность 0,1—0,5 %.

Для измерения угловой скорости широко применяют индукционные датчики (импульсные генераторы). Их работа основана на явлении электромагнитной индукции, заключающемся в наведении ЭДС в электрическом контуре за счет изменения магнитного потока.

Индукционный датчик (рис. 37, в) состоит из вращающегося зубчатого ротора 1 и неподвижного постоянного магнита 2 с обмоткой 3. При вращении ротора к полюсам магнита попеременно подходят то два выступа, то две впадины. Это приводит к изменению магнитного потока в сердечнике и появлению в обмотке электрического тока, амплитуда и частота которого пропорциональны частоте вращения колеса.

Магнитоиндукционные тахометры (спидометры) имеют цилиндрический или дисковый токопроводящий элемент (рис. 37, г). При вращении магнита 1 с угловой скоростью ω в этом элементе наводится ЭДС, вызывающая появление тока в его теле. В результате взаимодействия тока с магнитным полем магнита возникает крутящий момент, стремящийся повернуть цилиндр 2 в направлении вращения магнита. Этому препятствует пружина 3, в связи с чем подвижная система 4 поворачивается на угол, пропорциональный угловой скорости ω .

Для измерения линейных ускорений машины или ее частей могут применяться десселерометры (рис. 38) — устройства, у которых отклонение инерционного элемента (массы) от равновесного состояния пропорционально изменению скорости контролируемого объекта.



38. Датчик ускорений
1 — корпус; 2 — груз (инерционная масса); 3 — пружина; 4 — рычаг потенциометра

Конструкции различных десселерометров даны на рис. 141.

Для измерения угловых ускорений валов могут применяться тахогенераторные или индукционные датчики со вторичным прибором, реагирующие на изменение частоты вращения.

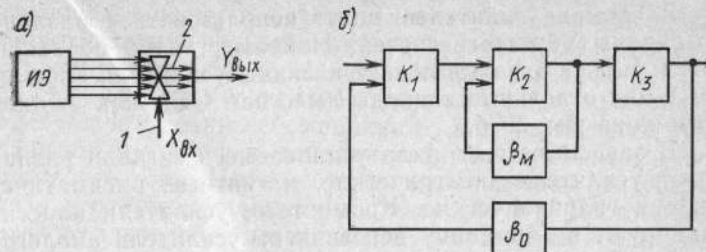
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение чувствительных элементов датчиков.
2. Что называется входом элемента?
3. Основные различия датчиков по принципу действия.
4. Где применяются концевые выключатели?
5. Основные режимы, в которых может работать сельсинная связь.
6. Основные чувствительные элементы для измерения температуры.
7. Что такое тензометр?
8. Какие Вы знаете чувствительные элементы для измерения давления?
9. В чем заключается различие чувствительных элементов расхода по переменному перепаду и по постоянному перепаду?
10. В какие величины можно преобразовать изменение уровня?
11. Где применяются тахогенераторы?
12. Каков принцип действия магнитондукционного датчика?

ГЛАВА III УСИЛИТЕЛЬНЫЕ И ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

§ 13. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ И ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЕЙ

В большинстве случаев мощность выходного сигнала воспринимающего или преобразующего элемента недостаточна для управления исполнительным элементом.



39. Усилители

а — блок-схема усилителя; б — обратные связи; 1 — управляющий поток энергии; 2 — управляемый поток энергии

том. Для количественного изменения этой мощности (энергии) применяют усилительные элементы.

Усилителем (рис. 39, а) называется устройство, которое увеличивает энергию входного (управляющего) сигнала за счет энергии вспомогательного источника питания ИЭ. Управляющий поток энергии 1, действуя на регулирующий орган, изменяет величину управляемого потока 2.

В системах автоматики широко используют усилители-преобразователи, которые помимо усиления осуществляют преобразование входного сигнала $X_{вх}$ в другой вид выходного сигнала $Y_{вых}$, например, постоянного тока — в переменный.

Основной показатель усилителя — коэффициент усиления. Различают коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности:

$$K_I = I_{вых}/I_{вх}; K_U = U_{вых}/U_{вх}; K_P = P_{вых}/P_{вх},$$

где $I_{вых}$, $I_{вх}$ — выходная и входная величины тока, А;
 $U_{вых}$, $U_{вх}$ — выходная и входная величины напряжения, В;
 $P_{вых}$, $P_{вх}$ — выходная и входная мощность, Вт.

Иногда для значительного увеличения входного сигнала усилители или их каскады соединяют последовательно, тогда общий коэффициент усиления определяется как

$$K_{об} = K_1 K_2 \dots K_n,$$

где $K_{об}$ — общий коэффициент усиления системы;
 K_n — коэффициент усиления отдельного каскада усилителя.

В схемах усилителей могут использоваться различные виды обратных связей. Например, цепь обратной связи может охватывать все каскады усилителя (общая ОС) или отдельные каскады (местная ОС), как это показано на рис. 39, б.

В зависимости от вида усиливаемого сигнала различают усилители электрические, магнитные, пневматические и гидравлические. Кроме того, усилители классифицируют по принципу действия на усилители аналогового действия и дискретного, т. е. релейного (переключатели).

Выбор типа усилителя для той или иной системы определяется конкретными условиями применения.

Электромагнитные (электромеханические) усилители-механотроны применяются в системах, где необходимо иметь скачкообразную (релейную) статическую характеристику. Эти усилители отличаются простой конструкцией, сравнительно малыми размерами, высокой стабильностью характеристик, малой стоимостью. Недостаток релейных усилителей — наличие подвижных частей и некоторая инерционность.

Электронные усилители (ламповые и полупроводниковые) характеризуются возможностью усиления слабых электрических сигналов, высоким коэффициентом усиления, безынерционностью, отсутствием подвижных частей, большим диапазоном усиливаемых частот. Недостатки усилителей на *электровакуумных* лампах — невысокая механическая прочность (сопротивление ударам, вибрации), малый срок службы. В этом отношении от них положительно отличаются усилители на металлокерамических лампах.

Полупроводниковые усилители отличаются большой надежностью и долговечностью в работе, малыми размерами и весом, экономичностью, мгновенной готовностью к работе, высоким коэффициентом усиления, вибро- и ударостойкостью, способностью усиления слабых сигналов, большим диапазоном усиливаемых частот. Недостатки — зависимость характеристик усилителя от температуры, а также большой разброс параметров.

Магнитные усилители характеризуются большой надежностью, долговечностью, высокими эксплуатационными качествами, высоким коэффициентом усиления и перегрузочной способностью. Недостатки магнитных усилителей — сравнительно высокая инерцион-

ность, сложность в осуществлении больших входных сопротивлений, повышенная чувствительность к температурным изменениям, большие габариты и вес.

Электромашинные усилители применяют в качестве усилителей мощности для управления объединенными с ними исполнительными элементами постоянного тока. Целесообразно использовать эти усилители в системах мощностью более 100 Вт. Достоинство этих усилителей — возможность управления большими мощностями, высокий коэффициент усиления, сравнительно малая инерционность; недостатки — наличие коллектора и щеток, которые требуют тщательного ухода, непостоянство параметров, склонность к колебанию при перекompенсации.

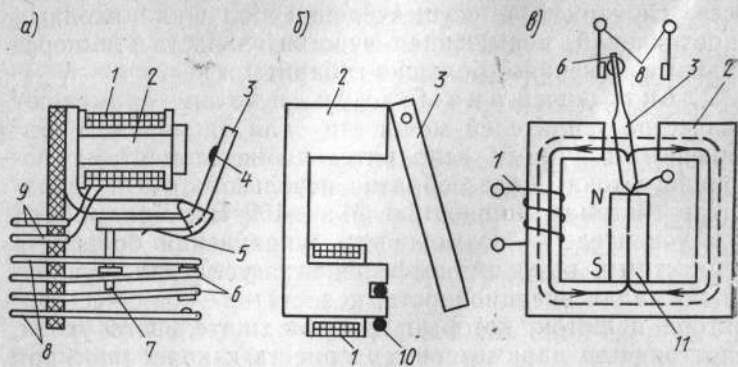
Гидравлические и пневматические усилители применяют в системах гидро- и пневмоавтоматики. Достоинства этих усилителей — высокая помехоустойчивость, большой коэффициент усиления, возможность управления исполнительными элементами большой мощности. Обычно эти усилители выполнены с исполнительными элементами как единый механизм (см. гл. V). Недостаток этих усилителей — трудность эксплуатации при отрицательных температурах.

§ 14. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ РЕЛЕ

Электромагнитное реле представляет собой электро-механическое устройство, в котором входная электрическая величина (ток), достигнув некоторого значения, преобразуется в перемещение якоря, механически замыкающего контакты более мощной электрической цепи управления. Понятие реле-усилителя вводится потому, что подводимая мощность составляет доли ватта, а мощность цепи управления — сотни и даже тысячи ватт. Электро-механическое реле относится к усилителям дискретного действия. Различают нейтральное реле (постоянного тока), реле переменного тока и поляризованное реле постоянного и переменного тока.

По конструктивному исполнению различают реле с якорем клапанного типа, с втяжным и поворотным якорем.

Нейтральное реле (рис. 40, а) является электромагнитным реле постоянного тока клапанного типа. Магнитопровод состоит из ярма с сердечником 2



40. Упрощенные схемы конструкции электромагнитных реле
 а — нейтральное реле постоянного тока; б — реле переменного тока; в — поляризованное реле; 1 — каркас с катушкой; 2 — ярмо с сердечником; 3 — якорь; 4 — штифт отлипания; 5 — возвратная пружина; 6 — подвижные контакты; 7 — толкатель контактов; 8 — неподвижные контакты; 9 — выводы обмотки; 10 — короткозамкнутый виток; 11 — постоянный магнит; пунктиром обозначен магнитный поток Φ_p , создаваемый током обмотки, сплошной линией — магнитный поток Φ_0 , создаваемый постоянным магнитом

и якоря 3, изготовленных из мягкой стали. На сердечнике 2 находится обмотка 1, с помощью которой осуществляется управление работой реле. При помощи толкателя 7, изготовленного из пластмассы, якорь связан с подвижными контактами 6.

При обесточенной обмотке якорь максимально удален от сердечника за счет усилия, развиваемого возвратной пружиной 5 и подвижными контактами. Если по обмотке реле пропустить электрический ток достаточной величины, то якорь притянется к сердечнику за счет возникшего магнитного поля. При этом размыкающий контакт разомкнется, а замыкающий — замкнется.

Сила притяжения якоря к сердечнику обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, т. е. эта сила становится наибольшей, когда якорь притянется к сердечнику. Так как в магнитопроводе всегда имеется остаточное магнитное поле, то существует опасность так называемого «залипания» якоря. Для предотвращения «залипания» на якоре приклепан штифт отлипания 4 из немагнитного материала (медь, латунь или пластмасса).

Основные характеристики реле: ток срабатывания, ток отпускания, время срабатывания и время отпускания.

Током срабатывания реле называют ток в обмотке, под действием которого якорь начинает притягиваться к сердечнику. Током отпускания называют ток в обмотке, при котором якорь начинает возвращаться в исходное состояние.

Время срабатывания реле складывается из двух составляющих:

$$t_{\text{сраб}} = t_{\text{тр}} + t_{\text{дв}}$$

где $t_{\text{тр}}$ — время трогания, т. е. промежуток времени с момента включения тока до момента начала движения якоря;

$t_{\text{дв}}$ — время движения якоря от одного крайнего положения до другого.

Время отпускания также складывается из двух аналогичных составляющих.

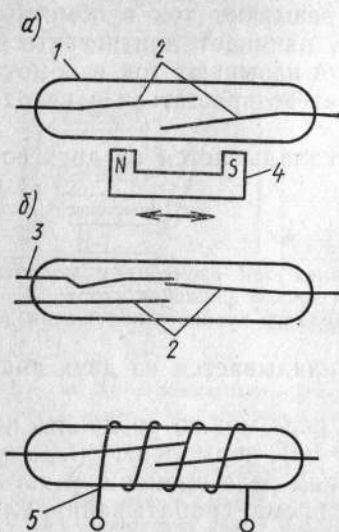
По временным параметрам реле можно разделить на быстродействующие ($t_{\text{сраб}} = 10$ мс), нормальные ($t_{\text{сраб}} = 30-50$ мс) и замедленные или реле времени, у которых специальными методами время срабатывания или отпускания увеличено от десятых долей секунды до минуты и более.

Если электромагнитное реле предназначено для работы на переменном токе, то для снижения потерь на вихревые токи и гистерезис магнитопровод набирают из листовой трансформаторной стали толщиной 0,3—0,5 мм. При питании обмотки реле переменным током усилие притяжения якоря постоянно изменяется с частотой, вдвое больше частоты питающего тока (соответствие нулевым значениям синусоидального тока). Это вызывает вибрацию якоря и приводит к быстрому износу реле. Вибрация предотвращается короткозамкнутым витком, охватывающим одну половину расщепленного сердечника (рис. 40, б).

Существует много разновидностей электромагнитных реле постоянного и переменного тока в зависимости от назначения и условий эксплуатации. Реле, предназначенное для включения и переключения электрических цепей напряжением до 650 В при токах, достигающих десятков и сотен ампер (до 600 А), называют контактором.

