# ЭЛЕМЕНТЫ СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
„СУДОСТРОЕНИЕ"
ЛЕНИНГРАД
1976

АВТОРЫ КНИГИ

Р. А. НЕЛЕПИН,

О. П. ДЕМЧЕНКО,

В. И. АГЕЕВ,

А. А. БАТОВРИН,

П. Д. ВЕРХОПЯТНИЦКИЙ,

В. Г. ВЛАДИМИРОВ,

О. В. ГОЛУБЕВ,

Ф. В. ГУЛЯЕВ,

Б. А. ДЕГТЯРЕВ,

Ю. И. КОЛКУНОВ,

И. И. ТУРКИН,

Р. Э. ФРАНЦЕВ,

Е. И. ХЛЫПАЛО,

В. И. ЧЕРНЕЦКИЙ

# ЭЛЕМЕНТЫ СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ

СПРАВОЧНИК

Под редакцией
доктора технических наук
профессора
Р. А. НЕЛЕПИНА

6Т4.1
Э45
УДК 629.12—52 (03)

Рецензент П. В. Куропаткин

Э $\frac{31805—061}{048\,(01)—76}$ 57—75

© Издательство «Судостроение», 1976 г.

# ПРЕДИСЛОВИЕ

*В справочнике приведены основные сведения о принципах действия и устройства, характеристиках и параметрах элементов автоматики, применяемых в автоматических системах морских судов. Наряду с соответствующими элементами рассмотрены основанные на них типичные устройства — измерительные приборы, автоматические регуляторы и т. п.*

*Материал располагается следующим образом. В гл. I приведены общие сведения об элементах автоматических систем. В гл. II рассмотрены чувствительные элементы и измерительные приборы. Гл. III—V посвящены последовательному рассмотрению гидравлических, пневматических и электрических элементов и устройств судовой автоматики. В гл. VI описаны электронные приборы, в гл. VII — интегральные микросхемы.*

*Во всех главах приведены основные характеристики приборов, выпускаемых отечественной промышленностью, закрепленные ГОСТами или техническими условиями. Эти данные дают конкретное представление о тех или иных приборах, но ввиду ограниченного объема книги не претендуют на полноту.*

*Распределение материала книги между авторами следующее: § 1, 2, 5—16 написал Р. А. Нелепин, § 3, 24 — Р. Э. Францев, § 4 — Б. А. Дегтярев, § 17—20 — В. И. Чернецкий, § 21 — А. А. Батоврин и Е. И. Хлыпало, § 22 — И. И. Туркин, § 23 — Ф. В. Гуляев и О. П. Демченко, § 25 — В. Г. Владимиров и Ю. И. Колкунов, § 26 — В. И. Агеев, § 27—31 — О. В. Голубев, § 33—36 — П. Д. Верхопятницкий.*

*В написании § 4 принимал участие В. В. Кобзев, в написании § 20 — Б. А. Попов, § 32 написал К. А. Бургардт.*

*Авторы надеются, что справочник окажется полезным для инженерно-технических работников при изучении, проектировании и исследовании судовой автоматики.*

*Критические замечания и пожелания по содержанию книги просим направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Гоголя, 8, издательство «Судостроение».*

ГЛАВА I

# ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

## § 1. НАЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

*Автоматика* есть отрасль науки и техники, охватывающая средства и методы, позволяющие в какой-либо мере освобождать человека от выполнения операций управления производственными процессами. На морских судах применяются различные виды автоматики: автоматические контроль и сигнализация, автоматизированное дистанционное управление, автоматические управление и регулирование, автоматическая защита и др.

*Устройства автоматического контроля* освобождают человека от непосредственного наблюдения за ходом производственного процесса. *Устройства автоматической сигнализации* предупреждают оператора о предельных значениях параметров.

Функциональная структурная схема устройства контроля и сигнализации обычно имеет вид, показанный на рис. 1.1, *а*.

*Чувствительный элемент* реагирует на изменения контролируемого параметра и преобразует эти изменения в сигнал, пригодный для дальнейшего использования. Например, чувствительный элемент температуры приходит в тепловое равновесие с объектом контроля и благодаря этому реагирует на колебания его температуры. Выходным сигналом этого элемента может быть изменение высоты ртутного столбика (у простейшего ртутного термометра), электрический сигнал (у термопары) и т. п. Чувствительный элемент давления реагирует на изменения давлений среды — жидкости, пара или газа. Например, мембрана прогибается под действием давления, выходным сигналом в данном случае служит перемещение штока мембраны. Важнейшие требования к чувствительным элементам состоят в следующем: 1) выходной сигнал должен однозначно и по возможности линейно зависеть от контролируемого параметра; 2) зависимость выходного сигнала от контролируемого пара-

метра должна сохраняться стабильной при любых изменениях условий работы элемента. Чувствительные элементы удобно классифицировать по роду физической величины, для измерения которой они предназначены. С этой точки зрения различают чувствительные элементы, предназначенные для измерения температуры, давления, расхода, уровня, частоты вращения и т. п. (см. гл. II).

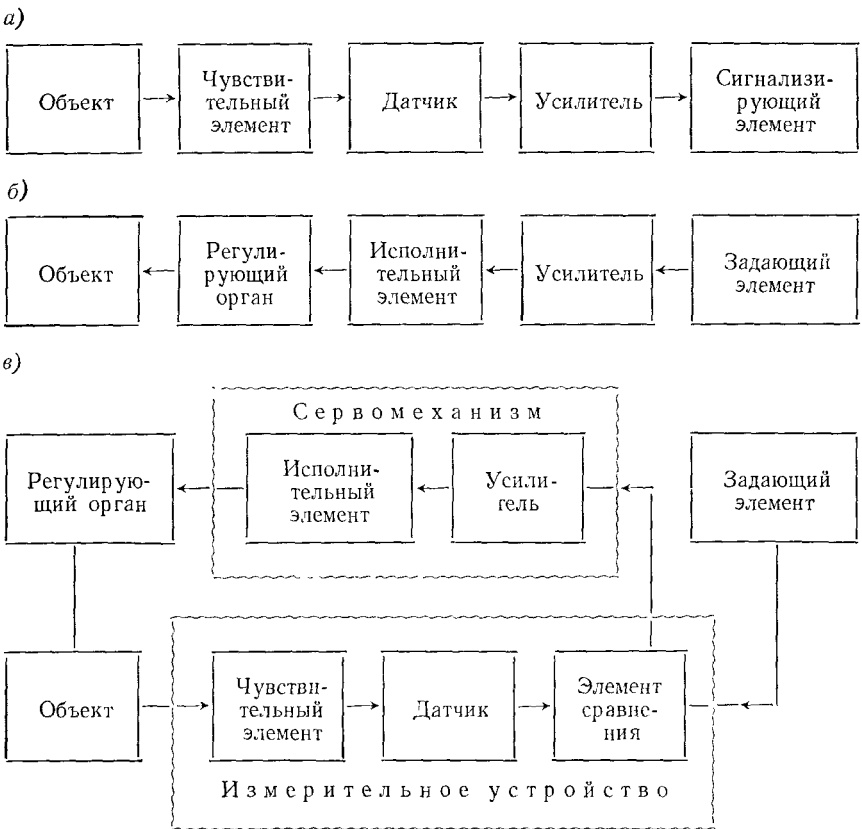



Рис. 1.1. Функциональные структурные схемы: *а* — системы контроля и сигнализации; *б* — системы дистанционного управления; *в* — системы автоматического управления и регулирования.

Иногда сигнал, снимаемый с чувствительного элемента, неудобен для дальнейшего использования. В таком случае применяют *датчик*—элемент, преобразующий изменения неэлектрической величины в электрическую величину, наиболее удобную для дистанционной передачи и последующего усиления (напряжение, ток, индуктивность и др.). Например, шток мембраны, служащей чувствительным элементом давления, можно связать с движком, скользящим по сопротивлению, включенному в электрическую цепь. Переменное электрическое сопротивление (потенциометр) в этом случае будет играть роль датчика, преобразующего механическое перемещение в электрический сигнал — изменение сопротивления (см. § 21).

Выходной сигнал чувствительного элемента (или датчика) нередко имеет слишком малую величину, недостаточную для использования в последующих

устройствах. В таком случае применяется *усилительный элемент*, или усилитель, назначение которого — воспроизведение поступающего на его вход сигнала в увеличенном масштабе. Для этой цели к усилительному элементу подводится вспомогательная энергия. По виду этой энергии различают *электрические*, *электронные*, *пневматические* и *гидравлические усилители* (см. гл. III—V). Слабый по мощности сигнал $x_{\text{вх}}$, подаваемый на усилитель, управляет поступлением энергии от вспомогательного источника. В результате на выходе усилителя образуется мощный сигнал $x_{\text{вых}}$, пропорциональный входному сигналу. Коэффициент пропорциональности $\kappa = x_{\text{вых}}/x_{\text{вх}}$ называется *коэффициентом усиления*. Например, в электронном усилителе, которым может служить обычная трехэлектродная лампа, изменение небольшого по величине напряжения на сетке вызывает подобное изменение значительного по величине анодного тока, идущего от специального источника, а следовательно, и пропорционального анодному току напряжения на нагрузке. В результате напряжение на нагрузке копирует в увеличенном масштабе изменения входного сигнала—напряжения на сетке. Важнейшие требования к усилителям: достаточно большая величина коэффициента усиления, стабильность характеристики $x_{\text{вых}} = f(x_{\text{вх}})$ в рабочем диапазоне значений входного сигнала при различных условиях работы элемента.

Выходными элементами в системах контроля и сигнализации служат *сигнализирующие* и *регистрирующие элементы* (шкалы, счетчики, самописцы, ревуны и т. п.).

*Системы автоматизированного дистанционного управления* позволяют осуществлять относительно сложные операции по управлению каким-либо объектом (турбиной, дизелем и т. п.) путем простых воздействий на входные устройства. Например, управление сложным пораспределением паровых турбин может осуществляться поворотом одного маховика управления.

Простейшая система дистанционного управления является разомкнутой, т. е. ее функциональная схема (рис. 1.1, *б*) содержит лишь одну цепочку звеньев, без замкнутых цепей.

Для введения в систему сигнала, пропорционального требуемому значению управляемого параметра, служит *задающий элемент*. В качестве задающих элементов используются рукоятки, маховики, кнопки и т. п.

Сравнительно слабый сигнал, возникающий от воздействия оператора на задающий элемент, усиливается по мощности в усилителе и в усиленном виде поступает на вход *исполнительного элемента*, служащего для непосредственного управления регулирующим органом. В качестве исполнительных элементов обычно применяют различные двигатели. В зависимости от вида используемой ими энергии различают *электрические*, *пневматические* и *гидравлические исполнительные элементы* (см. гл. III—V). Исполнительные элементы должны обладать быстродействием, малой инерционностью, высокой приемистостью.

*Регулирующий орган* (клапан, задвижка, реостат и др.) предназначен для управления подводом энергии или среды в агрегат или механизм с целью изменения какого-либо параметра или поддержания его на заданном уровне.

Наиболее полно автоматизацию функций управления позволяют выполнить *системы автоматического регулирования и управления*, осуществляющие автоматическое поддержание на заданном уровне или изменение по требуемому закону параметров, характеризующих данный технический процесс. Если цель состоит в поддержании заданного значения какого-либо параметра, то говорят об автоматическом регулировании. Если задача заключается в целенаправленном изменении параметра, то говорят об автоматическом управлении.

Системы автоматического регулирования и управления, как правило, являются замкнутыми — они образуются от соединения цепи управления с цепью контроля (рис. 1.1, *в*)

Составной частью системы является *объект автоматического управления* (*регулирования*), в качестве которого может служить любой агрегат или механизм — котел, дизель, электрогенератор и т. п. Любой параметр объекта, которым требуется управлять или значение которого необходимо регулировать, называется *управляемой* (*регулируемой*) *величиной*.

В *элементе сравнения* сопоставляются сигналы, поступающие от чувствительного и задающего элементов, в результате чего образуется разность этих

сигналов, называемая *сигналом ошибки, или рассогласованием*. Сигнал ошибки того или иного знака усиливается в усилителе и поступает на исполнительный элемент, вызывая его перемещение в соответствующую сторону. Пока сигнал ошибки отличен от нуля, исполнительный элемент воздействует на объект. Когда сигнал ошибки станет равным нулю, исполнительный двигатель остановится. Таким путем обеспечивается автоматическое поддержание значения управляемой величины.

Чувствительный элемент, датчик и элемент сравнения составляют *измерительный орган*, а исполнительный и усилительный элементы — *сервомеханизм*. Сервомеханизм, измерительный и регулирующий органы образуют *автоматическое управляющее устройство (автоматический регулятор)*.

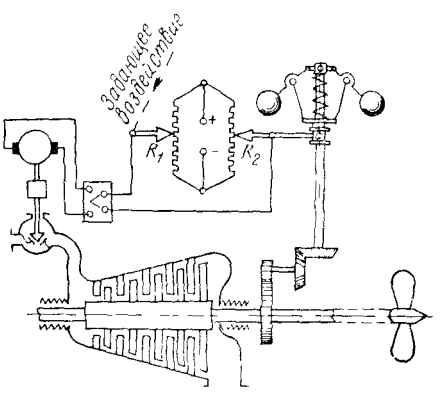



Рис. 1.2. Принципиальная схема системы автоматического управления частотой вращения паровой турбины.

Пример замкнутой системы автоматического управления изображен на рис. 1.2. Задача системы — поддерживать задаваемую частоту вращения паровой турбины, являющейся объектом управления. Чувствительным элементом служит центробежный маятник, реагирующий на изменения частоты вращения, элементом сравнения — электрический мост с сопротивлениями $R_1$ и $R_2$, исполнительным элементом — электродвигатель, питаемый от диагонали моста через усилитель и управляющий через редуктор регулирующим органом — паровпускным клапаном. Если задающая стрелка и стрелка, связанная с чувствительным элементом, расположены напротив друг друга, мост находится в равновесии и ток от него к усилителю не идет, т. е. сигнал рассогласования равен нулю. При перемещении задающей стрелки равновесие моста нарушается, электродвигатель включается и воздействует на паровпускной клапан до тех пор, пока частота вращения не станет равной заданной.

Подача энергии в объект в замкнутой системе автоматического регулирования дозируется в зависимости от знака и величины сигнала ошибки. Аналогичная идея часто используется вторично в сервомеханизме; с этой целью с помощью *дополнительной обратной связи* образуется еще одна замкнутая цепь (см. рис. 15.1, *б—г*), позволяющая на входе в усилитель сравнивать поступающее значение сигнала ошибки с фактической отработкой этого сигнала исполнительным двигателем и в зависимости от имеющейся разности дозировать поступление энергии от вспомогательного источника к исполнительному двигателю. Такое устройство позволяет исключить излишние резкие перемещения исполнительного двигателя и тем самым улучшить динамические качества системы в целом.

Дополнительная обратная связь служит примером *корректирующего элемента* системы управления, предназначенного для улучшения (коррекции) ее динамических или статических свойств; виды корректирующих элементов многообразны — это различные обратные связи, дифференцирующие, интегрирующие элементы и т. п.

*Устройства автоматической защиты*, служащие для автоматического исключения аварий агрегатов или механизмов, имеют структурную схему, аналогичную изображенной на рис. 1.1, *в*. Однако в этих системах сигнал рассогласования возникает лишь в том случае, если текущее значение регулируемой величины достигло установленного предельно допустимого значения, после чего исполнительный элемент резко срабатывает, переводя объект на уменьшенный режим работы или останавливая его совсем.

Структурную схему, изображенную на рис. 1.1, *в*, имеют сравнительно простые автоматические системы, предназначенные для автоматического упра-

вления конкретным параметром какого-либо объекта. Это — локальные системы (системы стабилизации, программные системы, следящие системы. Для сбора и обработки информации о работе судовых технических средств и коррекции режимов работы локальных систем применяются групповые системы автоматизации, к которым можно отнести системы централизованного контроля энергетической установки, системы автоматизированного управления главными двигателями и судовыми электростанциями, системы централизованного контроля и управления общесудовыми механизмами и т. п.

В состав этих систем кроме названных выше элементов и устройств могут входить *вычислительные устройства*, выполняющие вычислительные операции, необходимые для осуществления процесса управления. Вычислительные устройства могут быть цифровыми или аналоговыми. Цифровые вычислительные устройства содержат процессоры, или сумматоры, и элементы, предназначенные для передачи, записи, хранения и считывания информации.

Во многих системах находят применение *преобразующие элементы*, служащие для преобразования сигналов одной природы в сигналы другой природы (электрических в пневматические, непрерывных в дискретные и обратно), к которым относятся датчики, различные модуляторы, демодуляторы и т. п.

Каждая система, как правило, содержит *элементы настройки*, позволяющие изменять и настраивать режимы ее работы.

Составными частями автоматических систем являются источники питания энергией, линии передачи информационных сигналов и силовых воздействий, щиты с приборами контроля.

По принципу функционирования во времени различают *непрерывные* и *дискретные* автоматические системы. Непрерывные системы (системы автоматического регулирования, следящие системы и др.) служат для управления непрерывными технологическими процессами и поэтому функционируют во времени непрерывно. Дискретные системы (системы автоматического пуска, реверса и остановки механизмов и т. п.) вступают в работу лишь при определенной ситуации и функционируют на конечном интервале времени. В зависимости от исходных данных дискретные системы (конечные автоматы) выполняют ту или иную последовательность действий; для их построения широко используются *логические элементы*, техническим средством реализации которых являются интегральные микросхемы (см. § 3 и гл. VII).