В системах автоматики часто требуется такое устройство, которое реагировало бы как на величину, так и на знак тока на его входе. Для этой цели разработаны поляризованные реле. Поляризация реле осуществляется при помощи постоянных магнитов (рис. 40, в).

Якорь поляризованного реле закреплен в точке ка-



41 Устройство геркона
 а — включающего типа; б —
 переключающего типа; 1 —
 стеклянный баллон; 2 —
 контакты-пружины из пер-
 малоя; 3 — контакт-пружина
 из немагнитного материала;
 4, 5 — магниты

чания O при помощи упругого элемента (например, плоской пружины). Реле констатируется так, чтобы его якорь находился, например, в крайнем левом положении при отсутствии тока в обмотке 1 реле. Поэтому магнитный поток постоянного магнита Φ_0 в левой части ярма 2 больше, чем в правой. В результате постоянным магнитным полем якорь сильнее притягивается влево, чем вправо. Когда по обмотке 1 реле начинают пропускать ток такого напряжения, при котором создаваемый им магнитный поток Φ_1 в левой части ярма 2 направлен навстречу потоку Φ_0 , а в правой — направления потоков совпадают, сила притяжения якоря левой частью уменьшается. В результате наступает момент, когда при определенном значении тока в обмотке 1 якорь 3 реле переместится в правое положение. При изменении направления тока в обмотке 1 или его отключении якорь возвращается в левое положение.

Герконы (герметизированные магнитоуправляемые контакты) получили за последние годы широкое распространение в технике. Основные области применения герконов: реле, логические элементы, счетно-решающие устройства, коммутаторы, искатели, суммирующие, кодирующие и декодирующие устройства.

Простейший геркон представляет собой стеклянную

запаянную ампулу 1 (рис. 41), заполненную инертным газом (азотом, аргоном, водородом или азотно-водородной смесью). Внутри ампулы размещены две тонкие пермалюевые пластины с токоотводами 2 диаметром 0,6—1,3 мм. Концы пермалюевых пластин, контактирующие при замыкании, покрыты защитным слоем из благородного металла (золота, родия, палладия). Для управления работой геркона могут быть применены постоянные магниты 4 или электромагниты 5.

При воздействии на геркон магнитного поля достаточной напряженности магнитные силовые линии, замыкающиеся через пермалюевые пружины-контакты, стремятся сократиться, создавая между концами пружин-контактов силу притяжения. Пермалюевые пластинки деформируются, притягиваются друг к другу и образуют контакт. При уменьшении магнитного поля до определенной величины пружины-контакты под воздействием упругих сил возвращаются в исходное положение и контакт размыкается. Один или несколько герконов, помещенные в управляемое магнитное поле, образуют безъякорное (язычковое) реле.

В отличие от обычных реле, в которых при срабатывании перемещается массивный якорь, механически связанный с мощной контактной группой, в герконах механическое движение сведено до минимума и заключается в упругом смещении конца легкой консольной ферромагнитной пружины на расстояние от десятков до сотен микрометров. Важное преимущество герконов — простота конструкции, несложность управления их работой, надежность и отсутствие необходимости регулировки. Герконы могут работать в любом положении, практически в любой атмосфере в диапазоне температур от -100 до $+200$ °С. Простота конструкции и возможность автоматизации процесса их изготовления обеспечивают низкую стоимость герконов.

Основной недостаток герконов — малая сила управляемых токов. Герконы надежно работают при малых токах, равных десяткам миллиампер. Максимально допустимая сила тока для геркона с длиной стеклянного баллона 50 мм не превышает 1 А. Имеются герконы на рабочие токи до 5 А с ампулой, заполненной водородом.

Число срабатываний герконов — до 10^9 в зависимости от силы коммутируемого тока: с увеличением силы коммутируемого тока число срабатываний уменьшается,

а при токах, превышающих максимально допустимые, герконы быстро выходят из строя.

Обычно длина герконов колеблется в пределах 18—50 мм, а диаметр — 3—7 мм. Габариты герконов определяют предельные токи коммутации. Герконы обладают достаточной для применения на строительных и дорожных машинах вибро- и удароустойчивостью. Они выдерживают виброускорения до 20 g в диапазоне частот от 10 до 2000 Гц и ударные нагрузки до 50 g (g — ускорение свободного падения).

§ 15. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ И РЕЛЕ

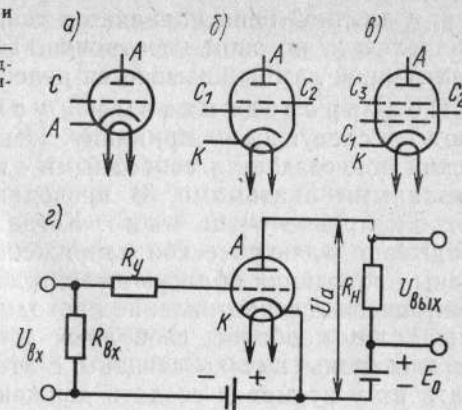
Принцип действия этих усилителей основан на явлении электронной эмиссии. Под электронной эмиссией понимают физическое явление испускания электронов твердыми телами при внешнем энергетическом воздействии. Так, при нагревании вольфрамовой проволоки до 2000 °C с ее поверхности испускаются электроны, которые образуют электронное облако. Сам электрон представляет собой отрицательно заряженную элементарную частицу.

Трехэлектродная лампа (триод) представляет вакуумную стеклянную или металлическую колбу с тремя электродами: A — анод, K — катод, C — сетка (рис. 42, a). Если к катоду и аноду приложить соответственно отрицательный и положительный потенциалы, то электроны от катода начнут перемещаться на анод, замыкая электрическую цепь. Управление этими электронами производится сеткой лампы. Если сетка лампы имеет отрицательный потенциал относительно катода, то она отталкивает электроны катода, ток анода отсутствует, и лампа является запертой; если на сетку подать положительный потенциал, то лампа откроется и в анодной цепи появится ток. Триоды или более сложные лампы — тетроды, пентоды (рис. 42, b , $в$) являются основными частями ламповых усилителей. Их основными характеристиками являются коэффициент усиления, частотная и фазовая характеристики.

Коэффициент усиления $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ — величина, показывающая, во сколько раз напряжение (или мощность) на выходе $U_{\text{вых}}$ больше напряжения (или мощности) на входе $U_{\text{вх}}$ усилителя.

Частотная характеристика усилителя показывает, как

42. Электронные лампы и усилитель
 a — триод; b — тетрод; $в$ — пентод; $г$ — простейший однокаскадный ламповый усилитель



изменяется коэффициент усиления от частоты усиливаемого напряжения. Идеальной частотной характеристикой является такая, при которой в определенном частотном диапазоне коэффициент усиления K не изменяется. *Фазовая характеристика* показывает сдвиг фаз усиливаемого сигнала в зависимости от его частоты. Идеальная фазовая характеристика близка к прямой линии с постоянным углом наклона.

Простейший однокаскадный усилитель показан на рис. 42, г. В цепи сетки действуют два напряжения: постоянное отрицательное сеточное смещение U_c и напряжение управляющего сигнала $U_{\text{вх}}$. Сопротивление $R_{\text{вх}}$ служит для того, чтобы электроны, случайно попавшие на сетку, могли стекать с нее в цепь источника питания. Совместно с входным сопротивлением усилителя $R_{\text{у}}$ оно служит для ограничения сеточных токов. Работа усилителя сводится к следующему. При отсутствии сигнала управления ($U_{\text{вх}}=0$) за счет отрицательного смещения управляющей сетки лампы ее анодный ток устанавливается определенной средней величины. При подаче управляющего сигнала ($U_{\text{вх}} \neq 0$) и в зависимости от его полярности результирующее напряжение на управляющей сетке лампы изменяется. Это приводит к изменению и анодного тока лампы. Если отрицательное смещение на сетке очень велико, то при отсутствии сигнала управления ($U_{\text{вх}}=0$) лампа заперта отрицательным сеточным напряжением смещения (U_c). При подаче управляющего сигнала на сетку ($U_{\text{вх}} > 0$) лампа открыва-

ется, в анодной цепи появляется ток, величина которого определяется потоком электронов. Такой режим работы электронной лампы называется релейным.

Полупроводниковые усилители работают по следующему принципу. Известно, что электрический ток создается свободными электронами, т. е. не связанными с атомами. В проводниках таких свободных электронов очень много. Когда к проводнику прикладывают электрическое напряжение, свободные электроны проводника образуют электрический ток. Поэтому электрическое сопротивление проводника мало. В диэлектриках же, наоборот, свободных электронов почти нет, все электроны жестко связаны с атомами и, чтобы вырвать их у атомов и создать движение электронов, требуется приложить очень большое электрическое напряжение. Именно поэтому электрическое сопротивление диэлектриков велико.

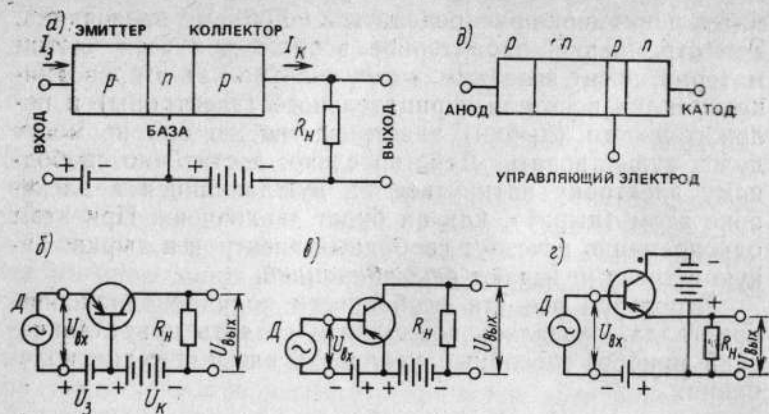
Некоторые вещества, например германий и кремний, не похожи ни на проводники, ни на диэлектрики. Они одновременно являются и тем и другим. Их называют полупроводниками. Большинство электронов в полупроводниках жестко связано с атомами, но все же в них есть электроны, которые при некотором внешнем воздействии тепла, света или электрического напряжения высвобождаются. Причем характерно, что высвобождаются носители не только отрицательного (электроны), но и положительного электричества (так называемые дырки). Если к полупроводнику приложено электрическое напряжение, то электроны начинают двигаться к положительному полюсу, а дырки — к отрицательному. В полупроводнике образуются электронный и дырочный токи. Не надо думать, что дырочный ток — это движущиеся атомы, потерявшие электроны. В полупроводниках атомы неподвижны. Они образуют кристаллическую решетку и очень прочно держатся на своих местах. Но атом, потерявший электрон, захватывает электрон соседнего атома и перестает быть дыркой. Соседний атом, отдавший ему свой электрон и превратившийся в дырку, захватывает электрон у другого атома и т. д. Поэтому, хотя атомы и остаются на своих местах, дырки перемещаются, причем в направлении, противоположном движению электронов. Если к полупроводнику не приложено электрическое напряжение, то свободные электроны и дырки перемещаются беспорядочно и они стре-

мятся равномерно распределиться по объему проводника. Это стремление, характерное вообще для всех частиц материи, носит название *диффузии*. Так как в проводнике имеются носители отрицательного (электроны) и положительного (дырки) электричества, то они не могут долго существовать. Действительно, достаточно свободному электрону наткнуться на нуждающийся в электроне атом (дырку), как он будет «захвачен». При этом одновременно исчезнут свободный электрон и дырка. Такую встречу называют *рекомбинацией*.

Используя все эти особенности полупроводникового кристалла, оказалось возможным создать кристаллический прибор, способный усиливать электрические колебания.

Триод-транзистор (рис. 43, а) состоит из трех слоев полупроводников с различной проводимостью: крайние — с дырочной, а между ними (так называемая база) — с электронной. Такая схема записывается следующим образом: $p-n-p$. Значит, транзистор имеет два перехода: $p-n$ и $n-p$. Первый переход $p-n$ включен в прямом направлении, т. е. минус — к n -области, а плюс — к p -области. Через этот переход проходит прямой ток. Второй переход $n-p$ включен в обратном направлении, т. е. плюс — к n -области (базе), а минус — к p -области.

Полупроводники, из которых изготовлены эмиттер и база, подобраны с различной концентрацией основных носителей, т. е. концентрация дырок в эмиттере значительно выше концентрации электронов в базе. Поэтому, когда в результате протекания тока через эмиттерный переход в базу попадают дырки, то их оказывается там так много, что только малая часть из них находит необходимые для рекомбинации электроны. Эмиттер как бы насыщает базу дырками. Благодаря диффузии пришедшие дырки начинают перемещаться в области базы, прилегающие к коллектору. К коллекторному переходу приложено обратное напряжение, довольно значительное по величине (в десятки раз больше напряжения, приложенного к эмиттерному переходу), причем полярность коллекторного напряжения такова (на коллекторе — минус), что положительные дырки, подойдя к коллекторному переходу, испытывают действие сильного ускоряющего поля, переходят в коллектор и рекомбинируют с электронами, приходящими в кол-



43. Полупроводниковые усилители
 а — схема транзистора; б — схема простейшего однокаскадного полупроводникового усилителя с общей базой; в — с общим эмиттером; г — с общим коллектором; д — схема тиристора

лктор из отрицательного полюса источника питания. В результате через коллекторный переход проходит электрический ток, несмотря на то, что к нему приложено обратное напряжение.