В сложных автоматических системах из отдельных элементов, как из комплектующих изделий (например, транзисторов, диодов, резисторов), образуются *функциональные узлы* — схемы, выполняющие одну или несколько операций. Примерами функциональных узлов являются схемы, осуществляющие суммирование, модуляцию сигнала или отдельную логическую операцию. Из функциональных узлов составляются *функциональные блоки*, имеющие законченное конструктивное оформление и определенное функциональное назначение. Примерами функциональных блоков могут служить измерительное устройство, электронный усилитель, блок памяти и т. п. Из функциональных блоков комплектуются разнообразные автоматические устройства и системы (например, устройство обегающего контроля, система программного управления и др.).

Для повышения качества и надежности автоматических систем и снижения их стоимости важной задачей является *унификация* элементной базы судовой автоматики; она заключается в стандартизации элементов и разработке на их основе типовых серийных функциональных узлов и блоков, имеющих взаимно согласованные входные и выходные параметры и пригодных для построения различных систем.

Основные сведения по унифицированным элементам и блокам приводятся в данной книге в виде таблиц.

## § 2. ЭЛЕМЕНТЫ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ

Основная функция всякого элемента автоматической системы состоит, как правило, в преобразовании некоторого входного сигнала в определенный выходной сигнал. Входной сигнал, приложенный к элементу (входная координата),

является внешним воздействием. Выходной сигнал — это реакция элемента на данное воздействие или, иначе, его собственная координата.

Каждый элемент, как и система в целом, может работать в одном из двух режимов — статическом или динамическом. *Статическим режимом* называется такой, при котором параметры, характеризующие состояние элемента, неизменны во времени. В *динамическом режиме* эти параметры изменяются во времени.

Статические свойства элементов характеризует его статическая характеристика, называемая также просто характеристикой элемента и представляющая зависимость выходной координаты от входной в ряде равновесных статических

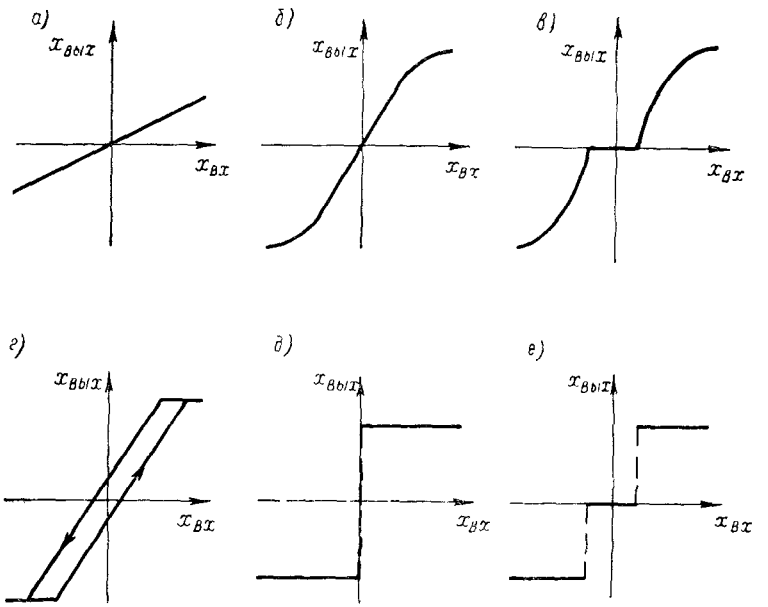



Рис. 2.1. Статические характеристики элементов: *а* — линейная; *б* — с насыщением; *в* — с мертвой зоной и насыщением; *г* — с гистерезисом и насыщением; *д* — релейная двухпозиционная; *е* — релейная трехпозиционная.

режимов, $x_{вых} = f(x_{вх})$. Эта характеристика чаще является нелинейной, но в отдельных случаях бывает достаточно близка к линейной (рис. 2.1, *а*).

Нелинейная характеристика усилительных и исполнительных элементов типа *насыщения* (рис. 2.1, *б*) является следствием ограниченной мощности любого реального устройства, ввиду чего выходной сигнал не может возрастать беспредельно. Такую характеристику имеют электромашинные усилители, многие гидравлические и пневматические усилители (см. гл. III, IV).

Характеристика с *мертвой зоной* (рис. 2.1, *в*) возникает, когда имеется порог чувствительности (например, ввиду действия сил сухого трения); если изменения входной координаты не достигают этого порога, выходная координата не изменяется. Мертвую зону имеют характеристики тахогенератора, гидравлического поршневого двигателя и других элементов.

*Гистерезисная петля* на характеристике (рис. 2.1, *г*) возникает из-за магнитного гистерезиса, при наличии зазоров (люфтов) в механических сочленениях и т. п. Так, график, изображающий зависимость угла поворота ведомой шестерни $x_{вых}$ от угла поворота ведущей шестерни $x_{вх}$ имеет гистерезисную петлю, ибо при изменении направления вращения шестерен должен быть выбран зазор между ними; процессу выбора зазора соответствует переход с одной ветви

петли на другую. Характеристики с гистерезисной петлей неоднозначны: при одном и том же значении входной координаты выходная координата может иметь различные значения. Положение точки на характеристике с гистерезисной петлей определяется не только значением входной координаты, но и предысторией состояния элемента, т. е. тем путем, которым элемент пришел в данное состояние.

Электромеханические реле и другие переключающие устройства имеют *релейные характеристики* (рис. 2.1, *д*, *е*), у которых в каждом интервале изменения входной координаты выходная координата принимает некоторое постоянное значение, причем переход от одного *постоянного значения к другому происходит скачкообразно при определенном значении входной координаты.*

К характеристикам разных элементов предъявляются различные требования. Для чувствительных элементов, как отмечалось, желательно, чтобы характеристика была близка к линейной — это позволяет получить равномерную шкалу измерительного прибора. Для усилительных элементов характеристика должна быть возможно крутой, чтобы коэффициент усиления был достаточно большим. Мертвые зоны и гистерезисные петли на характеристиках обычно нежелательны, так как вызывают искажения в передаче сигналов и ухудшают статические и динамические качества системы, в состав которой входят имеющие их элементы. Во всех случаях характеристики должны быть *стабильными при изменении условий работы элемента.*

Изменение координат системы во времени в динамическом режиме обычно описывается решением дифференциального *уравнения движения* элемента. Так, если чувствительным элементом *служит центробежный маятник (см. рис.* 1.2), то уравнение движения муфты маятника (ее смещение вверх или вниз) в соответствии с основным законом механики может быть записано в виде

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = \sum F, \qquad (2.1)$$

где $m$ — масса подвижных частей маятника, приведенная к муфте; $\Sigma F$ — сумма сил, действующих на муфту. Примем за положительное направление перемещения муфты $x$ ее движение вниз. Это движение происходит под действием силы натяжения сжатой пружины $F_п = F_{0п} - кx$, перемещающей муфту вниз, и противодействующей ей центробежной силы $F_ц = Cn^2r$, стремящейся переместить муфту вверх. Здесь обозначено: $n$ — измеряемая частота вращения; $r$ — расстояние центра груза от оси вращения, зависящее от положения муфты, $r = r(x)$; $C$ — коэффициент пропорциональности; $F_{0п}$ — предварительное натяжение пружины; $к$ — жесткость пружины. Кроме того, следует учесть силу веса муфты $F_G$ и силу *сопротивления — жидкое трение* $F_ж = K\frac{dx}{dt}$, пропорциональное скорости (сухим трением пренебрегаем). Подставив выражения названных сил в уравнение (2.1), получим

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -Cn^2r(x) - F_{0п} - kx - K\frac{dx}{dt} - F_G. \qquad (2.2)$$

Задаваясь изменением входной координаты $n(t)$ и начальными условиями, из уравнения (2.2) можно определить выходную координату в функции времени, $x(t)$.

Пусть $n$ изменилась скачком от значения $n_1$ до значения $n_2$ (рис. 2.2). Тогда центробежная сила сожмет пружину и муфта поднимется из положения $x_1$ в некоторое положение $x_2$. Перемещение муфты может произойти с одним или несколькими колебаниями либо монотонно — оно определяется как решение $x(t)$ уравнения (2.2) и зависит от вида уравнения и численных значений его коэффициентов.

Аналогично, в соответствии с законами механики, электротехники, теплотехники и т. п., составляются уравнения движения других элементов. При этом под «движением» понимается не только механическое перемещение, но всякое изменение координаты во времени (например, изменение силы тока или напряжения в электрической сети).

Процесс перехода элемента во времени из неуравновешенного состояния в уравновешенное под действием внутренних сил называется *переходным процессом*. Переходный процесс возникает, если элемент выведен из состояния равновесия внешним воздействием и характеризуется такими параметрами, как величина отклонения координаты и длительность затухания. Как правило, чем меньше величины этих параметров, тем меньшие искажения вносит элемент в требуемое динамическое поведение системы, в состав которой он включен.

Уравнения движения элементов автоматических систем обычно нелинейны, т. е. содержат нелинейные функции от искомой координаты $x$ или ее производных. Ввиду трудности решения нелинейных уравнений их часто линеаризуют, рассматривая малые колебания в окрестности данного статического режима. Разлагая выражение центробежной силы $F_{\text{ц}} = F_{\text{ц}}(n,x)$ в уравнении (2.2) в ряд Тейлора в окрестности точки $n_0$, $x_0$ по степеням $\Delta n = n - n_0$, $\Delta x = x - x_0$, получаем

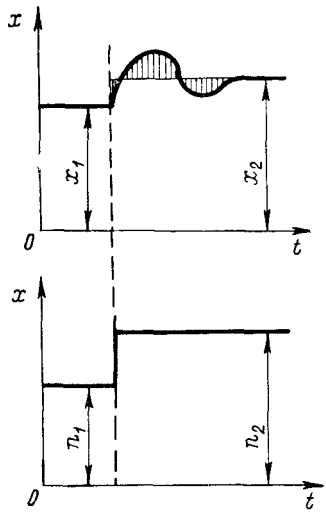



Рис. 2.2. Изменение координаты элемента во времени при скачкообразном воздействии (график переходного процесса).

$$F_{\text{ц}}(n_0 + \Delta n,\ x_0 + \Delta x) = F_{\text{ц}}(n_0,\ x_0) + \left(\frac{\partial F_{\text{ц}}}{\partial n}\right)_{\substack{n_0\\x_0}} \Delta n + \left(\frac{\partial F_{\text{ц}}}{\partial x}\right)_{\substack{n_0\\x_0}} \Delta x + R(\Delta n,\ \Delta x),$$

где $R(\Delta n, \Delta x)$ — нелинейные члены ряда; $F_{\text{ц}}(n_0, x_0) = Cn_0^2 r_0$. При достаточно малых $\Delta n$ и $\Delta x$ величина $R(\Delta n, \Delta x)$ будет малой порядка высшего, чем $\sqrt{\Delta n^2 + \Delta x^2}$ (и чем $\Delta n$ и $\Delta x$). Отбрасывая нелинейные члены ряда, из (2.2) получаем

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -\left[C\omega_0^2 r + \left(\frac{\partial F_{\text{ц}}}{\partial n}\right)_{\substack{n_0\\x_0}} \Delta n + \left(\frac{\partial F_{\text{ц}}}{\partial x}\right)_{\substack{n_0\\x_0}} \Delta x\right] + F_{0\text{п}} - kx - K\frac{\partial x}{dt} + F_G.$$

В состоянии равновесия муфты центробежная сила уравновешивается натяжением пружины и силой веса:

$$0 = -C\omega_0^2 r_0 + F_{0\text{п}} - kx_0 + F_G.$$

Вычитая последнее уравнение из предыдущего и учитывая, что $dx/dt = d\Delta x/dt$, получаем линеаризованное уравнение в приращениях

$$a_0\frac{d^2\Delta x}{dt^2} + a_1\frac{d\Delta x}{dt} + a_2\Delta x = b_0\Delta n, \qquad (2\ 3)$$

где постоянные коэффициенты

$$a_0 = m,\quad a_1 = K,\quad a_2 = k + \left(\frac{\partial F_{\text{ц}}}{\partial x}\right)_{\substack{n_0\\x_0}},\qquad b_0 = -\left(\frac{\partial F_{\text{ц}}}{\partial n}\right)_{\substack{n_0\\x_0}}.$$

В более общем случае линейное (или линеаризованное) уравнение какого-либо элемента будет иметь вид

$$a_0 \frac{d^n x_{\text{вых}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x_{\text{вых}}}{dt^{n-1}} + \cdots + a_n x_{\text{вых}} =$$

$$= b_0 \frac{d^{m-1} x_{\text{вх}}}{dt^{m-1}} + b_1 \frac{d^{m-2} x_{\text{вх}}}{dt^{m-2}} + \cdots + b_m x_{\text{вх}}, \qquad (2.4)$$

где $x_{\text{вых}}$, $x_{\text{вх}}$ — выходная и входная координаты.

Если элемент имеет линейную математическую модель, т. е. имеет линейную статическую характеристику и описывается линейным дифференциальным уравнением, то его называют *линейным*, в противном случае — *нелинейным*.

Пусть при $t = 0$ координаты $x_{\text{вх}}$, $x_{\text{вых}}$ и все их производные равны нулю. Обозначим через $X_{\text{вх}}(s)$, $X_{\text{вых}}(s)$ преобразования по Лапласу соответственно от $x_{\text{вх}}(t)$, $x_{\text{вых}}(t)$:

$$X_{\text{вх}}(s) = \int_0^\infty e^{-st} x_{\text{вх}}(t)\, dt, \quad X_{\text{вых}}(s) = \int_0^\infty e^{-st} x_{\text{вых}}(t)\, dt, \qquad (2.5)$$

где $s = c + j\omega$ — комплексная переменная. Тогда при оговоренных нулевых начальных условиях преобразование по Лапласу от производной $dx_{\text{вх}}/dt$ равно $sX_{\text{вх}}(s)$, преобразование от второй производной $d^2x_{\text{вх}}/dt^2$ равно $s^2X_{\text{вх}}(s)$ и т. д., аналогично преобразование по Лапласу от $dx_{\text{вых}}/dt$ равно $sX_{\text{вых}}(s)$ и т. д. Следовательно, из (2.4) получим

$$(a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_n) X_{\text{вых}}(s) = (b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_m) X_{\text{вх}}(s),$$

откуда

$$\frac{X_{\text{вых}}(s)}{X_{\text{вх}}(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_n} = W(s). \qquad (2.6)$$

Отношение $W(s)$ преобразования Лапласа выходной координаты к преобразованию Лапласа входной координаты при нулевых начальных условиях называют *передаточной функцией элемента*. Передаточные функции наравне с дифференциальными уравнениями служат для описания динамических свойств линейных элементов и могут быть использованы для определения $x_{\text{вых}}(t)$, если известна функция $x_{\text{вх}}(t)$. Для этого следует выполнить алгебраические преобразования согласно (2.6)

$$X_{\text{вых}}(s) = W(s) X_{\text{вх}}(s),$$

после чего воспользоваться формулой обращения преобразования Лапласа

$$x_{\text{вых}}(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} X_{\text{вых}}(s)\, e^{st}\, ds \qquad (2.7)$$

или просто таблицей соответствий между функциями-оригиналами и их изображениями по Лапласу.

Выражение передаточной функции элемента можно получить следующим образом. Применив оператор дифференцирования $p = d/dt$, из (2.4) получим

$$(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \cdots + a_n) x_{\text{вых}} = (b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \cdots + b_m) x_{\text{вх}}. \qquad (2.8)$$

Выражение в скобках в левой части уравнения (2.8) называется выходным (или собственным) операторным многочленом, в правой части — входным операторным многочленом. Составив отношение входного операторного многочлена к выходному и заменив в нем $p$ на $s$, получим выражение передаточной функции $W(s)$.

Для центробежного чувствительного элемента передаточная функция согласно (2.3) имеет вид

$$W_1(s) = \frac{b_0}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2}.$$

Заменив в выражении передаточной функции $s$ на $j\omega$ (где $j = \sqrt{-1}$), получим

$$W(j\omega) = \frac{b_0 (j\omega)^m + b_1 (j\omega)^{m-1} + \cdots + b_m}{a_0 (j\omega)^n + a_1 (j\omega)^{n-1} + \cdots + a_n},$$

или

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = R(\omega) e^{j\theta(\omega)}. \qquad (2.9)$$

Годограф, описываемый вектором (2.9) при изменении $\omega$ от 0 до $+\infty$, называется *амплитудно-фазовой частотной характеристикой*; обычно она имеет вид, показанный на рис. 2.3.

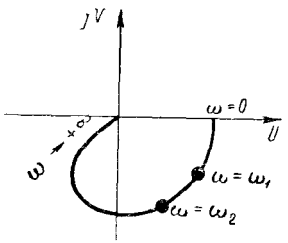



Рис. 2.3. Типичная амплитудно-фазовая частотная характеристика элемента.

Амплитудно-фазовая частотная характеристика линейного элемента может быть определена экспериментально, если на вход его подавать синусоидальный сигнал

$$x_{вх} = a_{вх} \sin \omega t$$

и записывать возникающий при этом синусоидальный сигнал на выходе

$$x_{вых} = a_{вых} \sin(\omega t + \theta)$$

При каждом значении $\omega$ отношение $a_{вых}/a_{вх} = R(\omega)$ составляет модуль некоторого вектора, а сдвиг фаз $\theta(\omega)$ — угол между положительным направлением вещественной оси и вектором. Соединив ряд таких векторов при разных значениях $\omega$ плавной кривой, получим амплитудно-фазовую частотную характеристику. Наоборот, из графика частотной характеристики можно сразу определить поведение элемента в режиме вынужденных колебаний под действием входного гармонического сигнала.

Уравнения движения, передаточные функции и частотные характеристики представляют собой разные формы математических моделей, отражающих динамические свойства элементов непрерывных автоматических систем.

## § 3. ЭЛЕМЕНТЫ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

Одной из важнейших функций судовых автоматических устройств является выполнение дискретных логических операций. Известно, что любая сложная дискретная логическая операция может быть осуществлена с помощью набора небольшого числа элементарных логических операций, таких как союзы и выражения типа И, ИЛИ, НЕ, ИЛИ-НЕ, И-НЕ и др.

Величины $x_1$, $x_2$, $x_3$ и т. д., на области изменения которых определены логические операции, называют логическими переменными. Они могут принимать два значения («0» и «1») и представляют собой элементарные высказывания о событиях: Включено—Выключено, ДА—НЕТ, Больше—Не больше и т. д.

Величину $y$, зависящую от нескольких переменных, объединенных знаком логических операций, называют логической функцией. Логическая функция $y$ также принимает два значения («0» и «1»), причем значение, которое она принимает в данный момент, зависит от значений логических переменных $x_1$, $x_2$, $x_3$ и т. д.

Наибольшее распространение получили логические операции, рассмотренные ниже.

*Дизъюнкция n переменных (логическая сумма, соответствующая союзу ИЛИ)* равна «1» в том случае, если хотя бы одна из переменных, входящих в нее, равна «1», в остальных случаях она равна «0».

При помощи электромеханических реле операция ИЛИ выполняется по схеме, в которой параллельные замыкающие контакты включены последовательно с нагрузкой (рис. 3.1, *а*). Импульс на выходе схемы возникает в том слу-

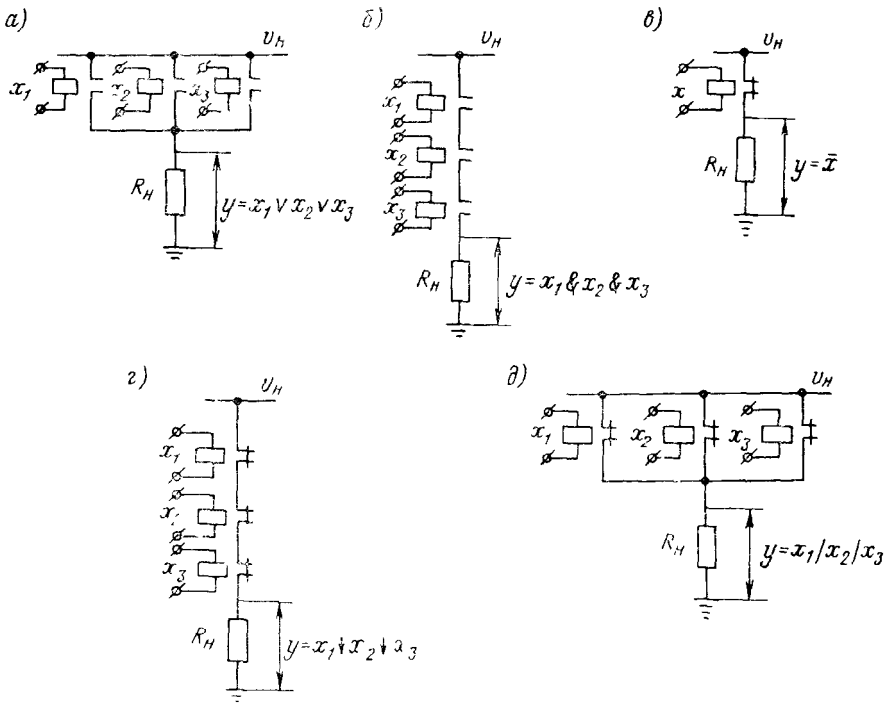



Рис. 3.1. Релейно-контактные схемы, реализующие операции: *а* — ИЛИ; *б* — И; *в* — НЕ; *г* — ИЛИ-НЕ; *д* — И-НЕ.

чае, когда замкнут хотя бы один из контактов: т. е. на выходе будет сигнал «1», если присутствует сигнал «1» хотя бы на одном из реле $x_1$, $x_2$, $x_3$, и сигнал «0», если сигнал «0» имеется одновременно на всех входах. Обозначается эта операция знаком $+$ или $\vee$. Например, $y = x_1 + x_2 + x_3$ или $y = x_1 \vee x_2 \vee x_3$ читается как «$x_1$ или $x_2$, или $x_3$» и означает, что событие $y$ совершается, если совершается событие $x_1$ или $x_2$, или $x_3$, или $x_1$ и $x_2$, и т. д.

*Операция* И — *логическое умножение (конъюнкция)* обозначается знаком $\cdot$ или $\wedge$. Например, $y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$ или $y = x_1 \wedge x_2 \wedge x_3$, читается как «$x_1$ и $x_2$ и $x_3$» и означает, что событие $y$ совершается только тогда, когда одновременно совершаются события $x_1$, $x_2$ и $x_3$.

Конъюнкция $n$ переменных равна «1» в том случае, если все входящие в нее переменные равны «1», в остальных случаях она равна «0».

При помощи реле операция И выполняется по схеме, в которой замыкающие контакты включены последовательно на общую нагрузку (рис. 3.1, *б*). Импульс на выходе схемы возникает только в том случае, когда замкнуты все последовательные контакты. Иначе говоря, на выходе схемы будет сигнал «1»,

если присутствуют сигналы «1» одновременно на всех реле $x_1, x_2, x_3$, и сигнал «0», если имеется сигнал «0» хотя бы на одном входе.

*Операция* НЕ — *отрицание* (*инверсия*) обозначается чертой над переменной, например, $\bar{x}$. Читается «не $x$» и означает, что если на входе схемы имеет место событие $x$, то на выходе — «не $x$», т. е. обратное событию $x$, или наоборот. Так, если на входе схемы (рис. 3 1, *в*) сигнал «1», то на выходе «0», если на входе «0», то на выходе «1» Операция НЕ может быть выполнена с помощью схемы, в которой размыкающий контакт реле включен последовательно с нагрузкой (см. рис. 3.1, *в*).

*Операция* ИЛИ-НЕ — *стрелка Пирса* (*отрицание дизъюнкции*) обозначается знаком $\downarrow$, например, $y = x_1 \downarrow x_2 \downarrow x_3$ Она представляет собой отрицание дизъюнкции переменных, входящих в функцию $y$

Рис. 3.2. Условные обозначения логических элементов: *а* — основное поле (*W*); *б* — основное поле с левым и правым дополнительными полями.

$$y = x_1 \downarrow x_2 \downarrow x_2 = \overline{x_1 \vee x_2 \vee x_3}$$

При помощи реле операция ИЛИ-НЕ выполняется по схеме, в которой размыкающие контакты включены последовательно на общую нагрузку (рис. 3.1, *г*). Импульс на выходе схемы возникает тогда и только тогда, когда замкнуты все последовательные контакты. Иначе говоря, на выходе схемы будет сигнал «1», если отсутствуют сигналы «1» одновременно на всех реле $x_1$, $x_2$, $x_3$, и сигнал «0», если имеется сигнал «1» хотя бы на одном входе.

*Операция* И-НЕ — *штрих Шеффера* (*отрицание конъюнкции*) обозначается знаком /, например, $y = x_1 / x_2 / x_3$. Она представляет собой отрицание конъюнкции переменных, входящих в функцию $y$

$$y = x_1 / x_2 / x_3 = \overline{x_1 \wedge x_2 \wedge x_3}.$$

При помощи реле операция И НЕ выполняется по схеме, представленной на рис. 3.1, *д*. На выходе схемы сигнал будет равен «0», если присутствует сигнал «1» одновременно на всех входах реле $x_1, x_2, x_3$, и сигнал «0» во всех остальных случаях (таблицы истинности некоторых операций см. в гл. VII).

Элементы, устройства или функциональные группы, реализующие функцию или систему функций двоичной алгебры логики, например, логический элемент И, триггер, дешифратор, сумматор и т. д., называют *дискретными логическими элементами*.

Условное графическое обозначение логического элемента, представленного на рис. 3 2, имеет форму прямоугольника, который может содержать три поля основное и два дополнительных В основном поле помещают информацию о функции, выполняемой логическим элементом, в дополнительных полях — условные обозначения входов и выходов. Обозначения элементов, реализующих различные логические функции, приведены в табл. 34.2.

Сигналы на входе и выходе логических схем могут быть потенциальными и импульсными В соответствии с этим существуют три типа логических схем: *потенциальные*, в которых в качестве сигнала на входах и выходах используются потенциалы; *импульсные*, в которых сигналами на входах и выходах служат импульсы, *потенциально-импульсные*, в которых сигналами на входах являются потенциалы, а сигналами на выходе — импульсы.

В потенциальных схемах логические элементы соединяются друг с другом с помощью гальванических связей, и сигнал на выходе поддерживается неизменным, пока на входах имеются неизменные двоичные сигналы Достоинство потенциальных логических схем состоит в том, что они могут быть использованы для построения как асинхронных, так и синхронных систем управления и контроля.

В асинхронных устройствах нет жесткого согласования по времени между различными входными и выходными сигналами, которое обычно имеется в синхронных устройствах В асинхронных устройствах отсутств ют тактовые импульсы, и быстродействие схемы определяется только динамическими свойствами самих элементов

Потенциально-импульсные и импульсные элементы используются в основном для реализации некоторых последовательных функций, так как позволяют проще, чем с потенциальными элементами, строить различные пересчетные схемы К таким элементам в первую очередь относится триггер

Для реализации различных алгоритмов управления необходимо иметь определенный набор логических элементов. Этот набор должен быть полным, т. е. таким, чтобы при его помощи можно было реализовать любую по сложности функцию Элементы, входящие в набор, должны содержать минимальное число деталей, обладать высокой надежностью и иметь низкую стоимость

Полными наборами логических элементов являются:

а) набор из элементов ИЛИ, И, НЕ;

б) набор из одного универсального элемента ИЛИ-НЕ;

в) набор из одного универсального элемента И-НЕ;

г) различные комбинации из элементов *а*, *б*, *в*

Следует отметить, что при проектировании системы управления формализованный алгоритм, описывающий ее работу, обычно представляется в виде логической схемы, содержащей элементы НЕ, ИЛИ, И В случае необходимости любую логическую функцию, записанную с помощью операций дизъюнкции, конъюнкции и отрицания, можно переписать только с операциями ИЛИ-НЕ, или И-НЕ с помощью следующих соотношении.

$$x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee \ldots \vee x_n = \overline{x_1 \downarrow x_2 \downarrow x_3 \downarrow \ldots \downarrow x_n};$$

$$x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \ldots \wedge x_n = \overline{x_1/x_2/x_3/\ldots/x_n},$$

$$x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee \ldots \vee x_n = \overline{\bar{x}_1 \wedge \bar{x}_2 \wedge \bar{x}_3 \wedge \ldots \wedge \bar{x}_n},$$

$$x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge \ldots \wedge x_n = \overline{\bar{x}_1 \vee \bar{x}_2 \vee \bar{x}_3 \vee \ldots \vee \bar{x}_n}.$$

Для осуществления логических операции применяют различные электрические и неэлектрические схемы, выполненные на электромагнитных реле, полупроводниковых диодах и триодах, магнитных элементах с прямоугольной петлей гистерезиса, пневмоэлементах, интегральных схемах и др.

Одна из особенностей логических элементов заключается в том, что в большинстве своем они должны иметь несколько входов и один выход. Обычно в реальных логических элементах, которые по характеру функции могли бы иметь неограниченное число входов (И, ИЛИ, НИ . . , и т. п ), число входов ограничено техническими возможностями, габаритом или стоимостью элемента. Так, в транзисторных логических элементах с входами на сопротизлениях увеличение числа входов повышает требования к гранзистору, т. е. существенно повы шает стоимость элементов. В магнитных логических элементах увеличение числа входов элемента приводит к увеличению габарита блока. В связи с этим число входов в логических элементах ограничивается 3, реже 4—5

В том случае, когда входов не хватает, если функция ассоциативна, нужно для ее разложения применять ассоциативный закон, соответствующий каскадному соединению двух или более элементов. Иногда, наоборот, число входов реального элемента может быть больше, чем необходимо В этом случае нужно либо подать на оставшиеся входы постоянный сигнал «1» (например, в элементе И) или «0» (в элементе ИЛИ), либо соединить оставшиеся входы с использованными (если функция симметрична)

Число элементов, которыми может управлять данный элемент, называется *коэффициентом разветвления*. У реальных элементов он ограничен, как и число входов; иногда он зависит от типа управляемых элементов. В тех системах логических элементов, где увеличение коэффициента усиления по мощности приводит к существенному повышению стоимости элементов (например, у транзисторных элементов), обыкновенно имеется два типа элементов: обычные с небольшим

коэффициентом разветвления и мощные, предназначенные для размножения сигналов. Последние, как правило, имеют бо́льшие габариты и бо́льшую стоимость, чем первые, но используются сравнительно редко

В магнитополупроводниковых элементах получение коэффициента усиления порядка 5—10 на технической частоте (50—400 Гц) не составляет труда, поэтому при их применении обычно не возникает затруднений с реализацией сильно разветвленных схем. Однако в практике судовой автоматики эти элементы не нашли применения из-за их высоких требований к источникам питания и отрицательного влияния вибрации на их работу.

В тех случаях, когда в используемой системе элементов, выполняющих какую-либо функцию, коэффициент разветвления недостаточен, приходится после этого элемента дополнительно ставить повторитель или усилитель с повторительной характеристикой.

Системы автоматизированного управления техническими средствами судна, содержащие логические блоки, могут быть построены на бесконтактных логических элементах (транзисторных) и на пневмоэлементах.

В последнее время определенной тенденцией при проектировании судовых систем автоматизированного управления стало применение интегральных схем. *Логические элементы, исполненные в виде интегральной схемы, выполняются* на одной полупроводниковой, чаще всего кремниевой пластине, и реализуют достаточно сложные логические функции. Главным преимуществом интегральных схем *является их небольшая стоимость при массовом производстве и высо*кая надежность, достигаемая путем автоматизации производства и уменьшения числа паяных и сварных соединений при их применении. Надежность интегральной схемы, содержащей до 30 компонент (транзисторов, диодов, сопротивлений, емкостей), равна надежности отдельного транзистора Кроме того, применение интегральных схем позволяет уменьшить габариты логических устройств и потребляемую ими мощность. Технические характеристики некоторых логических элементов на интегральных микросхемах приведены в гл. VII.

Использование интегральных схем при построении систем управления привело к повышению уровня схемно-конструктивной интеграции. При синтезе схем стали применять логические элементы, реализующие не одну логическую операцию типа ИЛИ, И, НЕ, а моноблоки (модули), реализующие сложные логические функции. Укрупнение элементов повышает технологичность, приводит к сокращению сроков монтажа, способствует ускорению проектирования, упрощает наладку и обслуживание. В настоящее время налажено серийное производство модульно-дискретных потенциальных интегральных схем серии Г-08. Данная серия элементов включает многофункциональный логический элемент Г-08Б. Этот элемент предназначен для решения задач комбинационной логики и обеспечивает реализацию абсолютного большинства логических уравнений, описывающих судовые алгоритмы функционирования, одним элементом. Элемент содержит 80 транзисторов и имеет 10 логических и управляющих входов и два выхода.

Элемент Г-08Б выполняется в стандартном корпусе 101СТ14-1, имеющем 14 выводов. Подачей сигналов «0» и «1» на соответствующие входы, а также объединением некоторых входов элемент настраивается на реализацию одной из 26 бесповторных функций 8 переменных. Данный элемент реализует большое число логических функций от числа переменных, меньших 8, и 16 функций от двух переменных.

## § 4. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

Инженерные методы расчета надежности судовых автоматических систем основываются на современных математических методах, при этом в качестве исходных данных к расчету используются характеристики надежности элементов, входящих в данную систему. Под элементом системы в данном случае понимается устройство, предназначенное для выполнения определенной функции и имеющее количественную характеристику надежности, самостоятельно учи-

тываемую при расчете надежности системы. Такими элементами могут быть детали, блоки, приборы, а также отдельные системы, если рассчитывается надежность сложного комплекса систем

Количественные характеристики надежности являются одними из основных технических характеристик элементов, позволяющих на основе их использования производить не только расчет надежности системы в целом, но и решать ряд других важных с практической точки зрения вопросов. Они позволяют формулировать требования по надежности вновь разрабатываемых комплектующих элементов и систем, рассчитывать сроки службы и необходимое число запасных деталей для нормальной эксплуатации аппаратуры, сравнивать надежность различных элементов и намечать перспективу их дальнейшего совершенствования, избирать наиболее эффективные меры повышения надежности и т. д.

Определим понятие надежности элемента, отметив при этом, что данное понятие, как и многие другие в теории надежности, в равной мере относится как к элементам, так и к системе в целом.

*Надежность есть свойство элемента (системы) сохранять свои выходные параметры в определенных пределах при определенных условиях эксплуатации.*

Для количественной оценки надежности используются различные критерии надежности, которые являются объективными техническими параметрами элемента.

*Критерий надежности* — это определенная математическая категория, с помощью которой оценивается надежность. Численное значение критерия называется количественной характеристикой надежности элемента.

Количественная характеристика надежности зависит от технологии изготовления элемента, качества материала, из которого он изготовлен, режима его работы и т. д. Существенное влияние на надежность оказывают также условия и качество эксплуатации, квалификация обслуживающего персонала и т. п. Из этого видно, что на надежность элемента влияет множество факторов, большинство которых являются случайными. Поэтому критерии и количественные характеристики надежности, широко используемые в настоящее время, носят вероятностный характер; все они связаны с понятием отказа элемента.