Величина коллекторного тока зависит от величины тока эмиттера. Действительно, чем больше ток через эмиттерный переход, т. е. чем больше дырок «впрыскивает» эмиттер в базу, тем больше ток коллектора, который зависит от числа этих дырок. Поэтому, управляя эмиттерным током, можно управлять и коллекторным током.

Схема простейшего полупроводникового усилителя изображена на рис. 43, б. В цепь коллектора (на выходе триода) включена нагрузка R_H . Источник питания U_0 подсоединяется в прямом направлении и поэтому эмиттерный $p-n$ -переход обладает малым сопротивлением. Источник питания в цепи коллектора подсоединяется в обратном направлении, в связи с чем сопротивление коллекторного $n-p$ -перехода имеет значительную величину.

Сопротивление нагрузки R_H при соответствующем подборе напряжения источника питания U_0 может быть достаточно большим по сравнению с сопротивлением на входе усилителя.

Полупроводниковый триод будет усиливать мощность подаваемого сигнала, так как мощность, подводимая к

его входу D , меньше полезной мощности сигнала на выходе.

Ввиду того, что база рассмотренного триода является общей для цепи эмиттера и коллектора, такая схема включения называется *схемой с общей базой*. Основные параметры, характеризующие усилители с общей базой, показывают, что имеет место усиление по току с коэффициентом менее единицы и усиление по напряжению с коэффициентом значительно больше единицы. Входное сопротивление мало, выходное сопротивление очень велико, а напряжение входного и выходного сигналов синфазны.

Чаще применяется другая схема включения полупроводникового триода — *схема с общим эмиттером*, при которой, кроме усиления мощности, имеет место также усиление тока (см. рис. 43, в).

На рис. 43, г приведена схема включения транзистора с *общим коллектором*. Эта схема позволяет получить коэффициент усиления по току и мощности в несколько десятков единиц, а по напряжению — около единицы.

Тиристор — управляемый полупроводниковый вентиль имеет четырехслойную кремниевую структуру типа $p-n-p-n$ (рис. 43, д) с двумя крайними и двумя внутренними областями. Внешние выводы присоединяются к двум крайним и одной базовой области. Если на анод (внешний p -слой) подан потенциал положительный относительно катода (внешний n -слой), то при приложении между анодом и катодом тиристора положительного напряжения через прибор начинает протекать слабый ток. При подаче на цепь управляющего электрода положительного потенциала общий ток, проходящий через управляемый полупроводниковый вентиль, возрастает вследствие эффекта транзисторного усиления и небольшая мощность, затраченная в цепи «управляющий электрод — катод» во много раз увеличивает мощность в цепи анода.

Свойства и характеристики управляемых кремниевых вентилях-тиристоров позволяют создавать качественно новые системы управления электрическим приводом постоянного и переменного тока. Тиристорный привод имеет следующие преимущества: бесступенчатое регулирование, незначительную мощность управления, постоянную готовность к включению, возможность работать при вибрации, тряске, ударах. Применение тиристорных пре-

образователей-усилителей обеспечивает плавность пусковых режимов, улучшение работы механической части, повышение к. п. д., снижение массы и габаритов аппаратуры, что имеет существенное значение для самоходных машин. Используя тиристорный привод, можно осуществить быстрый переход от автономного источника питания к питанию от сети строительной площадки.

§ 16. МАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Магнитным усилителем называется электромагнитное устройство, использующее зависимость изменения магнитной проницаемости ферромагнитного материала от изменения напряженности магнитного поля. Достоинство магнитных усилителей — отсутствие контактов, высокая чувствительность и долговечность.

Простейший магнитный усилитель или дроссель насыщения (рис. 44, а) работает следующим образом: при питании рабочей обмотки усилителя W_p переменным током напряжением U_p ток, протекающий по нагрузке Z_n , будет мал ввиду того, что индуктивное сопротивление катушки велико:

$$I_n = U_p / \sqrt{R_n^2 + (\omega L)^2},$$

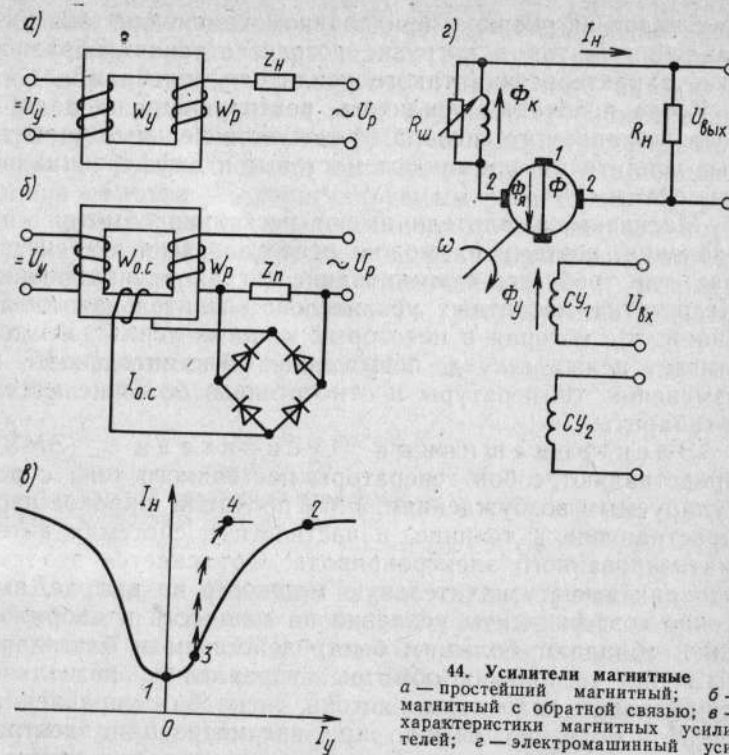
где R_n — активное сопротивление катушки и нагрузки, Ом;
 ωL — индуктивное сопротивление, Ом (ω — угловая частота, рад/с; L — индуктивность катушки, Гн).

Индуктивность же катушки зависит от магнитной индукции сердечника, а следовательно, и магнитной проницаемости:

$$L = (4\pi S \omega^2 / 10^{-7} l) \mu,$$

где S — сечение магнитопровода, м²;
 ω — число витков катушки;
 l — длина магнитопровода, м;
 μ — магнитная проницаемость материала сердечника, Гн/м.

Управление магнитной проницаемостью μ , а точнее управление напряженностью магнитного поля, производится обмоткой управления W_y , в которую подается постоянный ток. При подаче сигнала управления U_y магнитная индукция сердечника магнитного усилителя увеличивается, а магнитная проницаемость его уменьшается. Изменяется индуктивность катушки, уменьшается индуктивное сопротивление рабочей катушки, и ток нагрузки возрастает (эффект усиления).



44. Усилители магнитные
 а — простейший магнитный; б — магнитный с обратной связью; в — характеристики магнитных усилителей; г — электромашинный усилитель

Для увеличения коэффициента усиления в магнитных усилителях применяется положительная обратная связь. Работа усилителя с положительной обратной связью (рис. 44, б) сводится к следующему. Часть энергии переменного тока рабочей цепи подается на выпрямитель, а затем в обмотку обратной связи $W_{o.c}$. Таким образом сердечник усилителя дополнительно подмагничивается постоянным током. Поэтому для полного насыщения сердечника потребуется меньший ток сигнала управления I_y , вследствие чего возрастает коэффициент усиления.

На рис. 44, в показана статическая (плавная) характеристика магнитного усилителя. Точка 1 соответствует току, протекающему по нагрузке Z_n при сигнале управления $I_y = 0$, а точка 2 — максимальному насыщению сердечника. Характеристика магнитного усилителя с положительной обратной связью показана кривой 3—4.

Как видно из рисунка, при плавном изменении тока управления I_y ток в нагрузке возрастает скачкообразно, т. е. характеристика такого усилителя релейная.

Когда необходим усилитель, реагирующий на полярность подаваемого сигнала (фазочувствительные магнитные усилители), применяют мостовые и дифференциальные схемы.

Магнитные усилители имеют несколько обмоток управления, поэтому их можно использовать в тех системах, где требуется суммирование сигналов управления. Недостатки магнитных усилителей: значительная инерционность, которая в некоторых мощных усилителях достигает целых секунд, повышенная чувствительность к изменению температуры и относительно большие масса и габариты.

Электромашинные усилители (ЭМУ) представляют собой генераторы постоянного тока с регулируемым возбуждением. ЭМУ получили широкое распространение в технике, в частности в системах автоматизированного электропривода. Объясняется это тем, что они имеют значительную мощность на выходе, высокие коэффициенты усиления по мощности и напряжению, обладают большим быстродействием и благодаря наличию нескольких обмоток управления позволяют суммировать магнитные потоки сигналов управления. ЭМУ используют обычно при автоматизации электроприводов постоянного тока для регулирования частоты вращения. Возможно применение их и в качестве электродвигателей.

ЭМУ бывают продольного (с регулируемым самовозбуждением) и поперечного полей.

ЭМУ *продольного поля* — обычные генераторы постоянного тока, имеющие одну или несколько обмоток возбуждения. Недостатками являются нестабильность коэффициента усиления, значительная инерционность и малый коэффициент усиления (50—100). Поэтому наиболее широкое распространение получили ЭМУ *поперечного поля* (рис. 44, г), в котором для возбуждения второго (выходного) каскада используется магнитный поток поперечной реакции якоря.

ЭМУ с поперечным магнитным полем работает следующим образом. При принудительном вращении якоря усилителя в магнитном потоке сигнала управления Φ_y в его обмотках индуктируется ЭДС. Эта ЭДС, замыка-

ясь накоротко щетками 1—1, создает большой по величине ток короткого замыкания I_k , который вызывает появление мощного поперечного магнитного потока Φ . При вращении якоря в этом потоке в его обмотке индуктируется значительная ЭДС, которая снимается щетками 2—2 и подается в цепь нагрузки R_n . Компенсационная обмотка W_k с регулируемым резистором $R_{ш}$ служит для создания компенсационного магнитного потока Φ_k , который направлен навстречу магнитному потоку реакции якоря Φ_y , размагничивающему машину. Величина магнитного потока Φ_k регулируется резистором $R_{ш}$.

Коэффициент усиления ЭМУ по мощности можно определить по формуле

$$k = cn^4/R_n R_y,$$

где c — постоянная усилителя;

n — частота вращения якоря ЭМУ, c^{-1} ;

R_n — сопротивление нагрузки, Ом;

R_y — сопротивление обмотки управления СУ, Ом.

Анализируя формулу, видно, что для увеличения коэффициента усиления необходимо увеличивать скорость вращения якоря ЭМУ. Поэтому в современных ЭМУ частота вращения составляет 50—100 c^{-1} .

На холостом ходу ЭДС усилителя прямо пропорциональна току управления, т. е. $E = k\omega^2(I\omega_y)$.

При выборе электромашинного усилителя руководствуются следующими данными исполнительного элемента: номинальное напряжение ЭМУ должно соответствовать номинальному напряжению исполнительного элемента, а отношение токов $I_{ЭМУ}/I_{дв} > 1$. Чем выше требование к быстродействию систем, тем больше должно быть это отношение. Сопротивление обмоток управления ЭМУ выбирают в зависимости от типа предварительного усилителя. При использовании электронного предварительного усилителя берут обмотки с большим сопротивлением, при использовании магнитного — с меньшим.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение усилителей и их основные характеристики.
2. Почему поляризованное реле реагирует на полярность сигнала управления?
3. Объясните принцип работы электронных и полупроводниковых усилителей.

4. Чем достигается повышенный коэффициент усиления у магнитных усилителей?

5. Почему электромашинный усилитель с поперечным полем считается двухкаскадным?

6. Перечислите основные характеристики реле.

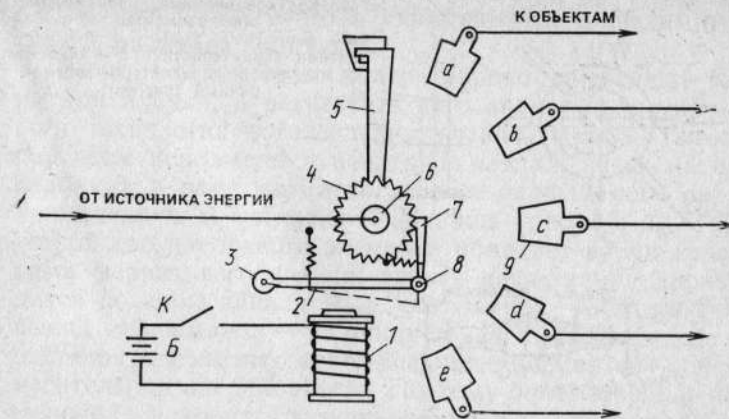
ГЛАВА IV СЧЕТНО-РЕШАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

§ 17. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ

Счетчики импульсов — это устройства для отсчета и запоминания количества электрических импульсов, пришедших на его вход за некоторый интервал времени. Они могут применяться для оценки частоты вращения (частотомеры) как датчики интервалов времени, декодирующие элементы, а также в качестве узлов различных синхронизирующих и управляющих устройств.

Различают два направления использования счетчиков импульсов: 1) в качестве измерительного устройства, обеспечивающего снятие (чтение) показаний в любой нужный момент; 2) в качестве делителя частоты импульсов, т. е. устройства, на выходе которого появляется сигнал по прошествии определенного числа K импульсов на входе. Число K в этом случае называется коэффициентом пересчета.

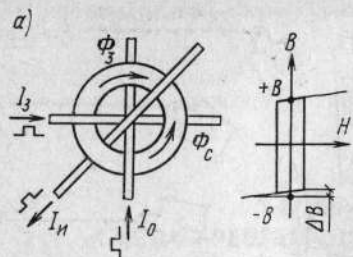
Простейшим счетчиком импульсов (регистром сдвига) может быть обычный шаговый искатель (рис. 45). При замыкании ключа K цепи электромагнита 1 якорь 2 на оси 3 притягивается к сердечнику, а защелка 7 входит в зацепление с очередным зубцом храповика 4. После обесточивания катушки защелка 7 с осью 8 поднимается под действием пружины и поворачивает храповик 4 вместе с подвижным контактом 5, укрепленным на оси 6, который переходит на неподвижный контакт 9. При повторном замыкании и размыкании цепи электромагнита подвижный контакт 5 через определенное число шагов замыкает очередной неподвижный контакт. Недостаток такого регистра сдвига — наличие контактной пары.



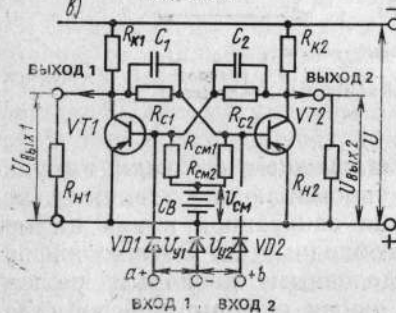
45. Шаговый искатель
1 — электромагнит; 2 — якорь; 3, 6, 8 — оси; 4 — храповик; 5, 9 — подвижный и неподвижный контакты; 7 — защелка

Электромагнитные и электронные счетчики импульсов имеют в своей схеме запоминающие элементы, которые служат для хранения записанной в них информации и выдачи ее при необходимости. Обычно информация записывается определенным двоичным числом. Это обусловлено тем, что любая информация формально находится в двух предельных состояниях: нет информации и есть информация. Используя это, можно создать элемент памяти, который может запомнить информацию своим состоянием, например, включено или отключено. Таким образом, в качестве запоминающего элемента можно использовать любой прибор, который может находиться в двух состояниях или изменять эти свои состояния. Для запоминания большой информации собираются сложные системы, которые состоят из элементарных запоминающих элементов.

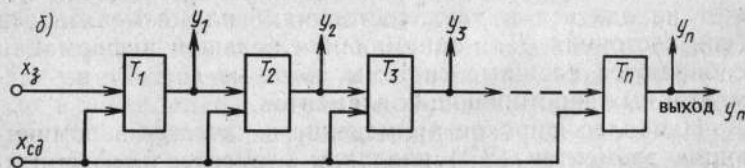
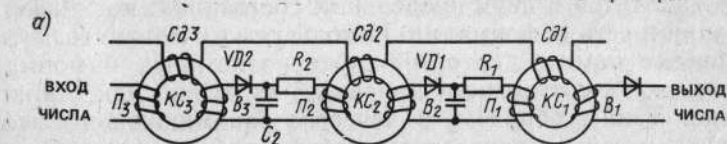
Наиболее широкое применение в качестве запоминающих элементов (ЗЭ) получили элементы на ферритовых кольцах (рис. 46, а), электронные и полупроводниковые приборы. Работа ЗЭ сводится к следующему. При подаче импульса тока записи I_3 по соответствующей шине ферритовое кольцо намагничивается, положим, по часовой стрелке (до индукции насыщения $+B$). Это состояние будем считать за 1. При подаче импульса тока опроса I_0 феррит переманчивается против часовой



46. Кратковременные запоминающие элементы
 а — ферритовое кольцо и его магнитная характеристика; б — элемент с магнитной пленкой; в — симметричный триггер



47. Счетчики импульсов
 а — счетчик импульсов на ферритовых кольцах; б — блок-схема счетчика на триггерах



стрелки (до индукции насыщения $-B$). В считывающей шине индуцируется сигнал $I_{и}$, который и является выходной информацией. Если бы информация не была записана, то при подаче импульса тока опроса I_o изменение магнитной индукции было бы чрезвычайно мало

ΔB . В результате этого в считывающей шине импульс тока $I_{и}$ равнялся бы нулю.

Вместо ферритовых колец широко применяют магнитные пленки, в результате чего значительно упрощается технология изготовления ячейки памяти, так как при этом используется печатный монтаж ячеек на проводниках в виде магнитного слоя, напыляемого на записывающую и считывающую шины (рис. 46, б). Такое устройство пленочного элемента обладает всеми качествами ферритового кольца: запись информации производится по шине записи $W_{зап}$, считывание — обмоткой $W_{т}$, вывод информации — на шину $W_{вып}$. Существенный недостаток магнитных запоминающих элементов — их относительная инерционность. Поэтому более широкое применение находят полупроводниковые запоминающие элементы, отличающиеся высоким быстродействием. Их основу составляют триггеры.

Триггером называется переключающее устройство, которое сколь угодно сохраняет одно из двух своих состояний устойчивого равновесия и скачкообразно переключается из одного состояния в другое по сигналу извне. Триггеры выполняются на электронных лампах, газоразрядных или полупроводниковых приборах.

На рис. 46, в показан симметричный триггер. В его схеме имеются два одинаковых полупроводниковых триода $VT1$ и $VT2$, включенных по схеме с общим эмиттером. Оба триода соединены перекрестно цепями положительной обратной связи: коллектор триода $VT1$ связан через резистор связи $R_{с1}$ и емкость C_1 с базой триода $VT2$, а коллектор триода $VT2$ через резистор связи $R_{с2}$ и емкость C_2 с базой триода $VT1$. На базы обоих триодов через резистор $R_{см}$ подается положительный потенциал $U_{см}$ от источника смещения GB . Напряжение смещения $U_{см}$ при отсутствии управляющего сигнала обеспечивает надежное запертие одного из триодов.

Питающее напряжение подается на коллекторы и эмиттеры обоих триодов, при этом в коллекторные цепи триодов $VT1$ и $VT2$ включены резисторы $R_{к1}$ и $R_{к2}$.

Триггер имеет два входа a и b (базы триодов) и два выхода 1 и 2 (коллекторы триодов). Он может занимать два устойчивых состояния, при которых выходное напряжение подается на одно из двух подключенных к его выходам нагрузочных резисторов $R_{н1}$ или $R_{н2}$.

При открытии и закрытии каждого триода напряже-

ние на его коллекторе скачкообразно меняется. Эти изменения используются в качестве выходных импульсов, подаваемых на нагрузочные сопротивления. При включении триггера в работу и подаче на него питающего напряжения U он самостоятельно принимает одно из устойчивых состояний и находится в нем до тех пор, пока на один из его выходов a или b не будет подан управляющий сигнал.

Регистр сдвига (счетчик импульсов) на ферритовых кольцах (рис. 47, а) работает следующим образом. В начальном состоянии все ферритовые кольца намагничены, например, против часовой стрелки, что соответствует отсутствию информации, т. е. 0. При подаче импульса записи на обмотку P_3 кольцевой сердечник (феррит) KC_3 перемагничивается по часовой стрелке, при этом диод $D2$ закрыт и возникающая при этом ЭДС в обмотке B_3 не создает тока. При подаче импульса спроса в сдвигающую обмотку $Cd3$ сердечник перемагничивается против часовой стрелки, в обмотке возникает ЭДС, диод $VD2$ открывается и ток заряжает конденсатор C_2 . Разряд конденсатора на обмотку P_2 второго кольцевого сердечника намагничивает его по часовой стрелке. При подаче следующего сдвигающего импульса произойдет перемагничивание другого кольцевого сердечника и т. д. Таким образом записанная информация «бежит» по регистру сдвига по мере подачи импульсов в сдвигающую обмотку.

Недостатком таких счетчиков является их значительная инерционность.

Счетчик импульсов с триггерными запоминающими элементами (см. рис. 46, в) можно собрать по схеме, показанной на рис. 47, б, которая представляет цепочку триггеров $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$. Запись сигнала X_3 подается на вход первого триггера T_1 , при этом на его входе возникает положительный потенциал, который не воздействует на T_2 . Таким образом, в счетчике зафиксировано двоичное число 100—0. После этого поступает сдвигающий импульс $x_{сд}$, который перебрасывает T_1 в исходное состояние и, вследствие возникающего при этом отрицательного потенциала, перебрасывает T_2 в состояние положительного потенциала на его выходе. Произошел сдвиг числа 010—0. Следующий сдвигающий импульс переместит сигнал далее, в другой триггер (ячейку), и т. д. После n сдвигающих импульсов на выходе счет-

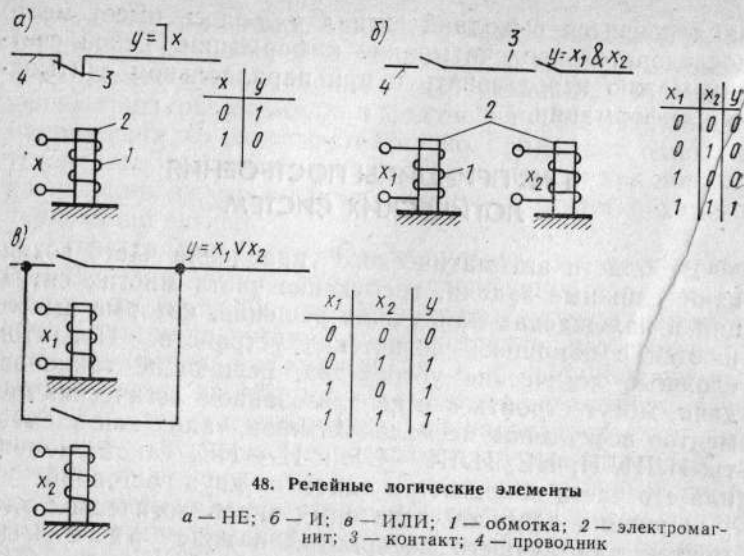
чика появится выходной сигнал y_n . Здесь имеет место последовательное считывание информации. Такой счетчик можно использовать и при параллельном считывании информации.

§ 18. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В области автоматического управления часто возникают сложные задачи, требующие учета многих ситуаций и нахождения наилучших решений, которые выполняются с помощью логических устройств. При этом сложные логические устройства, решающие такие задачи, могут строиться с использованием логических элементов всего лишь нескольких типов, таких как элементы ИЛИ, И, НЕ, ИЛИ—НЕ и И—НЕ. Такой элемент или его части находятся в одном из двух состояний.

Принцип действия некоторых типов логических элементов для лучшего восприятия в виде релейных эквивалентов условно показан на рис. 48. Элемент, выполняющий логическую операцию отрицания, — это элемент НЕ (рис. 48, а). При пропускании электрического тока через обмотку 1 электромагнита 2 к нему притягивается контакт 3 и ток в проводнике 4 прерывается. Здесь x — наличие или отсутствие тока в обмотке 1, а y — в проводнике 4. Если ток протекает, то x и y равняются единице, а если нет, то нулю. Эта зависимость показана в таблице под рис. 48, а. Она условно записывается в виде $y = \bar{x}$. Величина y является функцией от x . Это значит, что сигнал y на выходе элемента имеется только при отсутствии сигнала на входе x , и наоборот. Такие переменные величины называются булевыми переменными; функции такого рода тоже называются булевыми функциями. Название дано в честь создателя булевой алгебры — английского математика Дж. Буля, отца известной писательницы Э. Л. Войнич, автора романа «Овод».

Двумя другими элементами, изображенными на рис. 48, реализуются функции от двух других булевых переменных. Элемент, показанный на рис. 48, б, отличается от ранее рассмотренного тем, что здесь имеются два электромагнита 2 и два замыкающих контакта 3, размыкающих проводник 4, когда ток не пропускается через обмотки 1 одного и другого электромагнита. Если



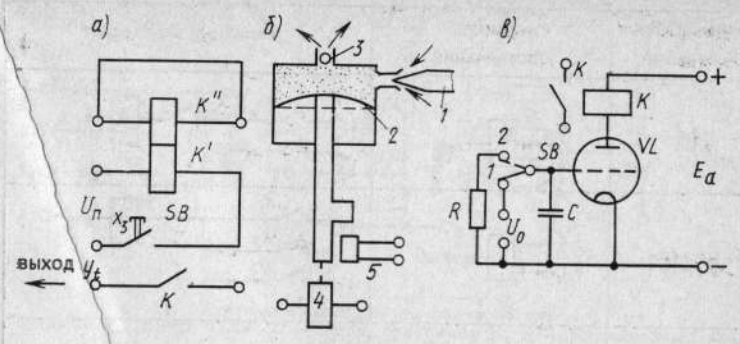
48. Релейные логические элементы

ток протекает по обмоткам 1 и в проводнике 4, то это обозначается соответственно как $x_1=1, x_2=1, y=1$, а если тока нет, как $x_1=0, x_2=0, y=0$. Функциональная зависимость между y и x_1 и x_2 определяется так, как указано в таблице, расположенной справа от схемы. Данная функция, для которой принято обозначение $y = x_1 \& x_2$ (логическое умножение), имеет специальное название: *конъюнкция*. Так как $y=1$ только в том случае, если $x_1=1$ и $x_2=1$, то элементы этого типа называются *элементами И*.