*Отказ* — это событие, после возникновения которого элемент утрачивает способность выполнять заданное назначение. Из этого определения следует, что отказ элемента не обязательно связан с электрическим, механическим или каким-либо другим его повреждением. Отказ элемента будет иметь место и в тех случаях, когда основные параметры элемента вследствие его старения, износа или разрегулировки превышают допустимые пределы.

По своей природе, причинам возникновения и последствиям отказы классифицируются на внезапный и постепенный, независимый и зависимый, постоянный и временный.

*Внезапный отказ* — отказ, возникающий в результате скачкообразного изменения одного или нескольких определяющих параметров элемента.

*Постепенный отказ* — отказ, возникающий в результате постепенного изменения одного или нескольких параметров элемента по причине его старения или износа.

*Независимый отказ* — отказ, возникающий по любым причинам, кроме действия другого отказа.

*Зависимый отказ* — отказ, являющийся прямым следствием другого отказа.

*Постоянный отказ* — отказ, обусловленный выходом элемента из строя и требующий его замены или восстановления.

*Временный отказ* — отказ, обусловленный временно действующими причинами (температура, давление, влажность, вибрация и т. п.) и не требующий замены или восстановления элемента.

Каждый из рассмотренных видов отказов может иметь еще и различный характер. Так, для электрических элементов отказы могут быть типа короткого замыкания или обрыва. Кроме того, экспериментально установлено, что различные виды отказов подчинены различным законам распределения времени безотказной работы. Для внезапных отказов наиболее характерным является экспоненциальный закон, для постепенных отказов — нормальный. Встречаются также законы распределения Релея, Вейбулла, гамма-распределения и др.

Указанные обстоятельства имеют большое значение и должны в той или иной мере учитываться при расчете надежности конкретных систем.

Понятие отказа является фундаментальным понятием теории надежности; *именно это понятие позволяет вводить различные критерии и определять соответствующие* количественные характеристики надежности. Поэтому первым и очень важным этапом определения надежности конкретного элемента является четкая формулировка понятия отказа в зависимости от схемного включения и функционального назначения данного элемента. Надежность элементов характеризуется *такими характеристиками, как интенсивность отказов и среднее* время безотказной работы

**Интенсивность отказов.** Работающий или находящийся на хранении элемент с течением времени снижает свою надежность, становится менее надежным. Это явление наиболее полно определяется такой характеристикой, как интенсивность отказов, или иначе, $\lambda$-характеристикой элемента.

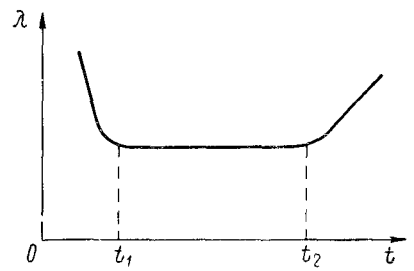


Рис. 4.1. $\lambda$-характеристика элемента.

*Интенсивностью отказов* элемента называется величина, характеризующая степень надежности элемента в каждый момент времени; она определяется отношением числа элементов, отказавших в единицу времени, к общему числу элементов, исправно работающих в данный момент времени. Интенсивность отказов обозначается $\lambda(t)$ и из опытных данных определяется *по формуле*

$$\lambda(t) = \frac{n(\Delta t)}{N(\Delta t)}, \qquad (4.1)$$

где $n(\Delta t)$ — число элементов, отказавших в интервале времени $(t, t + \Delta t)$; $N(\Delta t)$ — число элементов, исправно действующих в интервале времени $\Delta t$.

Зависимость интенсивности отказов от времени представлена на рис. 4.1. Она имеет три характерных участка: участок приработки $(0t_1)$, участок интенсивного старения или износа ($t_2$ и далее) и участок нормальной работы $(t_1 t_2)$, характеризующийся постоянным значением интенсивности отказов:

$$\lambda(t) = \text{const}. \qquad (4.2)$$

При определении $\lambda(t)$ периоды приработки и износа не рассматриваются; характеристика определяется только для периода нормальной работы. В силу этого *значения интенсивностей отказов даются в виде постоянной* величины — как число отказов в процентах за 1000 ч работы либо в виде простой или десятичной дроби, дающей величину отказов за 1 ч работы. В действительности интенсивность отказов является функцией времени. По величине $\lambda(t)$ можно однозначно судить о надежности элементов: чем она меньше, тем надежнее элементы.

*Интенсивность отказов для одних и тех же элементов, даже при одинаковом* режиме их использования и идентичных внешних условиях, обычно колеблется в широких пределах. Ее значение зависит от множества факторов, таких, как технология и культура производства, исходные материалы и т. д.

**Среднее время безотказной работы.** Математическое ожидание времени безотказной работы называется *средним временем безотказной работы.* Эта характеристика надежности обозначается $T_{ср}$ и из опытных данных определяется по формуле

$$T_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} t_i}{N_0}, \qquad (4\ 3)$$

где $t_i$ — время безотказной работы $i$-го элемента; $N_0$ - число элементов, которые *испытываются при условии, что они все отказали*

Среднее время безотказной работы характеризует надежность элементов до первого отказа; эта характеристика приемлема для элементов или систем разового использования, т. е. таких, которые после отказа не ремонтируются.

Для экспоненциального закона имеем

$$T_{\text{ср}} = \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \qquad (4\ 4)$$

Рассмотрим последовательно надежность типовых элементов, наиболее часто применяемых в приборах, средствах автоматизации и системах управления.

**Надежность резисторов.** Резисторы являются массовыми элементами аппаратуры и систем управления. Их надежность по сравнению с другими элементами достаточно велика. Однако в силу массовости применения резисторов отказы аппаратуры по вине этих элементов наблюдаются довольно часто — на их долю приходится до 23% отказов.

По характеру работ различают резисторы постоянные, переменные и секционированные, или полупеременные.

По конструкции резисторы бывают проволочными и непроволочными. Различием режимов работы и конструктивного исполнения объясняется тот факт, что надежность резисторов колеблется в широких пределах.

В проволочных резисторах токопроводящим элементом служит проволока толщиной 2,5—0,03 мм, имеющая высокое удельное сопротивление. Проволочные резисторы наиболее стабильны и способны выдерживать большие перегрузки.

В непроволочных резисторах токопроводящими элементами могут быть металлические и углеродистые пленки, которые наносятся на электроизоляционные основания, а также смеси, состоящие из токопроводящих материалов, наполнителей и связок. Причиной отказов резисторов являются следующие основные виды неисправностей: обрывы проводящего слоя, перегорания, изменение номинального значения, перегрев, механические повреждения и т. д.

В табл. 4.1 приведено распределение выходов из строя некоторых типов резисторов по видам дефектов. В табл. 4.2 указаны средние данные по интенсивности отказов $\lambda = \lambda_0$ для различных типов резисторов при нормальной температуре $t_{0\text{н}}$, нормальной влажности $d_{\text{н}}$ и номинальной мощности нагрузки. В этой таблице обозначено: $\alpha_t$ — температурный коэффициент; $K = \frac{R}{R_{\text{н}}^*}$; $R$ — фактическое значение сопротивления; $R_{\text{н}}$ — номинальное значение сопротивления.

*Таблица 4.1*

**Распределение отказов резисторов по видам дефектов**

| Тип резистора | Процент отказов резисторов | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Обрыв | Перегорание | Изменение номинального значения сопротивления | Перегрев | Механическое повреждение | Прочие дефекты |
| ВС | 19,8 | 38 | 2,5 | 21,5 | 14,9 | 3,3 |
| МЛТ | 10,1 | 33,8 | 19,2 | 16,5 | 20,4 | — |
| ПЭВ | 70 | — | 12,1 | 5,8 | 4,1 | 8 |
| ПТ-1 | 45,4 | 4,1 | 5,8 | 14,8 | 10,1 | 19,8 |
| СП | — | — | — | 18,5 | 81,5 | — |

*Таблица 4.2*

**Характеристики надежности резисторов**

| Тип резистора | Номинальная мощность $P_н$ | Температура $t_{0н}$, °С | Влажность $d$, % | Тепловое сопротивление $R_t$ | $\lambda_0$, 1/ч $10^{-6}$ | $\alpha_t$ | $K$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ВС-0,5 | 0,5 | 40 | — | 90—100 | 1,5 | 0,015 | 0,000 5 |
| ВС-1,0 | 1,0 | 40 | — | 65—70 | 10 | 0,025 | 0,001 25 |
| МЛТ-0,5 | 0,5 | 40 | — | 140 | 1,3 | 0,009 | — |
| МЛТ-1,0 | 1,0 | 40 | — | 85 | 8 | — | — |
| МЛТ-2,0 | 2,0 | — | — | 65 | 0,3 | — | — |
| УЛМ-0,25 | 0,25 | — | 60 | — | 6 | — | — |

Интенсивность отказов резисторов, работающих в импульсном режиме, определяется по формуле

$$\lambda_{имп} = \lambda_1 \frac{t_р}{t_р + t_п} + \lambda_2 \frac{t_п}{t_р + t_п} + \lambda_3 f, \qquad (4.5)$$

где $\lambda_1$ — интенсивность отказов при непрерывном режиме работы резистора; $\lambda_2$ — интенсивность отказов при выключенном состоянии; $\lambda_3$ — дополнительная величина интенсивности отказов, обусловленная переходными тепловым и механическими процессами в проводящем слое и на границе между проводящим слоем и основанием при включении и выключении резистора; $t_р$, $t_п$ — время работы и простоя соответственно; $f$ — частота циклов, 1/ч.

Значения $\lambda_3$ для резисторов лежат в пределах $1{,}0 \cdot 10^{-8} \div 5{,}0\ 10^{-8}$ 1/цикл.

Вследствие широкого применения резисторов в приборах, средствах автоматизации и системах управления, снижение интенсивности отказов даже на небольшую величину существенно сказывается на общей надежности аппаратуры.

С целью повышения надежности работы резисторов необходимо тщательно анализировать режимы и внешние условия, в которых они работают, не допускать превышения предельных значений мощности, использовать резисторы в условиях, на которые они рассчитаны.

**Надежность конденсаторов.** Конденсаторы, как и сопротивления, являются элементами массового применения и занимают второе место среди элементов электронной аппаратуры. Отказы конденсаторов составляют 3—6% от общего числа отказов.

Конденсаторы классифицируют по многим признакам, но для анализа надежности наиболее важна классификация по материалу диэлектрика. В зависимости от материала диэлектрика конденсаторы бывают слюдяными, керамическими, бумажными, металлобумажными, пленочными, стеклоэмалевыми, стеклокерамическими, воздушными, вакуумными, газонаполненными и т. д.

К основным параметрам конденсаторов следует отнести емкость, электрическую прочность, сопротивление изоляции, температурную стабильность.

Причины отказов конденсаторов заключаются в наличии технологических ошибок при производстве, ошибок на стадии эксплуатации, неправильно выбранных режимов работы и появлении различных перегрузок. Отказы конденсаторов проявляются в пробоях диэлектрика, коротком замыкании, нарушении герметичности и обрыве выводов, механических повреждениях и т. д.

В табл. 4.3 показано распределение отказов конденсаторов по видам дефектов. Анализ таблицы позволяет сделать вывод о том, что наибольшее число отказов конденсаторов приходится на отказы типа пробоя.

Основной причиной пробоя при правильно выбранном номинале рабочего напряжения является тепловой пробой, который происходит внутри цилиндрического проводящего канала, проходящего через диэлектрик от одного электрода к другому.

*Таблица 4.3*

**Распределение отказов конденсаторов по видам дефектов**

| Виды дефектов | Процент отказов конденсаторов | | | |
|---|---|---|---|---|
| | КСО | СГМ | КБГ | КЭГ |
| Пробои | 68,4 | 30,8 | 59,2 | 28,3 |
| Увеличение тангенса угла потерь | 10,0 | 3,3 | — | — |
| Уменьшение сопротивления изоляции | 8,3 | 3,8 | — | 26,7 |
| Обрывы провода | 3,3 | 5,3 | 19,2 | — |
| Короткое замыкание | — | — | — | 45,0 |
| Нарушение герметичности | — | 52,5 | 21,6 | — |
| Механические повреждения | 10,0 | 4,3 | — | — |

Срок службы конденсаторов возрастает с понижением коэффициента нагрузки. Поэтому при проектировании приборов, средств автоматизации и систем управления конденсаторы целесообразно применять так, чтобы прикладываемое к ним напряжение было меньше номинального примерно в два раза. Это увеличит срок использования конденсаторов и повысит надежность аппаратуры в целом.

**Надежность полупроводниковых приборов.** В настоящее время полупроводниковые приборы находят широкое применение в средствах автоматизации и системах управления благодаря таким качествам, как большая надежность по сравнению с электронными лампами, меньшие массы и габариты, повышенная устойчивость к ударным и вибрационным нагрузкам, малые значения рассеиваемой мощности и т. д. К их недостаткам следует отнести чувствительность к перегрузкам по току и напряжению.

Надежность полупроводниковых приборов зависит в основном от температуры перехода.

Иногда ухудшение параметров вызывается нарушением условий теплоотдачи, наличием влаги внутри корпуса полупроводника, наличием внутри корпуса избыточного количества кислорода, отравлением поверхности полупроводника ионами, остающимися при изготовлении и проникающими через вывод. Отказы могут происходить также вследствие ошибок конструирования и нарушения технологии производства. Наиболее характерны обрывы или перегорание выводов, микротрещины в кристаллах и короткие замыкания между электродами.

Надежность полупроводниковых приборов зависит от электрического режима (коэффициента нагрузки) и температуры окружающей среды. Коэффициент нагрузки особенно сильно влияет на интенсивность отказов по достижении критического значения $K_{н\,кр}$, которое определяется по следующей эмпирической зависимости:

$$K_{н\,кр} = \exp\left\{-3\,\frac{t_о - 25}{t_{max} - 25}\right\}, \qquad (4.6)$$

где $t_о$ — температура окружающей среды; $t_{max}$ — максимально допустимое по техническим условиям значение температуры окружающей среды.

Значения $\lambda$ для некоторых полупроводниковых приборов при номинальном режиме работы составляют:

для германиевых диодов и триодов $\lambda_0 = (1{,}5—3{,}0)\cdot 10^{-6}$ 1/ч;

для кремниевых диодов и триодов $\lambda_0 = 1{,}0\cdot 10^{-6}$ 1/ч.

**Надежность электронных ламп.** Причинами выхода из строя ламп могут быть перегорание или обрыв нити накала, пробой изоляции катода-подогревателя, обрыв выводов электродов и короткие замыкания между электродами,

появление трещин в стекле и т. д. Эти причины можно разбить на две группы, определяющие внезапный выход из строя ламп и ускоряющие потерю их работоспособности. Причинами первой группы являются недостатки технологии изготовления, плохой контроль и т. д., причинами второй группы — повышение или понижение напряжения накала, увеличение коэффициента нагрузки и т. д. Процентное соотношение между различными причинами следующее:

| | |
|---|---|
| обрывы и перегорания нити накала | 39—65 |
| замыкания между электродами | 33—46 |
| трещины в баллоне, натекание и т. д. | 17—28 |

Надежность электронных ламп можно определить по формуле

$$p(t) = e^{-\lambda t}. \tag{4.7}$$

При номинальных режимах и условиях $\lambda = \lambda_0$. При отклонении режимов и условий работы от номинальных

$$\lambda = \lambda_0 \left[0{,}4 + 0{,}6\left(\frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{н ном}}}\right)^{\alpha}\right]\left(\frac{U}{U_{\text{ном}}}\right)^{\beta}\left(\frac{t_{\text{к}}}{t_{\text{к ном}}}\right)^{\gamma}, \tag{4.8}$$

где $U_{\text{н ном}}$, $U_{\text{ном}}$, $t_{\text{к ном}}$ — номинальные значения напряжения накала, анода и температуры колбы; $U_{\text{н}}$, $U$, $t_{\text{к}}$ — действительные значения напряжения накала, анода и температуры колбы; $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ — коэффициенты ($\alpha = 10$—$12$; $\beta = 1{,}7$—$1{,}8$; $\gamma = 5{,}5$).

Температуру колбы можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$t_{\text{к}} = t_{\text{к0}} + (C_a - C_b P_a)\, t_{\text{с}} + C_c P_a, \tag{4.9}$$

где $t_{\text{к0}}$, $C_a$, $C_b$, $C_c$ — постоянные для данного типа ламп величины; $P_a$ — мощность, рассеиваемая на аноде.

Значения $C_a$, $C_b$, $C_c$ и температуры $t_{\text{к0}}$ приведены в табл. 4.4.

*Таблица 4.4*

**Коэффициенты для определения рабочей температуры электронной лампы**

| Тип лампы | $t_{k0}$ | $C_a$ | $C_b$, 1/Вт | $C_c$, °С/Вт |
|---|---|---|---|---|
| Пентоды и диоды в сверхминиатюрном исполнении | 57—73 | 0,75—0,84 | $(215—495)\cdot 10^{-4}$ | 32—44 |
| Маломощные пентоды и диоды в миниатюрном исполнении | 30—70 | 0,62—0,86 | $(175—475)\cdot 10^{-4}$ | 19—27 |
| Оконечные пентоды и тетроды в миниатюрном исполнении | 60—75 | 0,5—0,8 | $(100—150)\cdot 10^{-4}$ | 10—15 |

**Надежность обмоток.** К *обмоточным изделиям относятся трансформаторы*, дроссели, катушки индуктивности и т. п.

Основные причины выхода из строя обмоток следующие: обрывы вследствие высоких механических натяжений при намотке, температурных напряжений при нагреве, механических напряжений, вызванных тепловым расширением

каркаса; коррозия в обнаженных местах изолированного провода; короткое замыкание витков или слоев, явившееся результатом механического или теплового нарушения изоляции провода, пробоя, уменьшения сопротивления изоляции.