На рис. 48, в показан элемент, при работе которого $y=1$, если $x_1=1$ или $x_2=1$ либо обе эти переменные равны 1. Он называется *элементом ИЛИ*. Выполняемая им логическая функция (логическое сложение), обозначаемая $y = x_1 \vee x_2$, тоже имеет особое название: *дизъюнкция*.

В качестве логических элементов в системах автоматики применяются также различные реле времени.

В качестве простейшего реле времени можно использовать двухобмоточное *электрохимическое реле* (рис. 49, а). При подаче сигнала записи информации x_3 контакт реле K срабатывает с некоторым запаздыванием, так как в короткозамкнутой обмотке K'' находится противоземлюющая сила, которая «сдерживает» на-



49. Реле времени

а - двухобмоточное; б - пневматическое; 1 - дроссель; 2 - мембрана; 3 - обратный клапан; 4 - электромагнит; 5 - микровыключатель; в - электронное

растание тока в катушке K' . Время задержки составляет 1,5—2 с. При отключении катушки реле от источника питания U_n наблюдается обратная картина, и контакт реле с некоторым запаздыванием (5—8 с) обесточивает *цепь управления Y(t)*.

Работа *пневматического реле времени* сводится к следующему. При записи информации подается импульс тока в электромагнит, который срабатывает и штангой прогибает мембрану (рис. 49, б). Воздух из камеры выбрасывается через обратный клапан. По окончании действия электромагнита мембрана стремится занять устойчивое положение. В камере создается разрежение и воздух засасывается через дросселируемое отверстие. Скорость движения мембраны в исходное положение зависит от количества воздуха, поступающего через это дросселируемое отверстие. Как только мембрана со штангой займет нижнее положение, срабатывает микровыключатель (закрывает цепь), и на выходе (через определенное время с начала подачи сигнала записи) появляется сигнал информации. Регулировка времени срабатывания таких реле составляет 0,5—180 с.

Электронное реле времени (рис. 49, в) состоит из электронной лампы VL , конденсатора C , резистора R , электрохимического реле K и ключа SB . Работа реле сводится к следующему: при замыкании контактов ключа (положение 1) лампа заперта отрицательным потенциалом опорного напряжения U_0 . Этим же потенциалом

НАИМЕНОВАНИЕ ФУНКЦИИ	УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ	РЕЛЕЙНЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ
И		
ИЛИ		
НЕ		
ВЫДЕРЖКА ВРЕМЕНИ		

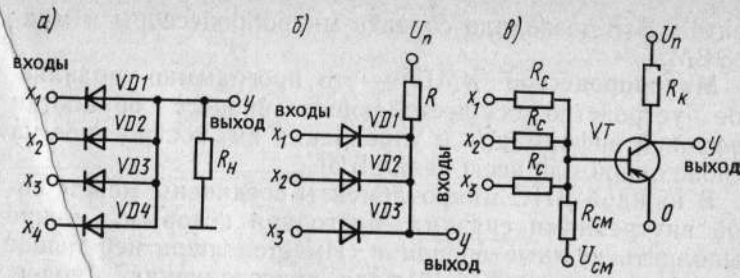
50. Основные логические элементы

заряжен и конденсатор C . Для записи информации контакт ключа перебрасывается в положение 2. При этом конденсатор начинает разряжаться на резистор R . Потенциал сетки лампы повышается до 0, и лампа отпирается. В ее анодной цепи начинает протекать ток, и реле срабатывает. Время с начала подачи сигнала записи (переброс ключа) до срабатывания реле определяется емкостью конденсатора C , резистором R , а также опорным напряжением U_0 .

Перечисленные логические элементы и их условные обозначения показаны на рис. 50. Они могут быть созданы с помощью контактных электромагнитных реле (см. рис. 48 и 49) или на полупроводниках.

Бесконтактные полупроводниковые логические элементы показаны на рис. 51. При подаче сигнала на любой из входов x_1, x_2, x_3, x_4 схемы ИЛИ на выходе появляется сигнал y . Для получения сигнала на выходе элемента И (его диоды включены противоположным образом) необходимо подать «запирающий» сигнал на все входы схемы.

Транзисторный элемент ИЛИ — НЕ (рис. 51, в) представляет собой инвертор с тремя входами, выпол-



51. Логические элементы на полупроводниках: а — диодный элемент ИЛИ; б — диодный элемент И; в — транзисторный элемент ИЛИ — НЕ

ненными на сопротивлениях. При сигнале 0 на всех входах транзистор закрыт, а на выходе имеется отрицательный потенциал (сигнал 1). При подаче хотя бы на один из входов сигнала 1 транзистор открывается и сигнал на выходе становится равным 0. Коллекторный резистор используют при работе с другими элементами.

Пневматические логические элементы можно выполнить с помощью струйной техники. Они имеют преимущества перед электронной и поэтому применяются в объектах, имеющих высокую тепловую напряженность либо агрессивную или токопроводящую среду.

§ 19. МИКРОПРОЦЕССОРЫ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ

При изготовлении элементов и устройств логического действия способом интегральных схем в миниатюрной пластинке (кристалле) размещается множество транзисторов, диодов и резисторов. С их помощью выполняют различные логические функции. Эти же составные компоненты интегральных схем используют и для запоминания сигналов.

Микроэлектронные интегральные схемы являются базой для современных электронно-вычислительных машин (ЭВМ), которые благодаря им стали более дешевыми, надежными и малогабаритными. В основном это достигнуто за счет освоения технологии создания больших микроэлектронных интегральных схем (БИС). Каждая БИС представляет собой кристалл размером всего в несколько квадратных миллиметров, в котором сосредоточены десятки тысяч полупроводниковых эле-

ментов. Это позволило создать микропроцессоры и микроЭВМ.

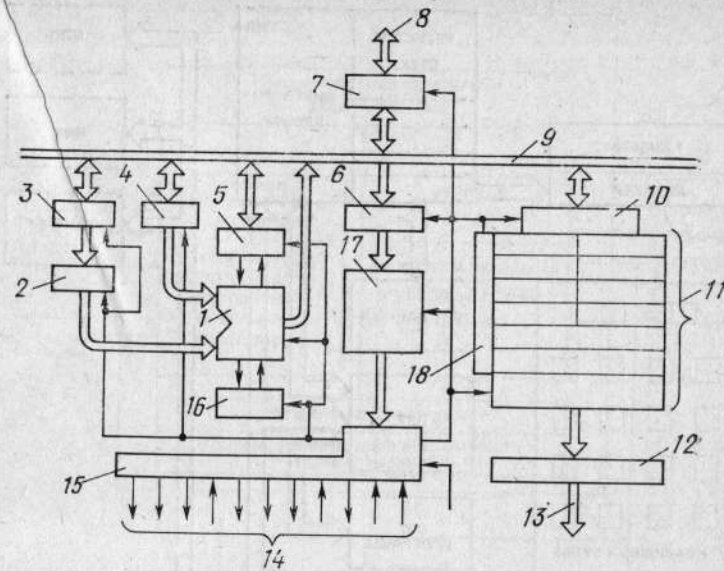
Микропроцессор (МП) — это программно-управляемое устройство, осуществляющее процесс обработки цифровой информации и управления им, построенное на основе одной или нескольких БИС.

В каждой БИС микроэлементы соединены между собой внутренними связями, благодаря которым можно выполнить нужные операции. Имеется лишь небольшое число контактов (20—40) для присоединения отводов, служащих для ввода и вывода информации и внешнего управления работой БИС. Вместе с контактами БИС монтируют в корпусе, и в таком виде МП пригоден для использования в вычислительной системе или системе автоматического управления. В некоторых из выполненных образцов объем корпуса МП менее 2 см³.

С созданием микропроцессорной техники появилась возможность массового применения ЭВМ, в частности, в области автоматического управления. Большие, средние по производительности да и малые ЭВМ, которые и в дальнейшем будут необходимы для обработки более значительных массивов информации, по техническим причинам и в силу экономических соображений ранее не могли использоваться для управления такими объектами, как относительно несложные промышленные установки, СДМ, автотракторная и другая техника.

Большое значение имеет и то, что МП и микроЭВМ требуют очень мало электроэнергии и значительно надежнее обычных ЭВМ, так как у БИС отпадает необходимость в соединительных проводах, кроме небольшого числа внешних выводов кристалла.

Устройство управления МП (на примере микропроцессора серии МП 580) показано на рис. 52. Здесь имеются следующие функциональные узлы (блоки). Арифметические и логические операции выполняются арифметически-логическим устройством 1. В его работе участвуют регистры 2—5, каждый из которых содержит несколько ячеек памяти. Блок 16 используется при выполнении действий с двоично-кодированными десятичными числами. В основном наборе регистров 11 имеются общие и оперативные регистры, счетчик команд, адресный регистр и указатель стека (магазина регистров), хранящий в памяти адрес ячейки стека. Здесь же имеются устройства 10 и 18, используемые при управлении

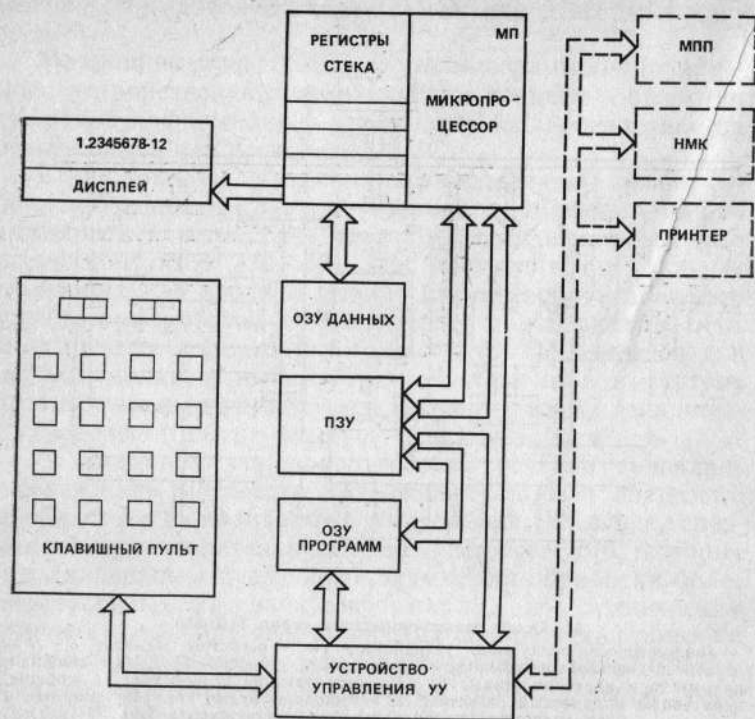


52. Схема микропроцессора серии МП 580

1 — арифметически-логическое устройство; 2—5 — регистры памяти; 6, 17 — регистр и дешифратор команд; 7 — буферный регистр; 8, 9, 13 — внешняя, внутренняя и адресная шины; 10, 18 — управляющие устройства; 11 — общие, оперативные и адресный регистры; 12 — выходной буфер; 14, 15 — каналы и блок внешнего управления; 16 — блок кодирования

работой набора регистров и обменом данными между ним и внутренней шиной 9 микропроцессора (шина — многоканальная линия передачи сигналов). Набор регистров соединен через выходной буфер 12 с адресной шиной 13. В МП имеются также регистр команд 6 и дешифратор команд 17. Через буферный регистр 7 осуществляется обмен информацией с внешней шиной 8. Блок управления 15 имеет ряд каналов 14, по которым передаются сигналы внешнего управления. Стрелками показаны направления передачи сигналов.

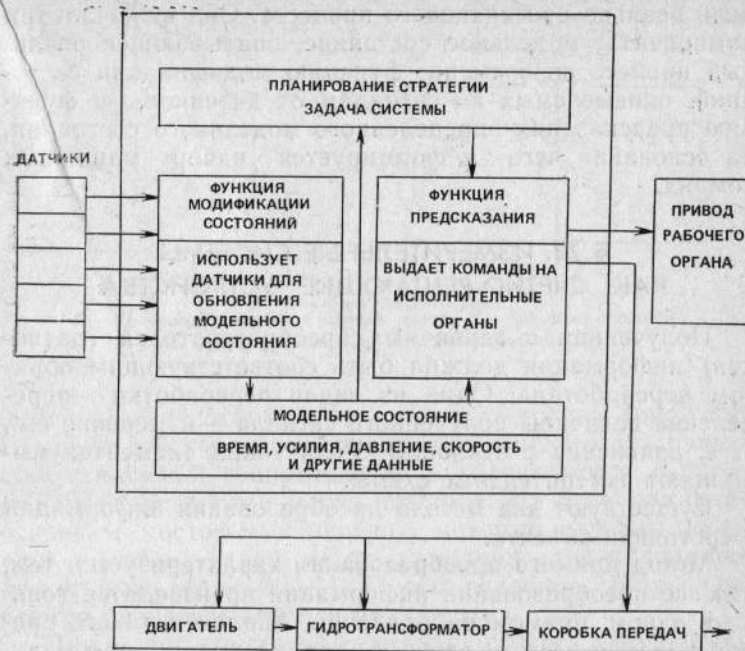
МикроЭВМ, или микрокалькулятор (рис. 53) работает следующим образом. Микропроцессор непосредственно сопряжен с операционными регистрами X и Y, которые являются запоминающими устройствами для хранения двух чисел (операндов). Результат вычислений, поступающих в регистр X, одновременно индицируется в десятичной форме с помощью индикатора (дисплея).



53. МикроЭВМ (микрокалькулятор)

В современных микрокалькуляторах с операционными регистрами X и Y объединены еще несколько регистров (Z , T и т. д.), образуя стек. Перемещение чисел стека вверх ($X \rightarrow Y$, $Y \rightarrow Z$, $Z \rightarrow T$ и т. д.) или вниз ($X \leftarrow Y$, $Y \leftarrow Z$, $Z \leftarrow T$ и т. д.) напоминает перемещение патронов в магазине пистолета.

К МП подключаются также постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) и оперативные запоминающие устройства (ОЗУ) данных и программ. ОЗУ данных — это от одного до нескольких сотен регистров памяти, подобных регистрам X и Y . Пользователь может обратиться к любому из них, задав его номер (адрес). ОЗУ программ хранит команды, задаваемые программой, которую вводит пользователь. В ПЗУ хранятся команды (микропрограммы) для выполнения основных операций. У непрограммируемых микрокалькуляторов ОЗУ про-



54. Основные компоненты микропроцессорной программы управления строительными и дорожными машинами

грамм отсутствует. Иногда ОЗУ данных и программ объединяются, т. е. часть ОЗУ используется для хранения данных, остальная часть — для хранения программ.

Управление всеми блоками от клавишного пульта или автоматически по программе осуществляется устройством управления. Через него к МП могут подключаться некоторые дополнительные устройства: модуль с программами пользователя (МПП), накопитель информации на магнитной карте (НМК), печатающее устройство — принтер и др.

Рассмотренная микроЭВМ построена на нескольких кристаллах БИС и является основой, например, для микрокалькуляторов Электроника БЗ-19М и Электроника БЗ-34 с обратной бесконечной логикой вычисления.

В настоящее время идет подготовка к массовому использованию МП на СДМ, для управления их ДВС, трансмиссией и приводом рабочего органа. Центральное звено такой микропроцессорной системы (рис. 54) — мо-

дель реально протекающего процесса. Она включает три компонента: модельное состояние, описывающее реальный процесс во времени; функцию модификации состояний, описываемых по сигналам от датчиков, и функцию предсказания определенного модельного состояния, на основании чего и формируется набор машинных команд.

§ 20. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ КАК СЧЕТНО-РЕШАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Полученная с первичных преобразователей (датчиков) информация должна быть соответствующим образом переработана. Одна из задач переработки — определение величины полученного сигнала — измерение его, т. е. сравнение с эталоном. Роль таких элементов выполняют измерительные схемы.

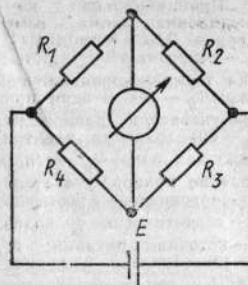
Существуют два метода преобразования информации о состоянии объекта.

Метод прямого преобразования характеризуется тем, что все преобразования информации производятся только в одном, прямом направлении. Аналогом такого преобразования может служить управление по разомкнутому циклу (см. рис. 1), где управляющим устройством является датчик, например, температуры (термопара), а объектом управления — милливольтметр (см. рис. 33, верхняя или средняя схемы).

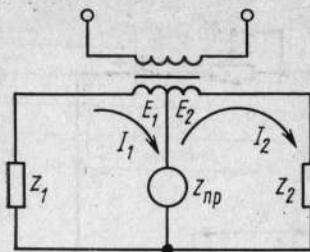
Метод прямого преобразования отличается сравнительно низкой точностью, однако имеет и ряд преимуществ: простота конструкции (значит, высокая надежность), меньшая масса и стоимость, высокое быстродействие.

Метод уравнивания предусматривает использование двух цепей преобразователей: прямого и обратного преобразования. Аналогом, реализующим метод уравнивания, может быть управление по замкнутому циклу (см. рис. 2). Здесь благодаря обратной связи на вход объекта управления (измерительного прибора) поступает только небольшая часть входной преобразуемой величины со знаками «+» или «-», характеризующей степень неравновесия. Метод уравнивания применяется в ряде приборов (систем) с мостовыми равновесными и компенсационными измерительными схемами.

Мостовая схема постоянного тока



55. Мост постоянного тока
 R_1 — R_4 — сопротивления в плечах моста; E — источник питания



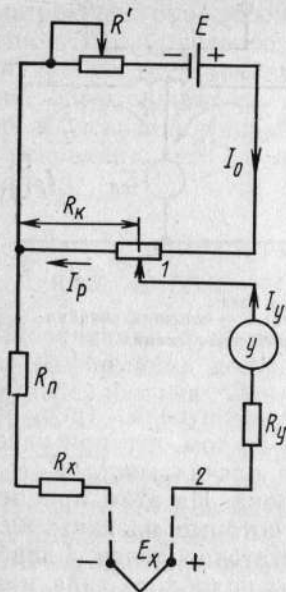
56. Дифференциальная измерительная схема

имеет в своей основе схему моста Уитсона (рис. 55). Принцип действия моста основан на том, что при равенстве отношений сопротивлений в плечах моста $R_1/R_4 = R_2/R_3$ в диагонали моста нет тока. На этом принципе основаны мостовые измерения, которые названы *нулевым методом*. Такой метод достаточно точен (ошибка может быть менее 0,5%). Мосты подобного типа называются равновесными или балансными.

При *непосредственном методе* отсчета измеряемая величина определяется по показанию прибора, включенного в измерительную цепь. Однако в этом случае ток в цепи зависит от напряжения источника питания. Это вызывает необходимость в обеспечении постоянства напряжения либо использовании в качестве измерительного прибора логометр (устройство магнитоэлектрической системы, малочувствительное к изменению напряжения питания).

Мостовая схема переменного тока аналогична мосту постоянного тока, но отличается от него тем, что плечи состоят из сопротивлений, имеющих как активные составляющие, так и реактивные.

Дифференциальная измерительная схема состоит из двух смежных контуров (рис. 56), в каждом из которых действует своя ЭДС (E_1 , E_2). Измерительный прибор с сопротивлением $Z_{пр}$ включен в ветвь, общую для обоих контуров. Такая схема удобна при использовании индуктивных датчиков. В этом случае Z_1 и Z_2 являются их сопротивлениями. Дифференциальная схема проще мостовой и в ряде случаев имеет более высокую чувствительность.



57. Принципиальная компенсационная схема измерения ЭДС термопары
 R_x — сопротивление источника термоэлектродвижущей силы; I_y — ток в цепи прибора-указателя равновесия; E_x — определяемая электродвижущая сила; R_y — сопротивление прибора-указателя; R_k — сопротивление реохорда; R_n — сопротивление проводов; E — источник питания; R' , R_k — сопротивление цепи питания; I_0 — ток источника питания; I_p — ток расбаланса

Измерительный прибор, включенный в общую ветвь, показывает разность контурных токов. Эта разность появляется в результате изменения одной (обеих) ЭДС или одного (обоих) сопротивлений (например, у датчиков-тензорезисторов).

Компенсационные схемы применяются для измерения сигналов, полученных с преобразователей в виде изменения напряжения. В основе работы компенсационных схем лежит метод сравнения. Характерная черта этих схем — высокая точность измерения.

Применяемые в автоматических системах компенсационные устройства выполняются с автоматическим уравниванием. Эти устройства называются *автоматическими потенциометрами (компенсаторами) постоянного и переменного тока*.

На рис. 57 изображена принципиальная электрическая компенсационная схема, на вход которой для измерения подается электродвижущая сила E_x , создаваемая, например, термопарой.

Измеряемая ЭДС E_x прикладывается к зажимам резистора R_y прибора-указателя и к последовательно соединенным резисторам ($R_k + R_n$). Чтобы скомпенсиро-

вать падение напряжения на этих участках из условий $I_y = 0$, необходимо передвинуть реохорд потенциометра R_k таким образом, чтобы разность потенциалов между точками 1 и 2 была равна нулю. Это возможно при условии, что на части сопротивления потенциометра R_k падение напряжения $U_k = I_0 R_k$ скомпенсировало измеряемую ЭДС E_x .

Доказано, что линейное перемещение реохорда потенциометра пропорционально измеряемой ЭДС, что и формирует управляющее воздействие.

Компенсационные измерительные схемы постоянного тока питаются от сухих гальванических элементов, требующих периодического контроля и регулирования величины тока I_0 с помощью реостата R' .

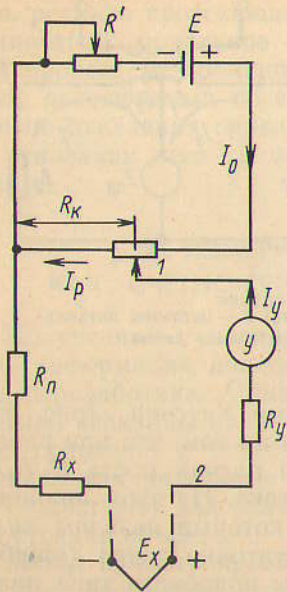
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Направления использования счетчиков импульсов.
2. Основные логические операции и способы их реализации.
3. Что такое триггер?
4. Что представляет собой микропроцессор?
5. Основные виды измерительных схем.
6. Назовите измерительную схему, в которой измеряемая величина преобразуется в изменение активного или реактивного сопротивления.

ГЛАВА V ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

§ 21. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Исполнительным органом или механизмом называется устройство, преобразующее командные сигналы в регулирующие воздействия (перемещение, вращение). Исполнительные органы систем регулирования являются последним звеном цепи автоматического регулирования. Они воздействуют на процесс в соответствии с получаемой командной информацией. Эти устройства, состоящие из блоков, включающих исполнительный механизм и регулирующий орган, могут снабжаться дополнительными вспомогательными блоками.



57. Принципиальная компенсационная схема измерения ЭДС термопары
 R_x — сопротивление источника термоэлектродвижущей силы; I_y — ток в цепи прибора-указателя равновесия; E_x — определяемая электродвижущая сила; R_y — сопротивление прибора-указателя; R_K — сопротивление реохорда; R_n — сопротивление проводов; E — источник питания; R' , R_K — сопротивление цепи питания; I_0 — ток источника питания; I_p — ток расбаланса

Измерительный прибор, включенный в общую ветвь, показывает разность контурных токов. Эта разность является в результате изменения одной (обеих) ЭДС или одного (обоих) сопротивлений (например, у датчиков-тензорезисторов).

Компенсационные схемы применяются для измерения сигналов, полученных с преобразователей в виде изменения напряжения. В основе работы компенсационных схем лежит метод сравнения. Характерная черта этих схем — высокая точность измерения.

Применяемые в автоматических системах компенсационные устройства выполняются с автоматическим уравниванием. Эти устройства называются *автоматическими потенциометрами (компенсаторами) постоянного и переменного тока*.

На рис. 57 изображена принципиальная электрическая компенсационная схема, на вход которой для измерения подается электродвижущая сила E_x , создаваемая, например, термопарой.

Измеряемая ЭДС E_x прикладывается к зажимам резистора R_y прибора-указателя и к последовательно соединенным резисторам $(R_K + R_n)$. Чтобы скомпенсиро-

вать падение напряжения на этих участках из условий $I_y = 0$, необходимо передвинуть реохорд потенциометра R_K таким образом, чтобы разность потенциалов между точками 1 и 2 была равна нулю. Это возможно при условии, что на части сопротивления потенциометра R_K падение напряжения $U_K = I_0 R_K$ скомпенсировало измеряемую ЭДС E_x .

Доказано, что линейное перемещение реохорда потенциометра пропорционально измеряемой ЭДС, что и формирует управляющее воздействие.

Компенсационные измерительные схемы постоянного тока питаются от сухих гальванических элементов, требующих периодического контроля и регулирования величины тока I_0 с помощью реостата R' .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Направления использования счетчиков импульсов.
2. Основные логические операции и способы их реализации.
3. Что такое триггер?
4. Что представляет собой микропроцессор?
5. Основные виды измерительных схем.
6. Назовите измерительную схему, в которой измеряемая величина преобразуется в изменение активного или реактивного сопротивления.

ГЛАВА V ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

§ 21. КЛАССИФИКАЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Исполнительным органом или механизмом называется устройство, преобразующее командные сигналы в регулирующие воздействия (перемещение, вращение). Исполнительные органы систем регулирования являются последним звеном цепи автоматического регулирования. Они воздействуют на процесс в соответствии с получаемой командной информацией. Эти устройства, состоящие из блоков, включающих исполнительный механизм и регулирующий орган, могут снабжаться дополнительными вспомогательными блоками.

В системах автоматического регулирования (например, количества вещества) исполнительный механизм предназначен для перемещения затвора регулирующего органа, который воздействует на процесс путем изменения пропускной способности.

В зависимости от вида используемой энергии и конструктивных особенностей исполнительные механизмы классифицируются на: электрические, пневматические, гидравлические, электропневматические, электрогидравлические, пневмогидравлические, мембранные, поршневые, мембранные гидравлические, поршневые гидравлические.