Надежность обмоточных изделий в значительной мере зависит от температуры окружающей среды. Иногда при оценке надежности трансформаторов и дросселей пользуются «правилом 8—10 градусов», которое утверждает, что понижение рабочей температуры изоляции на 8—10° С увеличивает долговечность трансформаторов и дросселей в два раза.

Надежность работы обмоток определяется из следующих соображений. Если на единице длины провода имеется $n$ поврежденных мест, то вероятность *отсутствия короткого замыкания* составит

$$p_к = p_0^n, \tag{4.10}$$

где $p_0$ — вероятность отсутствия короткого замыкания при $n = 1$. При длине провода $L$ имеем

$$p = p_к^L = p_0^{nL}. \tag{4.11}$$

Значение $p_0$, определяемое как начальное значение надежности обмотки (при $t = 0$), зависит от температуры обмотки.

Таким образом, надежность обмотки в отношении отсутствия короткозамкнутых витков будет равна

$$p = p_0 e^{-\lambda t} = e^{-\lambda (T+t)}. \tag{4.12}$$

**Контактные элементы.** К контактным элементам и устройствам относятся различные реле, переключатели, штепсельные разъемы, контактные вращающиеся сочленения и т. п. В основу работы этих устройств положен электрический контакт, поэтому с точки зрения надежности их целесообразно объединить в одну группу.

Основные причины отказов контактных элементов — слипание и сваривание контактов и их электротермический износ. Слипание контактов — это соединение контактной пары, основанное на взаимодействии ионов металла при сильном сжатии двух металлических поверхностей. Сваривание контактов может произойти при увеличении температуры в области стягивания до температуры плавления контактного материала и при уменьшении контактной поверхности. Электротермический износ контактов проявляется в обгорании контактов и в потере массы контакта, вызванной диффузией металла контакта.

Для реле имеется эмпирическая формула оценки интенсивности отказов в зависимости от числа срабатываний реле и величины коммутирующего тока:

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda\eta_т n, \tag{4.13}$$

где $\lambda_0$ — доля интенсивности отказов, зависящая от конструкции и назначения реле; $\Delta\lambda$ — дополнительная доля интенсивности отказов одного контакта реле, зависящая от числа срабатываний в час и предельного числа срабатываний; $\eta_т$ — поправочный коэффициент, зависящий от плотности тока контакта; $n$ — число действующих контактов.

Значения $\lambda_0$, 1/ч, лежат в следующих пределах:

— для чувствительных реле $0{,}4 \cdot 10^{-5}$;

— для реле общего назначения $0{,}25 \cdot 10^{-5}$;

— для мощных реле $0{,}04\ 10^{-5}$;

— для термореле $0{,}4 \cdot 10^{-5}$.

Сводные данные о $\lambda$-характеристиках элементов, применяемых в системах автоматики, приведены в табл. 4.5.

*Таблица 4.5*

**λ-характеристики элементов автоматики**

| Элементы | Значения интенсивности отказов λ, 1/ч $10^{-6}$ | | |
|---|---|---|---|
| | максимальное | среднее | минимальное |
| Акселерометры | 7,5 | 2,8 | 0,35 |
| Акселерометры тензометрические | 21,4 | 8,0 | 1,0 |
| Арматура | 0,121 | 0,087 | 0,003 5 |
| Арматура осветительная | 0,71 | 0,1 | 0,04 |
| Амортизаторы | 3,17 | 1,0 | 0,3 |
| Батареи заряжаемые | 14,29 | 1,40 | 0,5 |
| Батареи одноразовые | 300 | 30 | 10 |
| Вентиляторы | 3,57 | 2,4 | 0,89 |
| Выключатели автоматические | 0,4 | 0,137 5 | 0,045 |
| Выключатели автоматические тепловые | 0,5 | 0,3 | 0,25 |
| Выключатели быстродействующие | 2,1 | 0,4 | 0,09 |
| Выпрямители | 0,75 | 0,6 | 0,28 |
| Выпрямители селеновые | 1,6 | 1,162 5 | 0,32 |
| Генераторы | 2.41 | 0,9 | 0,4 |
| Генераторы звуковой частоты | 0,56 | 0,35 | 0,14 |
| Генераторы опорные | 2,5 | 0,937 5 | 0,045 |
| Генераторы переменного тока | 2,94 | 0,7 | 0,033 |
| Генераторы постоянного тока | 6,27 | 0,9 | 0,3 |
| Гнезда | 0,02 | 0,01 | 0,002 |
| Головки (магнитные) записи | 0,26 | 0,18 | 0,13 |
| Датчики высоты | 7,5 | 3,397 | 1,67 |
| Датчики уровня жидкости | 3,73 | 2,6 | 1,47 |
| Датчики давления | 6,6 | 3,5 | 1,7 |
| Датчики температуры | 6,4 | 3,3 | 1,5 |
| Держатели плавких предохранителей | 0,1 | 0,02 | 0,008 |
| Диоды | 1,42 | 0,2 | 0,16 |
| » германиевые | 0,38 | 0,3 | 0,23 |
| » селеновые | 0,6 | 0,2 | 0,11 |
| » кремниевые | 0,25 | 0,2 | 0,15 |
| Диоды кремниевые карбидные | 0,55 | 0,02 | 0,009 |
| Диоды низкочастотные | 0,437 | 0,2 | 0,08 |
| Дроссели фильтров | 0,25 | 0,03 | 0,012 |
| » анодные | 0,031 | 0,02 | 0,009 |
| Дроссели низкой частоты | 0,28 | 0,175 | 0,07 |
| Дроссели с насыщением | 0,32 | 0,14 | 0,12 |
| » зарядные | 2,22 | 1,387 5 | 0,555 |
| Изоляция | 0,72 | 0,5 | 0,011 |
| Изоляторы | 0,08 | 0,05 | 0,03 |

*Продолжение табл. 4.5*

| Элементы | Значения интенсивности отказов λ, 1/ч $10^{-6}$ | | |
|---|---|---|---|
| | максимальное | среднее | минимальное |
| Инверторы | 60 | 40 | 10,7 |
| Конденсаторы бумажные | 0,034 | 0,025 | 0,016 |
| Конденсаторы керамические | 0,213 | 0,1 | 0,063 |
| Конденсаторы масляные | 0,48 | 0,3 | 0,12 |
| » смоляные | 0,132 | 0,075 | 0,018 |
| Конденсаторы тантановые | 0,83 | 0,6 | 0,27 |
| Конденсаторы фарфоровые | 1,02 | 0,09 | 0,04 |
| Конденсаторы постоянной емкости: | | | |
| до 600 В | 0,018 | 0,01 | 0,001 |
| свыше 600 В | 0,486 | 0,2 | 0,02 |
| свыше 1000 В | 2,385 | 1,325 | 0,132 5 |
| Конденсаторы переменной емкости | 0,28 | 0,162 5 | 0,09 |
| Конденсаторы переменной емкости керамические | 0,35 | 0,155 | 0,08 |
| Катушки | 0,088 | 0,05 | 0,038 |
| » дроссельные | 0,1 | 0,02 | 0,01 |
| Катушки обмоток моторов | 0,045 | 0,03 | 0,01 |
| Катушки высокой частоты | 0,05 | 0,01 | 0,005 |
| Катушки настроечные | 0,285 8 | 0,15 | 0,014 2 |
| » индуктивности | 0,031 | 0,02 | 0,011 |
| Катушки высокого напряжения | 0,73 | 0,40 | 0,07 |
| Катушки соленоидные | 0,091 | 0,04 | 0,02 |
| Клапаны | 8,0 | 5,1 | 2,0 |
| » впускные | 5,33 | 3,4 | 1,33 |
| » дренажные | 8,94 | 5,7 | 2,24 |
| Клапаны дренажные и обратные | 15,31 | 5,7 | 3,41 |
| Клапаны контрольные | 19,8 | 8,5 | 1,68 |
| » ножевые | 7,4 | 4,6 | 1,08 |
| » обратные | 14,1 | 5,7 | 3,27 |
| » перепускные | 8,13 | 5,88 | 1,41 |
| Клапаны последовательного действия | 8,1 | 4,6 | 2,1 |
| Клапаны предохранительные | 14,8 | 10,3 | 7,9 |
| Клапаны разгрузочные | 19,0 | 10,8 | 1,97 |
| » резервные | 10,8 | 6,88 | 2,7 |
| » трехходовые | 7,41 | 4,6 | 1,87 |
| Клапаны четырехходовые | 7,22 | 4,6 | 1,81 |
| Лампы | 35,0 | 8,625 | 3,45 |
| » накаливания | 32,0 | 8,0 | 5,2 |
| Лампы неоновые тлеющего разряда | 18,8 | 10,25 | 4,5 |

*Продолжение табл. 4.5*

| Элементы | Значения интенсивности отказов λ, 1/ч $10^{-6}$ | | |
|---|---|---|---|
| | максимальное | среднее | минимальное |
| *Лампы электронные:* | | | |
| одиночный диод | 2,2 | 0,8 | 0,24 |
| *двойной диод* | 1,04 | 0,6 | 0,32 |
| двойной диод связанный | 1,89 | 1,0 | 0,38 |
| триод | 2,26 | 1,3 | 0,07 |
| двойной триод | 1,74 | 1,0 | 0,52 |
| двойной триод связанный | 3,88 | 2,0 | 1,17 |
| тетрод | 2,9 | 1,6 | 0,88 |
| тетрод, усилитель мощности | 40 | 20 | 12 |
| тиратрон малой мощности | 15,0 | 6,0 | 3,5 |
| стабилизатор напряжения | 7,1 | 0,35 | 0,13 |
| пентод | 2,8 | 1,6 | — |
| клистрон | 6,0 | 3,0 | — |
| магнетрон | 350 | 150 | 7 |
| магнистрон с подстройкой | 5500 | 3000 | 45 |
| приемные газонаполненные | 6,5 | 3,9 | — |
| импульсные генераторные | 43 | 30 | 2 |
| Лампы сверхминиатюрные· | | | |
| диод | 2,2 | 1,1 | — |
| двойной диод | 1,7 | 0,85 | — |
| триод | 2,91 | 1,75 | — |
| двойной триод | 2,29 | 1,39 | 0,91 |
| двойной триод связанный | 4,31 | 2,6 | 0,69 |
| тиратрон | 4,41—11,05 | 2,6—6,5 | 0,79—1,95 |
| Лампы приемопередающие | 7,93 | 5,0 | 2,1 |
| Муфты | 1,1 | 0,4 | 0,06 |
| Муфты электромагнитные | 0 93 | 0,6 | 0,95 |
| Муфты предохранительные фрикционные | 0,94 | 0,3 | 0,07 |
| Муфты соединенные управления | 3,21 | 1,64 | 0,065 |
| Муфты соединенные вращения | 0,049 | 0,025 | 0,001 |
| Манометры | 7,8 | 4,0 | 0,135 |
| Магниты | 7,11 | 5,65 | 2,02 |
| Монтаж (между арматурой) | 0,12 | 0,015 | 0,008 |
| Накопители | 13,7 | 5,1 | 0,35 |
| Оси | 0,62 | 0,35 | 0,15 |

*Продолжение табл. 4.5*

| Элементы | Значения интенсивности отказов $\lambda$, 1/ч $10^{-6}$ | | |
|---|---|---|---|
| | максимальное | среднее | минимальное |
| Панели электронных ламп | 0,009 | 0,005 | 0,002 |
| Переключатели | 0,14 | 0,05 | 0,009 |
| Переключатели кулачковые | 0,12 | 0,075 | 0,048 |
| Переключатели заблокированные | 1,0 | 0,5 | 0,25 |
| Переключатели кнопочные | 0,11 | 0,063 | 0,043 |
| Переключатели поворотные | 0,66 | 0,175 | 0,118 |
| Переключатели с приводом от двигателя | 0,292 | 0,19 | 0,128 |
| Переключатели чувствительные *большие* | 0,072 | 0,045 | 0,121 |
| Переключатели чувствительные малые | 0,124 | 0,06 | 0,045 |
| Переключатели плунжерные | 0,112 | 0,054 | 0,041 |
| Поршни гидравлические | 0,35 | 0,2 | 0,08 |
| Потенциометры | 12,5 | 3,0 | 0,7 |
| Потенциометры угольные | 0,75 | 0,25 | 0,1 |
| Потенциометры смешанные | 0,3 | 0,1 | 0,04 |
| Потенциометры счетно-решающих механизмов | 14,7 | 5,0 | 1,18 |
| Потенциометры со специальным профилем | 15,7 | 7,0 | 4,4 |
| Потенциометры с приводом от двигателя | 17,6 | 5,49 | 1,71 |
| Предохранители проволочные | 0,83 | 0,50 | 0,38 |
| Преобразователи | 45 | 30 | 20 |
| Преобразователи напряжения | 52,2 | 35,0 | 23,2 |
| Прокладки (шайбы) | 0,015 | 0,001 2 | 0,000 5 |
| Пружины | 0,221 | 0,113 | 0,004 |
| Пружины калиброванные | 0,42 | 0,22 | 0,009 |
| Пружины простые возвратные | 0,022 | 0,012 | 0,001 |
| Пускатели | 16,1 | 10,0 | 3,03 |
| Регуляторы | 5,54 | 2,14 | 0,7 |
| Регуляторы расхода жидкости или давления | 5,54 | 2,14 | 0,7 |
| Регуляторы давления и расхода гелия | 5,26 | 2,03 | 0,65 |
| Регуляторы расхода жидкого кислорода | 7,78 | 3,00 | 0,96 |
| Регуляторы расхода сжатого воздуха | 6,21 | 2,4 | 0,77 |

| Элементы | Значения интенсивности отказов λ, 1/ч $10^{-6}$ | | |
|---|---|---|---|
| | максимальное | среднее | минимальное |
| Реле электромагнитные | 0,5 | 0,3 | 0,11 |
| » общего назначения | 0,48 | 0,25 | 0,1 |
| Реле с соленоидными катушками | 0,81 | 0,5 | 0,3 |
| Реле герметически закрытые | 0,19 | 0,04 | 0,02 |
| Реле малогабаритные | 0,54 | 0,25 | 0,145 |
| » миниатюрные | 0,25 на контакт | 0,06 на контакт | 0,03 на контакт |
| » миллисекундные | 0,84 на контакт | 0,44 на контакт | 0,18 на контакт |
| Реле миниатюрные мощные | 4,1 на контакт | 0,3 на контакт | 0,15 на контакт |
| Реле высокочувствительные | 0,89 на контакт | 0,9 на контакт | 0,22 на контакт |
| Реле задержки времени | 0,75 на контакт | 0,39 на контакт | 0,16 на контакт |
| Решающие устройства | 0,07 | 0,04 | 0,02 |
| Реостаты | 0,19 | 0,13 | 0,07 |
| Светофильтры | 3,0 | 0,345 | 0,14 |
| Секторы зубчатые | 1,8 | 0,913 | 0,051 |
| Сервомеханизмы | 3,4 | 2,0 | 1,1 |
| Сельсины | 0,61 | 0,35 | 0,09 |
| Сельсины решающих устройств | 1,94 | 1,11 | 0,29 |
| Соединения гибкие | 1,348 | 0,688 | 0,027 |
| » жесткие | 0,049 | 0,025 | 0,001 |
| Соединения гидравлические | 2,01 | 0,03 | 0,012 |
| Соединения механические | 1,96 | 0,02 | 0,011 |
| Соединения пневматические | 1,15 | 0,04 | 0,021 |
| Соединения паяные | 0,005 | 0,004 | 0,000 2 |
| » шарнирные | 4,0 | 2,9 | 0,8 |
| Соединители электрические | 0,47 | 0,02 | 0,03 |
| Соединители коаксиальные | 0,365 | 0,213 | 0,06 |
| Соединители межкаскадные | 0,94 | 0,4 | 0,06 |
| Соединители центральные | 4,7 | 2,0 | 0,03 |
| Стабилизаторы напряжения угольные | 13,16 | 9,65 | 6,09 |
| Стабилизаторы магнитных усилителей | 0,69 | 0,5 | 0,37 |
| Счетчики | 5,25 | 4,2 | 3,5 |
| » электрические | 5,77 | 1,38 | 1,35 |
| Схемы блоков промежуточной частоты | 1,06 | 0,4 | 0,26 |

*Продолжение табл. 4.5*

| Элементы | Значения интенсивности отказов $\lambda$, $1/ч \cdot 10^{-6}$ | | |
|---|---|---|---|
| | максимальное | среднее | минимальное |
| Схемы блоков высокой частоты | 2,43 | 1,4 | 0,37 |
| Схемы генераторов импульсных высокого напряжения | 4,92 | 3,08 | 1,23 |
| Схемы задержки импульсов | 0,96 | 0,6 | 0,24 |
| Тахометры | 0,55 | 0,3 | 0,25 |
| Тензометры | 15,0 | 11,6 | 1,01 |
| Теплообменники | 18,6 | 15,0 | 2,21 |
| Термореле | 1,0 на контакт | 0,4 *на контакт* | 0,12 на контакт |
| Термовыключатели | 0,021 на контакт | 0,161 на контакт | 0,114 на контакт |
| Термисторы | 1,4 | 0,6 | 0,2 |
| Термостаты | 0,14 | 0,06 | 0,02 |
| Трансформаторы | 0,62 | 0,2 | 0,07 |
| Трансформаторы звуковой частоты | 0,04 | 0,02 | 0,01 |
| Трансформаторы промежуточной частоты | 0,31 | 0,1 | 0,035 |
| *Трансформаторы развязывающие* | 0,093 | 0,03 | 0,011 |
| Трансформаторы выходные | 2,08 | 1,04 | 0,46 |
| Трансформаторы силовые | 2,08 | 1,04 | 0,46 |
| Трансформаторы силовые низкого напряжения | 0,6 | 0,3 | 0,13 |
| Трансформаторы силовые высокого напряжения | 1,88 | 0,94 | 0,407 |
| Трансформаторы импульсные высокого напряжения | 0,235 | 0,15 | 0,065 |
| Трансформаторы импульсные низкого напряжения | 0,235 | 0,15 | 0,065 |
| Трансформаторы прецизионные | 0,814 | 0,26 | 0,092 |
| Трансформаторы регулировочные | 0,31 | 0,1 | 0,035 |
| Транзисторы | 1,02 | 0,61 | 0,38 |
| » *усилители* | 0,84 | 0,5 | 0,31 |
| Транзисторы германиевые | 1,91 | 0,9 | 0,6 |
| Транзисторы переключатели | 0,71 | 0,4 | 0,1 |
| Умформеры | 5,46 | 2,8 | 1,15 |
| Уплотнения вращающиеся | 1,12 | 0,7 | 0,25 |
| Уплотнения скользящие | 0,92 | 0,3 | 0,11 |

*Продолжение табл. 4.5*

| Элементы | Значения интенсивности отказов $\lambda$, $1/ч \cdot 10^{-6}$ | | |
|---|---|---|---|
| | максимальное | среднее | минимальное |
| Фильтры электрические | 3,0 | 0,345 | 0,14 |
| » механические | 0,8 | 0,3 | 0,045 |
| » световые | 0,8 | 0,2 | 0,12 |
| Цилиндры | 0,81 | 0,097 | 0,005 |
| Цилиндры гидравлические | 0,12 | 0,008 | 0,005 |
| Цилиндры пневматические | 0,013 | 0,004 | 0,002 |
| Штепсельные разъемы | 0,7 | 0,174 | 0,1 |
| Шарниры универсальные | 12,0 | 2,5 | 0,12 |
| Шланги | 3,22 | 2,0 | 0,05 |
| » давления | 5,22 | 3,94 | 0,157 |
| Электродвигатели | 7,5 | 0,625 | 0,15 |
| Электродвигатели вентиляторов | 5,5 | 0,2 | 0,05 |
| Электродвигатели шаговые | 0,71 | 0,37 | 0,22 |
| Электродвигатели (сервомоторы) | 0,35 | 0,23 | 0,11 |
| Элементы нагревательные | 0,04 | 0,02 | 0,01 |

ГЛАВА II

# ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ПРИБОРЫ

## § 5. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

О температуре среды судят по изменению какого-либо физического свойства (линейные размеры, электрическое сопротивление и др.) *термометрического вещества, находящегося* в тепловом равновесии со средой, температура которой измеряется. Однозначная зависимость, существующая между физическим свойством тела и его температурой, используется в чувствительных элементах автоматических устройств (регуляторах, сигнализаторах и т. п.) для получения необходимой информации о температуре тела. Градуировка шкалы прибора для измерения температуры, воспринимающего изменение зависящего от температуры физического свойства тела, может быть осуществлена непосредственно в единицах температуры.

*В Международной системе единиц в* качестве основной температурной шкалы принята абсолютная термодинамическая шкала (шкала Кельвина), определяемая теоретически на основе законов термодинамики и не зависящая от природы каких-либо термометрических веществ. Температуру по этой шкале измеряют в градусах Кельвина (К) и обозначают буквой *T*. Для практических измерений температуры (и градуировки приборов) рекомендуется Международная практическая температурная шкала, по которой температура измеряется в градусах Цельсия (°С) и обозначается *буквой t. Справедливо соотношение*

$$t°\text{C} = T\ \text{K} - 273{,}15. \qquad (5.1)$$

В зависимости от используемых физических свойств, зависящих от температуры тел, различают следующие типы чувствительных элементов температуры:

— *термометрические*, или *жидкостно-стеклянные элементы*, основанные на различии коэффициентов теплового расширения жидкости и стекла;

— *биметаллические элементы*, которые основаны на различии коэффициентов теплового расширения двух спаянных металлических пластин;

— *дилатометрические элементы*, в которых используется различие теплового расширения трубки и вставленного в нее стержня, выполненных из разнородных металлов или сплавов;

— *термоманометрические элементы*, которые основаны на изменении давления жидкости, пара или газа в замкнутом объеме при изменении их температуры;

— *термометрические сопротивления*, в которых используется зависимость электрического сопротивления металла от его температуры;

— *термоэлектрические элементы*, основанные на изменении в зависимости от температуры термоэлектродвижущей силы, возникающей при нагревании спая двух разнородных металлов или сплавов;

— *фотоэлектрические элементы*, основанные на изменении в зависимости от температуры силы электрического тока, возникающего при освещении фотоэлемента потоком излучения нагретого тела.

Приборы, предназначенные для измерения температуры до 500—600°С, принято называть *термометрами*, для измерения более высоких температур — *пирометрами*.

Термометры, использующие жидкостно-стеклянные, биметаллические и дилатометрические чувствительные элементы, носят обобщенное название термометров расширения. Термометры с термоманометрическими чувствительными элементами называют манометрическими термометрами, с термометрическими сопротивлениями — электрическими термометрами сопротивления. Приборы с термоэлектрическими элементами носят название термоэлектрических пирометров. Приборы, основанные на измерении лучистой энергии, излучаемой нагретым телом, носят название пирометров излучения.

Интервалы температур, в которых возможно применение тех или иных приборов, следующие:

для термометров расширения — от —200 до +500°С;

для манометрических термометров — от —130 до +550°С;

для термометров сопротивления — от —200 до +500°С;

для термоэлектрических пирометров — от +200 до +1600°С;

для пирометров излучения — от +400°С до практически неограниченных значений.

**Чувствительные элементы, основанные на тепловом расширении тел.** Принцип действия этого класса чувствительных элементов основан на различии коэффициентов теплового расширения двух различных веществ.

*Жидкостно-стеклянный*, или *жидкостный* чувствительный элемент состоит из стеклянного капилляра, заполненного жидкостью, и обычно применяется в измерительных приборах. Шкала прибора может быть нанесена непосредственно на толстостенный капилляр (палочные термометры) или вложена вместе с капилляром в стеклянную оболочку (термометры с вложенной шкалой). Для заполнения капилляров применяются ртуть, спирт, пентан, толуол и другие жидкости. Наибольшее распространение в качестве заполнителя имеет ртуть; иные жидкости применяются главным образом в случае измерения низких температур (табл. 5.1, 5.2).

*Таблица 5.1*

**Термометрические стекла**

| Наименование стекла | Верхний температурный предел применения, °С |
|---|---|
| Типа 59 | 500 |
| Марки 600 | 600 |
| Плавленое кварцевое стекло | 1000 |

*Таблица 5.2*

**Термометрические жидкости**

| Вещество | Пределы применения, °С | |
|---|---|---|
| | нижний | верхний |
| Ртуть | —35 | +750 |
| Толуол | —90 | +100 |
| Спирт этиловый (96%) | —110 | +75 |
| Пентан | —190 | +25 |
| Технический пентан | —190 | +20 |
| Гелий | +30 | +1000 |

Жидкостно-стеклянные термометры могут быть показывающими, применяемыми для целей теплотехнического контроля, или контактными (рис. 5.1, *а*), применяемыми в системах автоматической сигнализации.

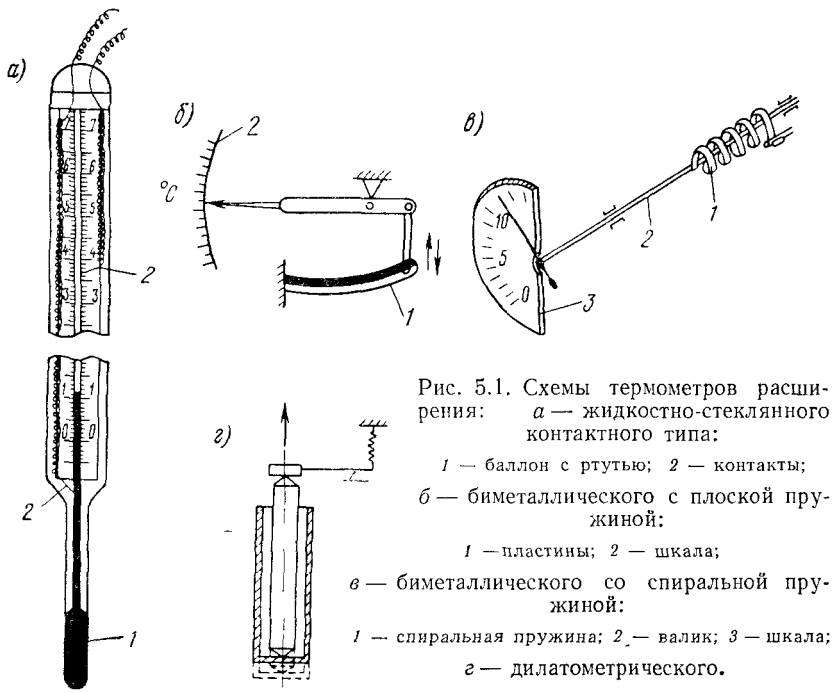



Рис. 5.1. Схемы термометров расширения: *а* — жидкостно-стеклянного контактного типа:

*1* — баллон с ртутью; *2* — контакты;

*б* — биметаллического с плоской пружиной:

*1* — пластины; *2* — шкала;

*в* — биметаллического со спиральной пружиной:

*1* — спиральная пружина; *2* — валик; *3* — шкала;

*г* — дилатометрического.

Достоинствами жидкостно-стеклянных элементов являются их небольшая стоимость и сравнительно высокая точность. Их недостатки: неудобство отсчета показаний, сложность (практически невозможность) дистанционной передачи и регистрации показаний, хрупкость, инерционность.

*Биметаллический* чувствительный элемент состоит из плоской (рис. 5.1, *б*) или спиральной (рис. 5.1, *в*) пружины, спаянной из двух пластин, изготовленных из разных металлов. При нагревании обе пластины удлиняются неодинаково, что вызывает изгиб плоской или скручивание спиральной пружины в зависимости от измеряемой температуры.

*Дилатометрический* чувствительный элемент состоит из трубки, верхний конец которой закреплен неподвижно, и расположенного в ней стержня, прижатого пружиной ко дну трубки (рис. 5.1, *г*).

Материалом трубки обычно служит латунь, материалом стержня — сплав инвар с малым коэффициентом теплового расширения. При нагревании длина трубки относительно стержня изменяется в зависимости от температуры.

Биметаллические и дилатометрические чувствительные элементы находят применение в измерительных органах регуляторов температуры и в биметаллических и дилатометрических термометрах. Их достоинства — удобство дистанционной передачи показаний, возможность регистрации показаний; недостатком является невысокая точность.

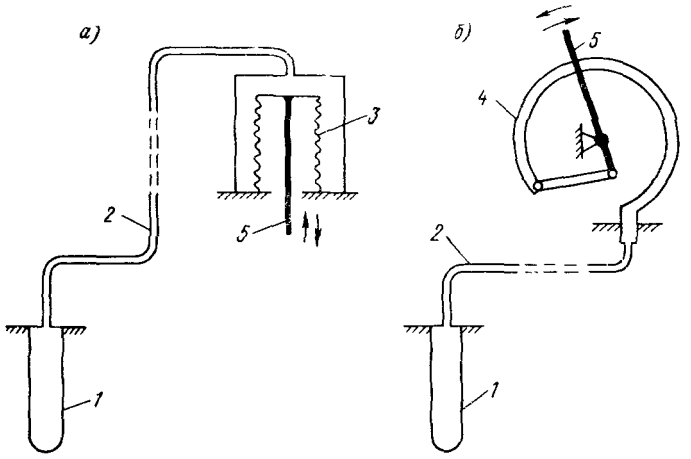



Рис. 5.2. Схемы термоманометрических чувствительных элементов: *а* — с сильфонным вторичным прибором; *б* — с вторичным прибором в виде спиральной трубчатой пружины.

*1* — ампула с наполнителем, *2* — капилляр, *3* — сильфон, *4* — спиральная трубка; *5* — выходной рычаг.

**Термоманометрические чувствительные элементы.** Принцип действия термоманометрических чувствительных элементов основан на зависимости давления термометрического вещества от его температуры. Термоманометрический элемент состоит из ампулы, заполненной термометрическим веществом, капилляра и манометра, в качестве которого служит сильфон (рис. 5.2, *а*) либо спиральная трубчатая пружина (рис. 5.2, *б*), связанные с выходным рычагом. При нагревании ампулы давление термометрического вещества возрастает, ввиду чего перемещается донышко сильфона либо раскручивается трубчатая пружина, передвигая выходной рычаг. Соединив рычаг с указательной стрелкой на шкале, градуированной в единицах температуры, получим манометрический термометр.

По роду термометрического вещества, заполняющего ампулу, различают жидкостные, паровые и газовые манометрические термометры.

Достоинствами *жидкостных* термоманометрических элементов, ампула и капилляр которых заполняются ртутью или ксилолом, являются практически линейная зависимость давления от температуры и способность развивать большие перестановочные усилия, недостатком их является значительная инерционность. При наполнении ртутью эти приборы пригодны для измерения температур от —30 до 550°С.

В *паровых* (иначе — *парожидкостных*) приборах ампула заполняется низкокипящей жидкостью (*хлорметил, хлорэтил, ацетон, бензол*) и ее парами, а ка-

пилляр и манометр — вспомогательной жидкостью (смесь глицерина с водой или спиртом), служащей для передачи давления паров от ампулы к манометру. Тем самым уменьшается инерционность прибора и исключается влияние на его работу температуры среды, окружающей капилляр. Однако эти приборы имеют более узкий интервал измеряемых температур (от 0 до 200°С) и нелинейную зависимость давления от температуры (и, как следствие, — неравномерную шкалу).

*Газовые* термоманометрические чувствительные элементы, заполняемые азотом или гелием, имеют широкий интервал измеряемых температур (от —130 до 550°С) и линейную зависимость между давлением и температурой, но несколько более инерционны, нежели парожидкостные.

Термоманометрические чувствительные элементы находят применение на судах в измерительных органах автоматических регуляторов и сигнализаторов температуры и в манометрических термометрах. Они удобны для дистанционной передачи и регистрации показаний, их недостатки — сравнительно невысокая точность, большая инерционность, непригодность для измерения высоких температур.

Технические характеристики манометрических термометров приведены в табл. 5.3, 5.4.

*Таблица 5.3*

**Основные данные паровых манометрических термометров**

| Рабочая жидкость | Точка кипения, °С | Пределы измерений, °С | | Возможная длина капилляра, м | Характер шкалы |
|---|---|---|---|---|---|
| | | от | до | | |
| Хлористый метил | —24,1 | 0 | 125 | До 60 | Неравномерная, расширяющаяся к верхнему пределу |
| Хлористый этил | 13,1 | 20 | 120 | | |
| Ацетон | 56,5 | 50 | 200 | | |

**Термометрические сопротивления.** Принцип действия термометрического сопротивления основан на изменении электрического сопротивления в зависимости от температуры. Для измерения температуры среды в нее помещается проводник, через который пропускается ток; по изменению сопротивления протеканию тока судят о температуре проводника и, следовательно, среды. Термометрическим сопротивлением обычно служит тонкий металлический проводник, изготавливаемый из платины (для измерения температур в интервале от —120 до +550°С) или меди (для измерения температур до +150°С). Проводник наматывается на каркас из изоляционного теплостойкого материала (для платиновых элементов — обычно из слюды) и помещается в защитный чехол. Токоподводящие вводы для платиновых чувствительных элементов изготавливают из серебра или платины, для медных — из луженой меди.

**Термометры сопротивления.** Термометр сопротивления кроме чувствительного элемента содержит источник тока, пропускаемого через термосопротивление, и прибор для измерения электрического сопротивления.

Основные технические характеристики чувствительных элементов термометров сопротивления приведены в табл. 5.5.

Для измерения электрического сопротивления применяют измерительные мосты и логометры. Измерительные мосты бывают уравновешенные и неуравновешенные.

Измерительные мосты. Схема *уравновешенного измерительного моста* на постоянном токе представлена на рис. 5.3. Перемещая движок реостата $R_3$, мост приводят в уравновешенное состояние, при котором нуль-галь-

*Таблица 5.4*

**Технические характеристики манометрических термометров**

| Наименование | | | Тип | Длина капилляра, м |
|---|---|---|---|---|
| Показывающие | | Без дополнительных устройств | ТПГ-180 | 4; 10; 16; 25; 40 |
| | | С сигнальным устройством | ТПГ-188 | 4; 10 |
| | | С пневматическим датчиком | ТПГ-189П | |
| Самопишущие | Для одного параметра | Без дополнительных устройств | ТСГ-710М<br>ТСГ-710чМ2 | 4; 10; 16; 25; 40 |
| | | С сигнальным устройством | ТСГ-718ПЭ | 4; 10 |
| | | С пневматическим датчиком | ТСГ-710П<br>ТСГ-710ПчМ | |
| | Для двух параметров | Без дополнительных устройств | ТСГ-720<br>ТСГ-720чМ | 4; 10; 16; 25; 40 |

Примечания.
1. Самопишущие приборы с индексом «ч» имеют привод диаграммы от часового механизма с восьмисуточным заводом, а остальные — от синхронного двигателя 220 В, 50 Гц, 12 В·А.
2. Время одного оборота диаграммы 24 ч.