В зависимости от конструктивных особенностей регулирующих органов исполнительные устройства классифицируются на: заслоночные, односедельные, двухседельные, трехходовые, шланговые.

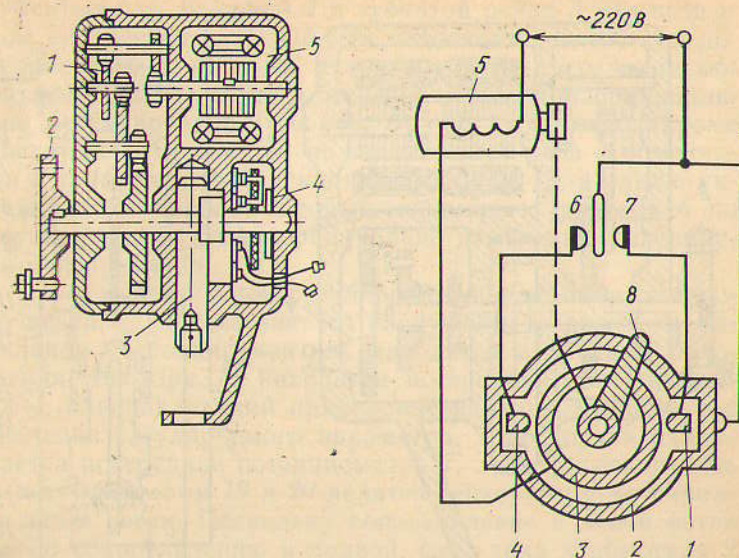
По характеру обратной связи исполнительные механизмы могут быть непрерывного (см., например, рис. 12, 13 и др.) или релейного действия.

Исполнительные механизмы в робототехнике отличаются более сложным устройством, так как должны обеспечивать перемещение рабочего органа в пространстве, для чего требуется несколько степеней свободы. В простейшем случае это может быть обеспечено применением (одновременным или последовательным) нескольких исполнительных механизмов с одной степенью свободы. Однако в этом случае масса и габариты промышленного робота (манипулятора) возрастают.

§ 22. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

К наиболее широко распространенным электрическим исполнительным механизмам относятся электродвигатель и соленоидный исполнительный механизм.

Двухпозиционный двигатель ДР (двухпозиционное регулирование) — это устройство (рис. 58), состоящее из однофазного асинхронного электродвигателя 5 и шестеренчатого редуктора 1, находящихся в общем литом кожухе. Выходной вал редуктора через шайбу 2 может обеспечить поворот регулирующего органа (например, секторной задвижки) на 180° , а через шток 3 кулачкового механизма можно одновременно осуществить возвратно-поступательное движение

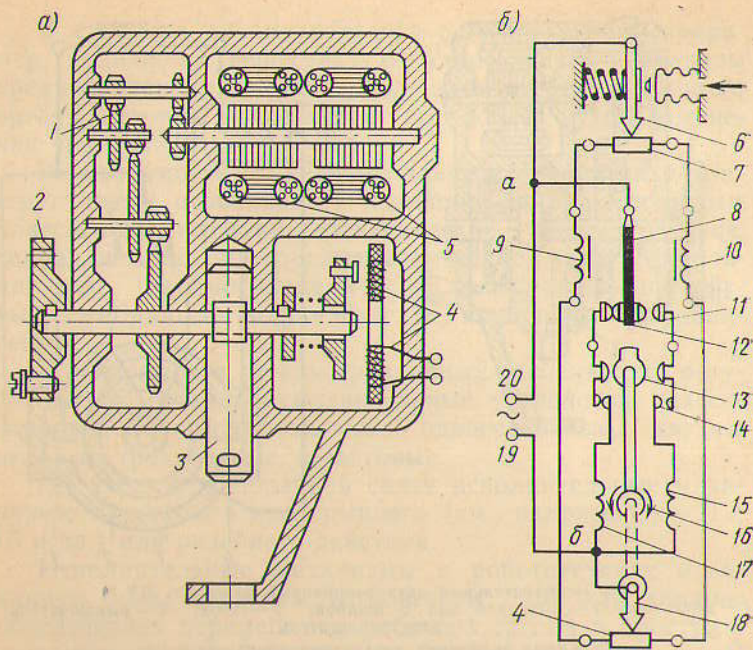


58. Исполнительный двухпозиционный двигатель ДР
1 — редуктор; 2 — выходной вал с шайбой; 3 — шток; 4 — выключатель;
5 — электродвигатель

59. Схема включения двухпозиционного двигателя
1, 4 — концевые выключатели; 2 — наружное контактное кольцо; 3 — внутреннее контактное кольцо; 5 — электродвигатель; 6, 7 — контакты; 8 — движок

другого рабочего органа. Частота вращения выходного вала зависит от сочетания шестерен в редукторе, которое выбирают при наладке системы. Выключатель 4, расположенный на конце выходного вала, позволяет осуществить двухпозиционное регулирование.

Схема включения двухпозиционного двигателя показана на рис. 59. Когда значение регулируемой величины находится в заданных пределах, контакты 6 и 7 управляющего прибора (например, реле) разомкнуты. Пока движок 8 замыкает внутреннее контактное кольцо 3, к которому подключена обмотка статора, и наружное контактное кольцо 2, двигатель и движок 8 вращаются (например, по часовой стрелке). Достигнув концевой выключателя 1, движок 8 соскакивает с наружного кольца и размыкает цепь. Двигатель останавливается. Изменение регулируемого параметра приводит к замыканию контакта 7. Двигатель включается, движок поворачивается и снова входит в контакт с наружным кольцом, но уже с нижней его половиной. Регулирующий орган пе-



60. Пропорциональный исполнительный механизм ПР
a — конструкция в разрезе; *б* — схема включения; 1 — зубчатые пары; 2 — муфта; 3 — зубчатая рейка; 4, 7 — потенциометры; 5 — двигатели левый и правый; 6, 18 — реохорды; 8 — якорь; 9, 10 — обмотки реле; 11, 12, 14 — контакты; 13 — кулачок концевой выключателя; 15, 17 — обмотки двигателей; 16 — ротор; 19, 20 — клеммы

ремещается, пока движок 8 не дойдет до другого концевой выключателя 4. Теперь включение двигателя произойдет только при замыкании контакта 6, т. е. когда регулируемый параметр достигнет своего нижнего предела. Таким образом, выходной вал делает по обороту и останавливается, а рабочий орган замыкает при этом то одно, то другое крайнее положение регулятора. Скорость выходного вала зависит от передаточного числа редуктора.

Исполнительный механизм с двигателем ПР (пропорциональное регулирование) по конструкции (рис. 60, *a*) близок к двигателю ДР. Возможность пропорционального регулирования достигается установкой на одном валу двух электродвигателей. Один из них вращает вал в одном направлении, другой — в противоположном. Исполнительный механизм состоит из

зубчатых пар 1, муфты 2 и зубчатой рейки 3. На выходном валу наряду с концевым выключателем имеется потенциометр 4, который используется для создания обратной связи в схеме, обеспечивающей пропорциональное регулирование (рис. 60, *б*). В этой схеме, кроме двигателя ПР, имеется поляризованное реле с обмотками 9 и 10, якорем 8 и контактами 11 и 12, а также управляющий прибор, который перемещает реохорд 6 по потенциометру 7 пропорционально изменению регулируемого параметра.

Пропорциональное регулирование, например, газового вентиля, осуществляется следующим образом. В начальном состоянии вентиль находится в среднем положении. Рехорд 18 находится посередине потенциометра 4, а управляющий прибор настраивают на заданное значение регулируемого параметра, и реохорд 6 оказывается посередине потенциометра 7. Электрическая цепь между клеммами 19 и 20 делится реохордом 6 на параллельные ветви. Поскольку сопротивление в левой ветви равно сопротивлению в правой, сила тока в обмотках 9 и 10 поляризованного реле одинакова. Якорь 8 реле при этом находится в нейтральном положении, а контакты 11 и 12 разомкнуты, и двигатель не работает.

При изменении регулируемого параметра реохорд 6 перемещается по потенциометру 7 (предположим, влево). Тогда сила тока в обмотке 9 возрастает, а в обмотке 10 уменьшается. Якорь реле замыкает левый контакт 12, и ток с узла потечет по обмотке 17 статора левого двигателя 5. Вращение ротора 16 двигателя будет изменять положение регулирующего органа и одновременно перемещать реохорд 18 потенциометра обратной связи вправо. Когда сопротивление в левой части потенциометра 4 увеличится настолько, что компенсирует уменьшение сопротивления в левой части потенциометра 7, токи в катушках 9 и 10 поляризованного реле снова станут одинаковыми, и якорь 8 реле, разомкнув контакт 12, займет нейтральное положение.

Двигатель остановится, но его выходной вал с муфтой 2 будет уже повернут на определенный угол и регулирующий орган займет новое положение, отклонившись от среднего пропорционально изменению регулируемой величины. При отклонении регулируемой величины в другую сторону реохорд переместится по потенциометру 7 вправо, обмотка 10 поляризованного реле

вызовет перемещение якоря 8 и контакт 11 замкнется. Двигатель будет вращаться в противоположном направлении. При повороте вала на угол, превышающий 180° , приводится в действие концевой выключатель с кулачком 13 и контактами 14, что вызовет остановку двигателя.

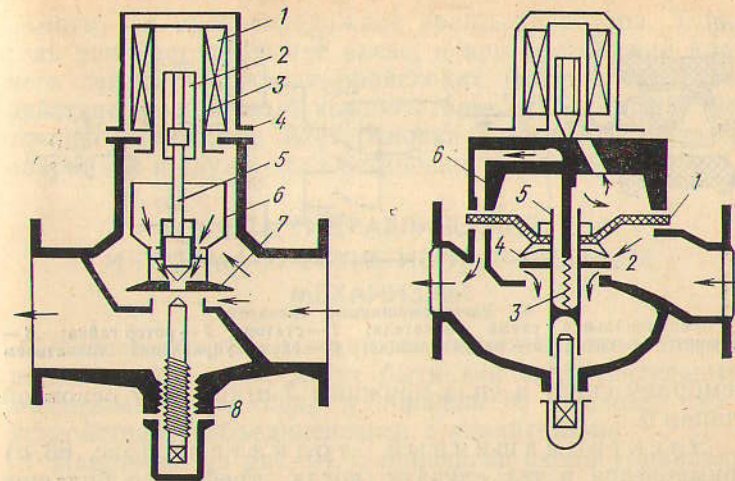
Выпускают также электромеханические сервомоторы для автоматического, дистанционного, а при необходимости и ручного управления. Они состоят из трехфазного асинхронного двигателя и одного или двух редукторов. Вал редуктора соединяется с регулирующим органом. Для управления этими сервомоторами применяют колонки дистанционного управления (КДУ), в которых смонтированы путевые и конечные выключатели, а также реостатный датчик, показывающий степень открытия регулирующего органа.

Соленоидные (электромагнитные) вентили (СВ) служат для преобразования электрического импульса в двухпозиционное перемещение клапана: при наличии напряжения в электромагнитной катушке клапан открыт, при отсутствии напряжения — закрыт.

Для открытия клапанов большого диаметра требуется сравнительно большое усилие. Чтобы уменьшить мощность (и, соответственно, габарит) электромагнита, в конструкции СВ имеется гидравлический усилитель.

По принципу действия различают поршневые и мембранные соленоидные вентили. На рис. 61 приведена схема поршневого соленоидного вентиля. При отсутствии тока управляющий клапан 5 перекрывает центральное отверстие в поршне-клапане 6. Поступающая жидкость через калиброванное отверстие в поршне-клапане 6 или по специальной канавке, имеющейся на его наружной поверхности, попадает в полость над поршнем 6. Давление жидкости и вес клапана обеспечивают его полное закрытие.

При появлении тока в катушке 1 сердечник 2 втягивается в катушку, поднимая при этом разгрузочный (управляющий) клапан 5. Жидкость из верхней полости поршня 6 стекает через центральное отверстие и давление ее падает. Под действием силы электромагнита и давления жидкости, поступающей снизу (поскольку площадь поршня больше площади перекрываемого отверстия), поршень перемещается вверх до полного открытия вентиля.



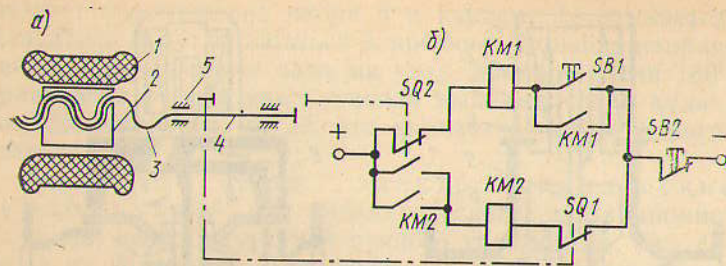
61 Поршневой соленоидный вентиль
1 — катушка; 2 — сердечник; 3 — трубка; 4 — гайка; 5 — управляющий клапан; 6 — поршень; 7 — основной клапан; 8 — винт

62 Мембранный соленоидный вентиль
1 — мембрана; 2 — щель; 3 — пружина; 4 — основной клапан; 5 — направляющая клапана; 6 — канал

Катушка 1 отделена от жидкостной полости трубкой 3 из немагнитного материала. Винт 8 служит для принудительного открытия клапана. Для лучшего уплотнения в основном клапане предусмотрена резиновая прокладка, которая прилегает к латунному седлу.