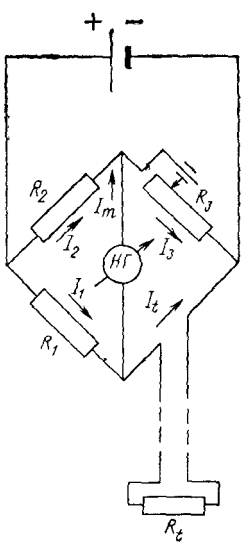



Рис. 5.3. Схема измерительного моста на постоянном токе.

$R_1$, $R_2$ — известные постоянные сопротивления; $R_3$ — известное изменяемое сопротивление; $R_t$ — измеряемое сопротивление, зависящее от температуры.

ванометр *НГ* показывает отсутствие тока в диагонали моста ($I_m = 0$). При этом токи в плечах моста $I_1 = I_t$, $I_2 = I_3$, и согласно закону Кирхгофа для электрических сетей

$$I_2 R_2 - I_1 R_1 = 0, \quad I_3 R_3 - I_t R_t = 0, \qquad (5.2)$$

откуда

$$R_3 = \frac{R_2}{R_1} R_t = \text{const}\, R_t. \qquad (5.3)$$

Значение $R_3$ пропорционально сопротивлению $R_t$, однозначно зависящему от температуры, что позволяет отградуировать реохорд $R_3$ в единицах температуры. Условие равновесия моста согласно (5.3) не зависит от колебаний напряжения источника $u_{ab}$, что обеспечивает высокую точность измерений.

Уравновешивание моста обычно осуществляется автоматически, для чего движок реостата передвигается под воздействием отклонения стрелки нульгальванометра.

На судах применяют термометры сопротивления с автоматическим уравновешенным мостом: МПР2, ММП-02Т, МПР-12Т и др.

*Неуравновешенный измерительный мост* имеет такую же принципиальную схему, которая показана на рис. 5 3. Если мост не уравновешен, то согласно закону Кирхгофа для электрических сетей имеем

$$\left.\begin{aligned} I_1 - I_{\text{м}} + I_t, \quad I_{\text{м}} + I_2 = I_3, \quad R_2 I_2 - I_{\text{м}} R_{\text{м}} - I_1 R_1 = 0, \\ I_t R_t - I_3 R_3 - I_{\text{м}} R_{\text{м}} = 0, \quad R_2 I_2 + R_3 I_3 = u_{ab}, \end{aligned}\right\} \qquad (5.4)$$

откуда

$$I_{\text{м}} = \frac{1}{k} u_{ab} (R_t R_2 - R_1 R_3), \qquad (5\ 5)$$

где

$$k = R_{\text{м}} (R_2 + R_3)(R_1 + R_t) + R_2 R_3 (R_1 + R_t) + R_1 R_t (R_2 + R_3) \qquad (5\ 6)$$

Согласно (5.5), (5.6) при постоянном напряжении источника $u_{ab}$ сила тока в диагонали моста $I_{\text{м}}$ есть функция измеряемого сопротивления $R_t$.

Достоинства неуравновешенного измерительного моста в сравнении с уравновешенным — простота и надежность. Однако погрешность у него выше, так как на точность показаний влияют колебания напряжения источника.

*Логометры.* Логометр (рис. 5.4) имеет две скрещенные рамки с сопротивлениями $R_1$ и $R_2$, ток к которым подводится через безмоментные пружинки. Рамки вращаются между сердечником и полюсами $N$ и $S$ постоянного магнита. Они жестко скреплены между собой, а электрически включены так, что моменты, возникающие в них при прохождении по ним тока, направлены навстречу друг другу. Момент, развиваемый каждой рамкой, пропорционален силе проходящего через нее тока и магнитной индукции. Ток, идущий от источника, разветвляется в точке $A$ и проходит левую цепь с сопротивлениями $R_3 + R_1$ и правую с сопротивлениями $R_t + R_4 + R_2$. При равенстве сопротивлений этих цепей силы тока в обеих рамках равны и рамки находятся в равновесии.

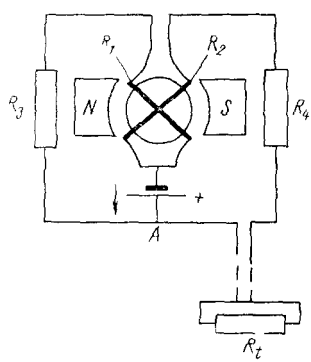



Рис. 5.4. Схема термометра сопротивления с логометром.

При изменении $R_t$ сила тока в правой и левой цепях различна, моменты рамок не равны, что вызывает поворот рамок. Но воздушный зазор между сердечником и полюсами магнита в логометре увеличивается от середины полюсных наконечников к их краям, а магнитная индукция соответственно уменьшается. Поэтому при повороте рамок больший момент уменьшается, а меньший увеличивается до тех пор, пока моменты, при некотором угле поворота, не сравняются и рамки не остановятся. Угол поворота рамок будет, таким образом, функцией сопротивления $R_t$.

На судах находят применение логометры серий ЛВТ, ЛМП и др.

Электрические термометры сопротивления применяются на судах в системах теплотехнического контроля и автоматического регулирования. Выпускаются комплекты, рассчитанные на измерение температуры во многих точках с одним или двумя вторичными приборами.

Достоинствами термометров сопротивления являются их весьма высокая точность, а также удобство дистанционной передачи, автоматической регистрации и преобразования выходных сигналов. Их недостатки — сложность (в сравнении с манометрическими и жидкостно-стеклянными), невозможность замера высоких температур (в сравнении с пирометрами), необходимость иметь источник питания.

*Таблица 5.5*

**Технические характеристики и область применения термометров сопротивления**

| Тип | Пределы измерений, °С | Монтажная* длина $l$, мм | Условное давление, кгс/см² | Материал защитной арматуры | Исполнение** | Область применения и дополнительные данные |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Термометры сопротивления платиновые | | | | |
| ТСП-8040 гр. 21 кл. II | —200÷÷+500 | 160; 200; 300; 400; 800; 1250 и др. | 160 | Сталь Х18Н10Т 0Х18Н10Т | Герметичное водозащищенное | Для установки в трубопроводах и аппаратах |
| ТСП-8040 гр. 22 кл. II | —50÷÷+500 | 60; 80; 100; 120; 160; 200; 250; 320 | 160 | | | Для установки в газоходах, воздуховодах, находящихся под давлением |
| ТСП-8040 двойной кл. II | —50÷÷+150 | 60; 80; 100; 120; 160; 200; 250; 320 | 64 | | То же | Для установки в трубопроводах, в аппаратах |
| ТСП-8040 гр. 21 кл. II | —200÷÷500 | 80; 100; 120; 160; 200; 250 | 250 | Сталь Х18Н10Т 0Х18Н10Т | То же | То же |
| ТСП-8040 гр. 22 кл. II | —50÷÷+300 | 80; 100; 120; 160; 200; 250 | 250 | Сплав 3М | То же | Морская вода, электролит, кислород |
| ТСП-8040 гр. 21 двойной | —50÷÷+150 | 80; 100; 120; 160; 200; 250 | 100 | Бронза Бр.АМц9-2 | То же | Для установки в трубопроводах воздуха, морской воды и др. |
| | | Термометры сопротивления платиновые | | | | |
| ТСП-8041 гр. 21 кл. II | —50÷÷+300 | 32; 40; 50; 60; 80; 100; 120 и др. | 100 | Сталь Х18Н10Т 0Х18Н10Т | Герметичное водозащищенное | Пресная вода, воздух |
| ТСП-8042 гр. 21 и 22 кл. I и II | —50÷÷+400 | 500; 630; 800; 870; 1000; 1250; 1425; 1470; 1600; 2000 | 250 | Сталь Х18Н10Т 0Х18Н10Т | То же | Вода высокои чистоты |
| ТСП-8043 гр. 21 и 22 кл. III | —50÷÷+120 | 20; 25; 32; 40; 50; 60; 80; 100; 120; 160; 200 и др. | 6 | Медь М1 | То же | Масло в подшипниках |
| ТСП-8044 гр. 21 кл. II | —50÷÷+400 | 80; 100; 120; 160; 200 | 4 | Сталь Х18Н10Т 0Х18Н10Т | То же | Для измерения температур стенок трубопроводов |
| ТСП-8045 гр. 21 кл. III | —50÷÷+75 | 40 | 3 | Сталь Х18Н10Т | | Для измерения температуры воздуха, паров масла |

* Монтажная длина $l$ определяется как расстояние от опорной плоскости штуцера до рабочего конца чувствительного элемента.
** Устанавливаемые на судах приборы должны удовлетворять ГОСТ 13801—74 «Термометры сопротивления судовые»

**Термоэлектрические чувствительные элементы.** Принцип действия термоэлектрических чувствительных элементов основан на свойстве разнородных проводников при нагревании их спая создавать термоэлектродвижущую силу (термо-э.д.с.). Эти проводники, называемые термоэлектродами, и образуют термоэлектрический чувствительный элемент, или *термопару* (рис. 5.5, *а*).

Генерируемая термопарой термо-э.д.с. зависит от температуры горячего спая (рабочий конец чувствительного элемента) и температуры холодного спая (место подключения прибора для измерения э.д.с.). Генерируемая э.д.с. не меняется при введении в цепь дополнительного проводника, если только концы его находятся при одинаковой температуре. Зависимость генерируемой термопарой э.д.с. от температуры горячего спая позволяет по величине термо-э.д.с. судить о температуре среды, омывающей термопару. Зависимость э.д.с. от температуры холодного спая требует стабилизировать температуру холодного спая либо компенсировать погрешности, возникающие из-за изменения этой температуры (но эта температура, конечно, меньше меняется, чем температура в рабочей точке, и поэтому меньше влияет на показания).

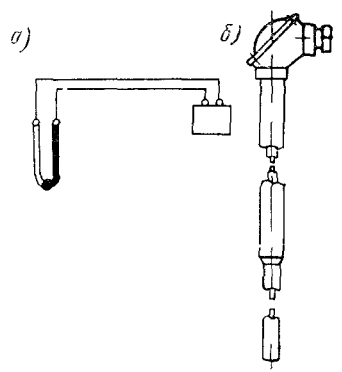



Рис. 5.5. Схема (*а*) и внешний вид (*б*) термопары.

Различают термопары из благородных металлов (платинородий и платина), применяемые для измерения температур до 1600°С, и из неблагородных металлов (хромель и алюмель, хромель и копель, железо и копель, медь и копель и др.), пригодные для измерения температур до 500—1000°С, но дающие бо́льшие значения термо-э.д.с. Выходной координатой термоэлектрического чувствительного элемента является электродвижущая сила порядка 1—5 мВ.

Термоэлектроды, образующие термопару, изолируются друг от друга и вставляются в защитную трубку (рис. 5.5, *б*). Горячий спай либо изолируется от защитной трубки, либо вваривается в ее дно. Концы термоэлектродов выводятся из защитной трубки для подсоединения цепи измерительного прибора.

Технические характеристики различных термопар приведены в табл. 5.6, 5.7.

Термоэлектрические чувствительные элементы применяются в измерительных органах систем автоматического регулирования, автоматической защиты и сигнализации, а также в термоэлектрических пирометрах.

**Термоэлектрические пирометры.** Чувствительным элементом термоэлектрического пирометра является термопара. Вторичными приборами служат измерители э. д. с. — пирометрические милливольтметры и потенциометры.

Пирометрические сети. В местах подключения к термоэлементу измерительного прибора, как отмечалось, важно поддерживать постоянную температуру холодных спаев. Для этого, прежде всего, холодные спаи нужно вынести подальше от горячего спая. С этой целью к термоэлементу присоединяются термоэлектродные, или, иначе, компенсационные провода, изготовленные из того же (или из эквивалентного термоэлектрически) материала, что и термоэлектроды. Для поддержания постоянной температуры на концах этих проводов, где подключается измерительный прибор, применяются различные стабилизаторы температуры — *термостаты*.

В простейшем случае термостат представляет собой металлический чехол, заполненный теплоизоляционным материалом. В другом случае это — неуравновешенный мост, в одну диагональ которого подводится постоянное напряжение питания, а в другую включена термопара с вторичным измерительным прибором. Одно из плеч моста представляет собой никелевое сопротивление, меняющееся при изменении температуры. Ввиду этого в измерительной диагонали моста появляется напряжение, компенсирующее возникающие из-за нарушения температуры холодного спая изменения э. д. с. термопары.

*Таблица 5.6*

**Характеристики термопар**

| Тип | Материалы термоэлектродов | Пределы измерений, °С | |
|---|---|---|---|
| | | при длительном применении | при кратковременном применении |
| ТПП | Платинородий (10% родия)—платина | —20÷+1300 | 1600 |
| ТПР | Платинородий (30% родия)—платинородий (6% родия) | 300—1600 | 1800 |
| ТХА | Хромель—алюмель | —50÷+1000 | 1300 |
| ТХК | Хромель—копель | —50÷+600 | 800 |
| ТНС | Сплав НК—СА | 300—1000 | — |

Наконец, в качестве термостатов холодных спаев термопар находят применение автоматические регуляторы температуры, в частности, двухпозиционные регуляторы с биметаллическими чувствительными элементами.

Пирометрические милливольтметры. Принцип действия милливольтметра, или гальванометра, основан на взаимодействии рамки, по которой идет ток, с магнитным полем постоянного магнита. Рамка включена в сеть пирометра; термоэлектродвижущая сила вызывает в рамке ток силой 0,5—1 мА.

Момент вращения, развиваемый рамкой, пропорционален напряженности магнитного поля и силе тока в рамке. Этому моменту противодействует момент упругих сил спиральных пружин (или растяжимых нитей), по которым к рамке подводится ток. При увеличении термо-э. д. с. возрастает ток в рамке и развиваемый ею момент, рамка поворачивается, преодолевая момент упругих сил, пока не установится равновесие. Напряженность магнитного поля при повороте рамки не изменяется, так как рамка вращается в радиальном магнитном поле (в кольцевом зазоре между железным сердечником и полюсами постоянного магнита). Поэтому угол поворота рамки (и связанной с нею стрелки) пропорционален силе тока в сети пирометра.

Чтобы сила тока была пропорциональна термо-э. д. с. и мало менялась из-за температурных изменений сопротивлений в сети пирометра, в том числе сопротивления термопары, собственное сопротивление милливольтметра, сравнительно мало подверженного температурным влияниям, должно быть относительно большим.

Технические характеристики милливольтметров приведены в табл. 5.8.

Автоматические потенциометры. Потенциометры (переменные сопротивления) позволяют измерять э. д. с. с помощью *компенсационного метода*, основанного на компенсации измеряемой э. д. с. известной разностью потенциалов.

Принципиальная схема простейшего потенциометра, в котором используется компенсационный метод измерения э. д. с., изображена на рис. 5.6. Э. д. с. нормального элемента $E_N$ и термопары $E_{AB}$ направлены навстречу друг другу. Движок реохорда $R$ перемещается до тех пор, пока нуль-гальванометр включенный в сеть пирометра, не покажет отсутствие тока. В этом случае э. д. с. $E_{AB}$, генерируемая термоэлементом, будет полностью компенсирована падением напряжения на участке *1—2*, которому (при $E_N = \text{const}$) однозначно соответствует сопротивление этого участка. Поскольку положение движка в момент отсчета показания соответствует определенному значению зависящей от температуры термо-э. д. с., шкала вдоль длины реохорда $R$ может быть отградуирована в единицах температуры. Существенно, что в момент отсчета в сети пирометра нет

*Таблица 57*

**Технические характеристики и область применения термопар ***

| Тип | Предел измерения °С | Монтажная длина l мм | Условное давление кгс/см² | Материал защитной арматуры | Показатель тепловой инерции τ с | Область применения |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ТХА 1072 | 400 | 630, 650, 775, 800, 1000, 1250, 1305, 1340, 1430, 1540, 1600, 1640, 1885, 2000, 2400, 2500, 2645, 3200 | 250 | Сталь 0Х18Н10Т | 2 | Для измерения температуры в установках с дистиллятом |
| ТХК 1072 | 400 | | 250 | Сталь 0Х18Н10Т | 2 | |
| ТХА 1072 | 600 | | 250 | Сталь 0Х18Н10Т | 5 | То же |
| ТХК 1072 | 600 | | 250 | Сталь 0Х18Н10Т | 5 | То же |
| ТХА 1072 | 600 | 80, 100, 120, 160 | 25 | Сталь Х18Н10Т | | Выхлопные газы |
| ТХК 1072 | 600 | 200, 250, 320 | 25 | Сталь Х18Н10Т | | То же |
| ТХА 1172 | 800 | 80, 100, 120, 160 | 100 | Сталь Х17Н13М2Т | 30 | Выхлопные газы, вода |
| ТХК 1172 | 600 | 200, 250, 320 | 100 | Сталь Х18Н10Т | 30 | Для установки в трубопроводах и аппаратуре |
| ТХА 1172 | 800 | 80, 100, 120, 160, 200, 250, 320 | 10 | Сталь Х17Н13М2Т | 3 | |
| ТХА 1172 | 600 | 50, 60, 80, 100 | 320 | Сталь Х19Н9Т | 2 | Для замера температуры газообразных сред, воды |
| ТХК 1172 | 600 | 120, 160, 200, 250 | 320 | Сталь Х19Н9Т | 2 | |
| ТХА 742 | 600 | 1500, 1800, 2260, 3300 | 100 | Сталь ЭП 302 | 3 | |
| ТХК 742 | 550 | 1500, 1800, 2260, 3300 | 100 | Сталь ЭП 302 | 3 | |
| ТХК 131Б | 400 | | 250 | Сталь 0Х18Н10Т | 2, 5 | Для установки внутри аппаратов с дистиллятом |