Центральное отверстие в поршне не должно быть намного больше калиброванного отверстия (или площади сечения продольной канавки), иначе клапан будет быстро закрываться и произойдет недопустимое повышение давления в трубопроводе до вентиля, что может вызвать гидравлический удар и разрыв трубопровода.

В мембранном соленоидном вентиле (рис. 62) камера над основным клапаном 4 отделена от напорной линии мембраной 1 из прорезиненной ткани. Поступающая жидкость, проходя через щель 2 и отверстие в направляющей клапана 5, заполняет полость над мембраной. Ее давление закрывает основной клапан 4. При включении катушки соленоида управляющий клапан поднимается, преодолевая силу пружины 3. При этом жидкость вытекает из полости над мембраной по каналу 6 и давление над ней падает. Тогда давление жидкости на



63. Электромашинный толкатель
 а — принципиальная схема толкателя; 1 — статор; 2 — ротор-гайка; 3 — ось-винт; 4 — шток; 5 — направляющие; б — схема управления толкателем

мембрану снизу и сила пружины 3 открывают основной клапан 4.

Электромашинный толкатель (рис. 63, а) применяется в тех случаях, когда требуются большие перемещения при значительном усилии. При включении трехфазной статорной обмотки в цепь ротор начинает вращаться; винт совершает поступательное движение в ту или иную сторону вместе с толкателем. Его скорость перемещения определяется так: $v = nt$ м/с (n — частота вращения ротора, c^{-1} ; t — шаг винта, м).

Усилие, развиваемое толкателем, определяется по формуле

$$P = K_{\Pi} M \eta / t,$$

где M — крутящий момент двигателя;

η — к. п. д. винт-гайки;

K_{Π} — коэффициент пропорциональности, учитывающий размерности M и t .

В тех случаях, когда требуется развивать очень большие усилия, на электромашинный толкатель устанавливают редуктор; при этом скорость перемещения толкателя естественно уменьшается.

Схема автоматического управления толкателем приведена на рис. 63, б. При нажатии оператором кнопки «пуск» $SB1$ срабатывает контактор $KM1$, который включает статор толкателя; начинается вращение ротора и выдвигание толкателя. Заняв крайнее правое положение, толкатель начинает механически воздействовать на конечный выключатель $SQ2$, который размыкает верхнюю цепь управления (обесточивается $KM1$, выдвигание толкателя прекращается) и включает контактор $KM2$. Последний, в свою очередь, включает статорную

обмотку на противоположное вращение ротора. Толкатель начинает движение влево, и при достижении крайнего левого положения происходит (механически) воздействие на конечный выключатель $SQ1$, который обесточивает контактор $KM2$. Кнопка «стоп» $SB2$ является аварийной и служит для остановки толкателя.

§ 23. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ И ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Исполнительные механизмы, использующие энергию жидкости или газа, могут быть как самостоятельными механизмами (цилиндр и поршень со штоком), так и устройствами, объединенными с усилителями.

Например, на рис. 64, а приведена схема управления силовым цилиндром с помощью золотника, а сам золотник приводится в действие диафрагменным элементом.

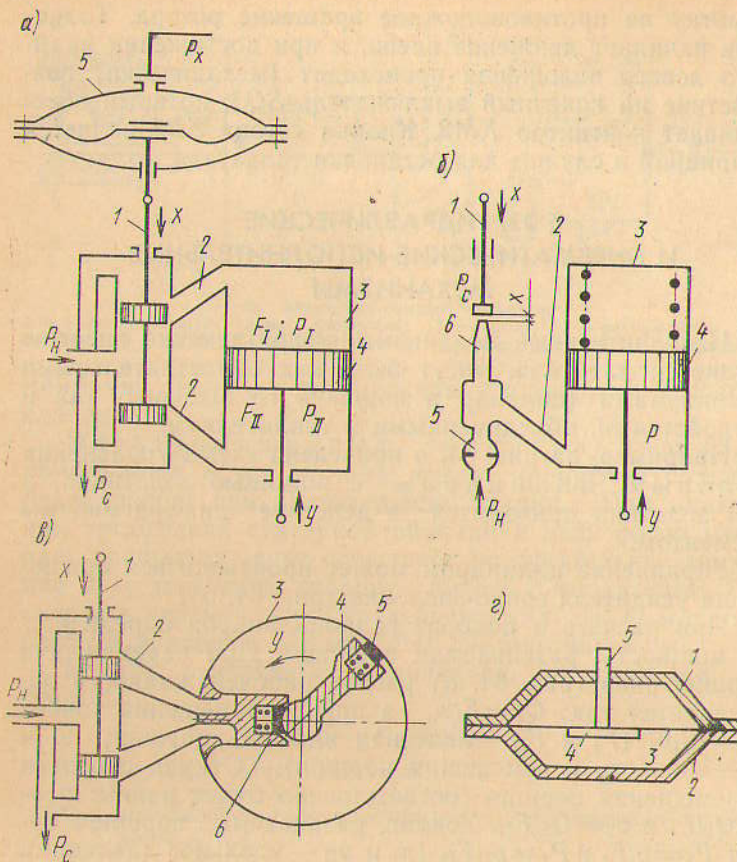
Управление цилиндром может производиться при помощи усилителя сопло-заслонка (рис. 64, б).

При расчете и подборе гидроцилиндров определяется мощность, развиваемая поршнем. При перемещении поршня вниз (рис. 64, а) расход рабочей жидкости определяется так: $Q_1 = F_1 v_1$, а при перемещении вверх $Q_2 = F_{\Pi} v_2$ (F_1 и F_{Π} — полезная площадь поршня; v_1 и v_2 — скорость перемещения поршня). Откуда скорости перемещения поршня соответственно будут равны: $v_1 = Q_1 / F_1$ и $v_2 = Q_2 / F_{\Pi}$. Усилия, развиваемые поршнем, будут $P_1 = p_1 F_1$ и $P_2 = p_{\Pi} F_{\Pi}$ (p_1 и p_{Π} — удельное давление в левой и правой частях цилиндра).

Зная усилие и скорость поршня, мощность такого привода можно определить как $N_1 = p_1 Q_1$ и $N_2 = p_{\Pi} Q_2$. Время хода поршня в одном направлении составит $t_1 = l / v_1$ и $t_2 = l / v_2$ (l — ход поршня).

Главное в автоматике гидропривода — регулирование скорости движения штока. Существуют два способа регулирования поступательного движения: регулирование производительностью насоса и дроссельное регулирование.

В пневматическом приводе источником энергии является сжатый воздух. По принципу действия и конструкции пневмоприводы можно разделить на поршневые и диафрагменные. Наиболее широкое применение получил

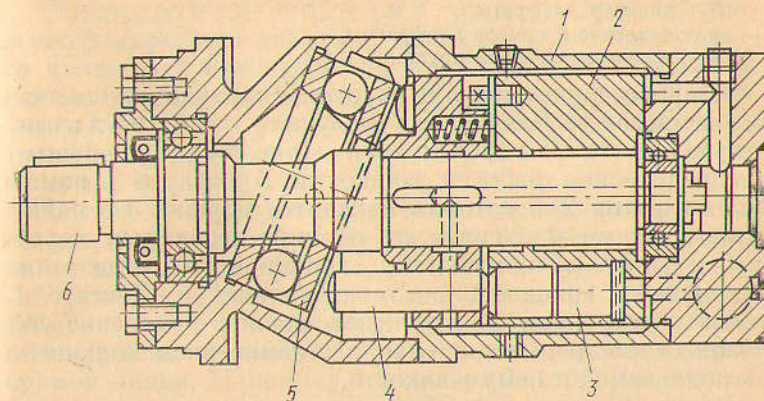


64. Гидравлические и пневматические исполнительные элементы с усилителями
 а — с золотниковым усилительным элементом: 1 — шток золотника; 2 — каналы; 3 — цилиндр; 4 — поршень; 5 — диафрагменный привод золотника; б — с усилительным элементом «сопло-заслонка»: 1 — шток заслонки; 2 — канал; 3 — цилиндр; 4 — поршень; 5 — дроссель постоянного сопротивления; 6 — дроссель переменного сопротивления; в — однолопастный поворотный двигатель: 1 — шток золотника; 2 — канал; 3 — корпус; 4 — лопасть; 5, 6 — уплотнители; г — диафрагменный исполнительный элемент: 1 — корпус; 2 — крышка; 3 — диафрагма; 4 — грибок; 5 — шток

поршневой пневмопривод (рис. 64, б). По конструкции он аналогичен гидроцилиндру.

Усилие на штоке поршня пневмоцилиндра определяется по формуле

$$P = Fp - (T + q),$$



65. Аксиально-поршневой двигатель
 1 — корпус; 2 — ротор; 3 — поршень; 4 — шток; 5 — подшипники; 6 — вал двигателя

где F — полезная площадь поршня;
 p — удельное давление сжатого воздуха;
 T — потери на трение в уплотнениях;
 q — усилие возвратной пружины (если она есть).

Однолопастный поворотный двигатель (рис. 64, в) служит для преобразования возвратно-ступательного движения штока золотника 1 (с входным сигналом X) в угловое выходное перемещение Y .

Крутящий момент на выходном валу M определяется так:

$$M = RF\Delta p/2,$$

где R — радиус цилиндра;
 F — рабочая площадь лопасти;
 Δp — перепад давления на лопасти.

В тех случаях, когда требуется незначительное перемещение штока при больших развиваемых усилиях, широко применяют диафрагменные исполнительные элементы (рис. 64, г), в которых воздух подается в верхнюю или нижнюю полости. В зависимости от величины давления диафрагма перемещает шток на определенную величину.

Усилие, развиваемое диафрагменным механизмом, может быть приближенно определено по формуле

$$P = K (\pi D^2/4) p - q,$$

где K — коэффициент активности диафрагмы (характеризует соотношение диаметров грибка и диафрагмы);

- D — диаметр диафрагмы;
 p — давление в камере диафрагмы;
 q — усилие возвратной пружины.

Широкое применение в качестве гидравлического исполнительного механизма получили аксиально-поршневые двигатели (рис. 65) с торцевым распределением рабочей жидкости. В корпусе 1 помещается ротор 2, в котором находятся поршни 3 с пальцами-штоками 4. Усилие от поршня передается через штоки упорному наклонному подшипнику 5, при этом развивается вращающий момент на валу 6. Двигатели такой конструкции обеспечивают плавное изменение угловой скорости выходного вала с изменением количества подаваемой к нему жидкости.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под исполнительным устройством?
2. По каким признакам классифицируются исполнительные устройства?
3. Назовите электрические исполнительные механизмы.
4. Как работает электромашинный толкатель?
5. Дайте классификацию пневматических и гидравлических исполнительных механизмов.
6. Каков принцип работы аксиально-поршневого двигателя?

ГЛАВА VI СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИКИ И ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

§ 24. ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ОБЪЕКТАХ УПРАВЛЕНИЯ

В § 1 была дана полная классификация систем автоматического контроля, управления и регулирования. Теперь более подробно рассмотрим ее отдельные составляющие.

Непрерывная автоматическая система состоит только из звеньев непрерывного действия, т. е. таких, у которых выходная величина изменяется плавно при плавном изменении входной величины.

Дискретная система содержит хотя бы одно звено дискретного действия, выходная величина которого изменяется скачкообразно (дискретно) при плавном изменении входной величины. В качестве примеров таких систем можно привести системы, содержащие реле (релейные системы) или импульсные элементы (импульсные системы).

В свою очередь, все автоматические системы, как бы они ни подразделялись по другим признакам, бывают линейными и нелинейными.

Чаще всего статические характеристики отдельных элементов системы автоматического управления нелинейные, т. е. не изображаются в виде одного отрезка прямой линии. Например, характеристикой чувствительного элемента в регуляторе ДВС (см. рис. 12) является приведенная на рис. 66 характеристика зависимости перемещения Z муфты регулятора от скорости вращения ω . Эта характеристика, показанная на рисунке жирной линией, нелинейна. Пусть основной рабочей точкой характеристики является точка A . Если при использовании данной характеристики для анализа поведения системы в целом будет достаточно рассмотреть лишь малые отклонения скорости вращения ω от ее номинального значения ω_d , то можно заменить в окрестности точки A кривую $Z=f(\omega)$ касательной к ней в этой точке. Это называется линеаризацией нелинейной характеристики. Теоретически кривая может быть заменена отрезком касательной только при бесконечно малом удалении от точки, через которую она проведена. Однако практически чаще всего, не допуская значительных погрешностей, можно считать малыми и достаточно большими отклонения. Например, показанная на рис. 66 кривая практически может быть заменена отрезком касательной на всем участке от точки B до точки C , когда величина изменяется от ω_B до ω_C .

Линейными системами называются такие, в которых все элементы имеют либо линейные характеристики, либо нелинейные, но линеаризуемые вышеуказанным способом.

Нелинейной системой называют такую, в которой хотя бы для одного ее элемента линеаризация не представляется возможной. В этих случаях прибегают к приближенным методам исследования нелинейных систем с учетом их нелинейностей или к частным точным