Устанавливаемые на судах приборы должны удовлетворять ГОСТ 1430—74 «Термометры термоэлектрические судовые»

*Таблица 5 9*

**Технические характеристики автоматических потенциометров и мостов**

| Тип прибора | Характеристика | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Погрешность показаний, % | Исполнение | Инерционность, °С | Напряжение питания, В | Частота питания, Гц |
| Мосты автоматические показывающие регулирующие | | | | | |
| МПР2 01 | ±0,5 | Водозащищенное | 2,5 | 127 | 50 |
| МПР2 02 | ±0,5 | То же | 2,5 | 127 | 50 |
| МПР 2 03 | ±0,5 | » | 2,5 | 127 | 50 |
| МПР2 04 | ±0,5 | » | 2,5 | 127 | 50 |
| МПР 12Т | ±0,5 | » | 2,5 | 127 | 50 |
| Мост автоматический показывающий самопишущий регулирующий | | | | | |
| МСРМ 127 | ±0,5 | Брызгозащищенное | 3 | 127 | 50 |
| Потенциометр автоматический показывающий регулирующий | | | | | |
| ППР2 | ±0,5 | Водозащищенное | 2,5 | 127 | 50 |
| Уравновешенные мосты автоматические показывающие сигнализирующие с дистанционной передачей показаний | | | | | |
| АМ140 01 | ±0,5 | Брызгозащищенное | 3,5, 8 | 220 | 400 |
| АМ140 03 | ±0,5 | То же | 3,5, 8 | 220 | 400 |
| АМ140 04 | ±0,5 | » | 3,5, 8 | 220 | 400 |
| АМ140-06 | ±0,5 | » | 3,5, 8 | 220 | 400 |
| АМ140 15 | ±0,5 | » | 3,5, 8 | 220 | 400 |

тока, поэтому на точность показаний температурные изменения сопротивления протеканию тока в сети пирометра практически не влияют

Передвижение движка реохорда в автоматических потенциометрах осуществляется автоматически с помощью системы стабилизации, поддерживающей значение тока в сети пирометра при выполнении измерения равным нулю за счет перемещения движка

Недостатком рассмотренной схемы является постоянное включение нормального элемента, вызывающее его износ В связи с этим находят применение схемы с питанием от аккумуляторных батарей и периодическим включением сухих элементов

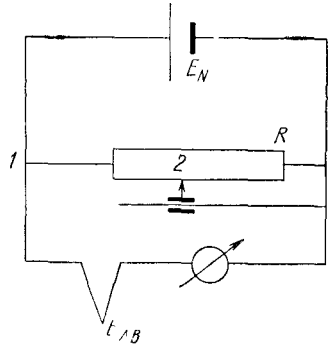



Рис 5 6 Упрощенная схема потенциометра

Технические характеристики различных автоматических потенциометров даны в табл 5 9

Термоэлектрические пирометры применяются на судах в основном для целей теплотехнического контроля в тех точках, где температура относительно высока (перегретый пар, дымовые газы и т. п) Достоинствами этих приборов являются возможность измерения высоких температур, удобство дистанционной передачи показаний, возможность регистрации показаний и получения предельного сигнала Их недостаток — сравнительная сложность конструкции, монтажа и эксплуатации

**Терморадиационные чувствительные элементы.** *Принцип действия этих элементов* основан на том факте что интенсивность излучения лучистой энергии нагретыми телами с ростом температуры возрастает по вполне определенному закону

Тело, которое поглощает всю падающую на него лучистую энергию, называется *абсолютно черным телом*

*Интенсивность монохроматического излучения абсолютно черного тела* $E_{0\lambda}$, ккал/(м²·ч·мкм) — это величина, показывающая, сколько лучистой энергии

*Таблица 5 8*

**Основные характеристики пирометрических милливольтметров**

| | Тип | Пределы измерения, °С | | | Основная погрешность показания % |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Гр ХК | Гр ХА | Гр ПП-1 | |
| Показывающие | МПЩПР-54М | 0—300, 0—400, 0—600 | 0—600, 0—800, 0—1100, 0—1300 | 0—1600 | ±1,5 |
| | МПП-054 | | | | ±1 |
| | МР1 02М | 0—400; 0—600 | | | ±1,5 |
| Самопишущие | МСЩПР 00-18 | 0—300, 0—400, 0—600, | 0—600, 0—800, 0—1100, 0—1300 | 0—1300, 0—1600 | ±1 |

*Продолжение табл. 5.9*

| Тип прибора | Характеристика | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Погрешность показаний, % | Исполнение | Инерционность, °С | Напряжение питания, В | Частота питания, Гц |
| Уравновешенные мосты автоматические показывающие и сигнализирующие с дистанционной передачей показаний | | | | | |
| АМ140-16 | ±0,5 | Брызгозащищенное | 3,5; 8 | 220 | 400 |
| АМ140-17 | ±0,5 | То же | 3,5; 8 | 220 | 400 |
| АМ140-20 | ±0,5 | » | 3,5; 8 | 220 | 400 |
| АМ140-21 | ±0,5 | » | 3,5; 8 | 220 | 400 |
| АМ140-22 | ±0,5 | » | 3,5; 8 | 220 | 400 |

с данной длиной волны за 1 ч излучается с 1 м² поверхности абсолютно черного тела; она определяется формулой Планка

$$E_{0\lambda} = c_1 \lambda^{-5} \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \qquad (5.7)$$

которая при $T < 3000$ К в видимой части спектра с погрешностью не более 1% может быть заменена формулой Вина

$$E_{0\lambda} = c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}}. \qquad (5.8)$$

Здесь $T$ — температура, К; $\lambda$ — длина волны в данной части спектра, мкм; $c_1 = 3{,}17 \cdot 10^{-16}$ ккал/(м² · ч); $c_2 = 1{,}43 \cdot 10^{-2}$ мК.

*Полное количество лучистой энергии* $E_0$, излучаемое с 1 м² в час абсолютно черным телом, может быть представлено формулой Стефана-Больцмана

$$E_0 = \sigma_0 T^4, \qquad (5.9)$$

где $\sigma_0 = 4{,}96 \cdot 10^{-8}$ ккал/(м² · ч · К⁴).

Тела, температуру которых приходится измерять на практике, поглощают лишь часть падающей на них энергии, причем всякое тело поглощает лучи с той же длиной волны и энергией, которые оно при данных условиях испускает. Интенсивность монохроматического излучения $E_\lambda$ и полное излучение $E$ любого тела выражаются через соответствующие величины для абсолютно черного тела формулами

$$E_\lambda = \varepsilon_\lambda E_{0\lambda}, \; E = \varepsilon E_0, \qquad (5.10)$$

где $\varepsilon_\lambda$, $\varepsilon$ — *коэффициенты черноты* монохроматического и полного излучения ($0 < \varepsilon_\lambda < 1$, $0 < \varepsilon < 1$).

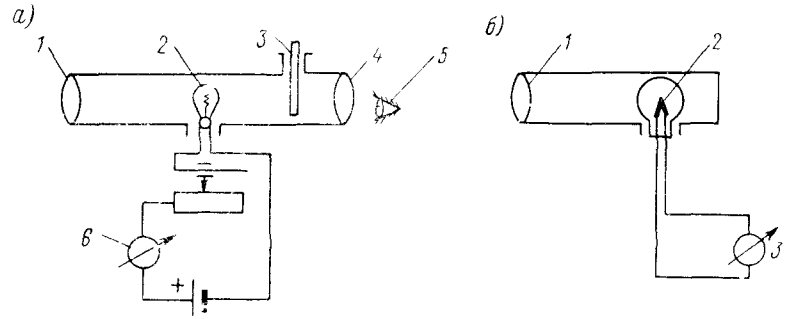
*Яркость* свечения абсолютно черного тела $B_{0\lambda}$ или любого тела $B_\lambda$ в данной части спектра прямо пропорциональна интенсивности монохроматического излучения:

$$B_{0\lambda} = cE_{0\lambda}, \tag{5.11}$$

$$B_\lambda = c\varepsilon_\lambda E_{0\lambda}, \tag{5.12}$$

где $c$ — постоянный коэффициент.

Терморадиационные чувствительные элементы подразделяются на яркостные, инфракрасные, радиационные и цветовые. Яркостные, или оптические элементы используют энергию монохроматического излучения, радиационные — полную энергию излучения, цветовые — отношение энергии одной части спектра к энергии в другой части спектра, инфракрасные элементы воспринимают инфракрас



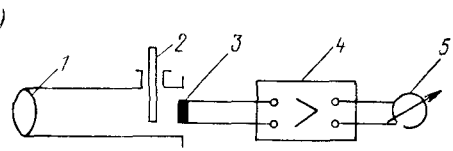




Рис. 5.7. Схемы пирометров излучения:

*а* — оптического:

*1* - объектив; *2* — лампа, *3* — светофильтр, *4* — окуляр; *5* — глаз человека, *6* — милливольтметр,

*б* — радиационного:

*1* — линза или вогнутое зеркало, *2* — термоэлемент; *3* — милливольтметр;

*в* — фотоэлектрического:

*1* — объектив; *2* — светофильтр; *3* — фотоэлемент, *4* — усилитель, *5* - вторичный прибор.

ное излучение. Для восприятия энергии излучения нагретого тела и преобразования ее в электрическую энергию в терморадиационных элементах используются термопары, фотоэлементы, термосопротивления.

Терморадиационные чувствительные элементы применяются в системах автоматического регулирования, защиты и сигнализации по температуре, если температура высока. Они применяются также в пирометрах излучения с целью измерения температуры.

**Пирометры излучения.** Оптические пирометры. Эти приборы основаны на использовании зависимости интенсивности монохроматического излучения от температуры в видимой части спектра. Зависимость интенсивности излучения от температуры, используемая в оптических пирометрах, представлена формулой (5.7) или (5.8).

Схема оптического пирометра «с исчезающей нитью» изображена на рис.5.7, *а*. Излучение святящегося нагретого тела проходит через объектив *1* мимо лампы накаливания *2*, через которую пропускается ток от источника постоянного напряжения. Нить накаливания лампы помещается в фокусе объектива. Наблюдая за светящейся нитью и изображением источника через светофильтр *3* и окуляр *4*, перемещением движка реостата добиваются того, чтобы яркости нити лампы и

источника совпадали. Светофильтр *3* пропускает лишь красный свет при $\lambda \cong$ $\cong 0{,}65$ мкм. Яркость лампы зависит от напряжения, измеряемого милливольтметром *6*. С другой стороны, яркость при отсчете зависит от температуры излучающего тела. Это позволяет градуировать шкалу милливольтметра в единицах температуры. Показание снимается в момент, когда раскаленная часть нити не видна на фоне источника.

Яркость данного тела $B_\lambda$ при температуре $T$ равна яркости абсолютно черного тела $B_{0\lambda}$ при некоторой температуре $T_я < T$:

$$B_\lambda(T) = B_{0\lambda}(T_я). \tag{5.13}$$

Температура $T_я$ называется *яркостной температурой* данного тела в свете длины волны $\lambda$. Так как коэффициенты черноты для разных тел различны, а прибор должен быть пригоден для измерения температуры всевозможных тел, шкала оптического пирометра градуируется по температуре абсолютно черного тела, т. е. показывает яркостную температуру $T_я$ данного тела, меньшую истинной температуры $T$.

Выражая в равенстве (5.13) яркости через интенсивности излучения по (5.11), (5.12), а затем интенсивности через температуры согласно (5.8), получаем

$$T = \frac{1}{\dfrac{1}{T_я} - \dfrac{\lambda}{c_2}\ln\dfrac{1}{\varepsilon_\lambda}}. \tag{5.14}$$

По формуле (5.14) или соответствующим ей таблицам определяется истинная температура $T$, если известна яркостная температура $T_я$, показываемая оптическим пирометром, и коэффициент черноты $\varepsilon_\lambda$ для данного тела.

На судах для измерения температуры в топках котлов и других целей находят применение оптические пирометры ОППИР-55 и др.

Достоинством оптических пирометров «с исчезающей нитью» является весьма высокая точность, обусловленная чувствительностью глаза человека к изменению яркости света; недостатком является необходимость непосредственного участия человека в процессе измерения, что ограничивает их применение в автоматизированных системах.

Фотоэлектрические пирометры. Фотоэлектрический пирометр основан на зависимости возникающего в фотоэлементе тока от интенсивности падающего на него монохроматического излучения.

В фотоэлектрических пирометрах (рис. 5.7, *в*), так же как и в оптических, поток излучения нагретого тела проходит через объектив *1*, в фокусе которого размещается *фотоэлемент 3*. Перед фотоэлементом устанавливается красный светофильтр *2*, пропускающий лучи при $\lambda \cong 0{,}65$. Сила тока фотоэлемента служит выходным сигналом чувствительного элемента прибора, который усиливается в усилителе *4*. Шкала прибора градуируется в единицах температуры, причем показывает условную температуру, которая близка к яркостной температуре или совпадает с ней. Для получения истинной температуры необходимо воспользоваться формулой (5.14) или соответствующими ей таблицами.

Отечественная промышленность выпускает фотоэлектрические пирометры типа ФЭП.

Фотоэлектрические пирометры удобны для использования в системах автоматики.

Радиационные пирометры. Радиационный пирометр основан на тепловом действии излучения нагретого тела, температура которого измеряется. Зависимость лучистой энергии от температуры, используемая в этих приборах, представлена формулой (5.9).

Схема радиационного пирометра изображена на рис. 5.7, *б*. Для концентрации излучения нагретого тела используется линза *1* (в пирометрах *рефракторного* типа) либо вогнутое зеркало (в пирометрах *рефлекторного* типа). В фокусе линзы или зеркала размещается зачерненная пластина из платиновой фольги, на которой монтируется горячий спай *термоэлемента 2* (для усиления термо-э. д. с. несколько термоэлементов соединяют в термобатарею). Термо-э д. с.,

возникающая при нагревании термоэлемента, измеряется пирометрическим милливольтметром *3*, шкала которого градуирована в единицах температуры.

Полное излучение данного тела $E$ при температуре $T$ равно полному излучению абсолютно черного тела $E_0$ при некоторой температуре $T_р < T$:

$$E(T) = E_0(T_р). \tag{5.15}$$

Температура $T_р$ называется радиационной температурой данного тела. По той же причине, что и у оптических пирометров, шкала радиационного пирометра градуируется по температуре абсолютно черного тела — она показывает радиационную температуру $T_р$, которая меньше действительной температуры $T$. Заменяя в равенстве (5.15) $E(T)$ через $\varepsilon E_0(T)$ по формуле (5.10) и выражая затем полное излучение через температуру по формуле (5.9), получаем

$$T = T_р \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}. \tag{5.16}$$

По формуле (5.16) определяется действительная температура $T$ по радиационной температуре, показываемой радиационным пирометром, и коэффициенту черноты данного тела.

Отечественная промышленность выпускает радиационные пирометры типа РАПИР.

Радиационные пирометры, как и фотоэлектрические, не требуют для выполнения измерения непосредственного участия человека, в отличие от оптических пирометров. Но они менее точны, нежели оптические, так как полное излучение с увеличением температуры растет медленнее, чем монохроматическое, используемое в пирометрах.

Общие достоинства пирометров излучения состоят в возможности измерения высоких температур (верхний предел шкалы практически неограничен), а также измерения температуры в случае, когда непосредственный контакт с нагретым телом невозможен (например, когда тело движется).

## § 6. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

*Давление жидкости*, пара или газа определяется силой, действующей на единицу площади поверхности по направлению нормали к поверхности. Различают атмосферное, избыточное давление и разрежение. Атмосферное, или барометрическое, давление $p_{атм}$ есть давление, производимое весом воздушного столба атмосферы; оно медленно меняется во времени. *Абсолютное давление* $p_{абс}$ — это полное давление, под которым находится жидкость, пар или газ в сосуде. *Избыточное давление* $p_{изб}$ — это избыток абсолютного давления над атмосферным, а разрежение (вакуум) $p_{разр}$ — недостаток абсолютного давления до атмосферного:

$$p_{изб} = p_{абс} - p_{атм}, \quad p_{разр} = p_{атм} - p_{абс}. \tag{6.1}$$

В Международной системе единиц давление измеряется в ньютонах на квадратный метр. В технике в качестве единицы измерения давления применяется также техническая атмосфера, равная 1 кгс/см$^2$. Для измерения малых давлений используются миллиметры ртутного и водяного столба.

В установках морских судов для автоматического регулирования и контроля давлений применяют следующие чувствительные элементы и датчики:

— *жидкостные элементы*, в которых измеряемое давление уравновешивается давлением столба жидкости;

— *упругие элементы*, в которых используется зависимость деформации упругого тела от действующего на него давления;

— *электроманометрические элементы*, основанные на изменении электрического сопротивления проводника, находящегося под действием давления окружающей среды;

— *индуктивные*, *емкостные* и *реостатные датчики*, основанные на преобразовании деформации упругого тела, вызываемой контролируемым давлением, в изменение индуктивности, емкости или сопротивления электрической цепи;

— *пьезоэлектрические элементы*, вырабатывающие электрические заряды при действии на них давления.

Приборы для измерения полного или избыточного давления называют *манометрами*, для измерения разрежения — *вакуумметрами*, для измерения атмосферного давления — *барометрами*. Манометры, основанные на преобразовании деформации упругого тела под действием давления в изменение электрической величины (емкости, индуктивности и др.), называют *электрическими манометрами*.

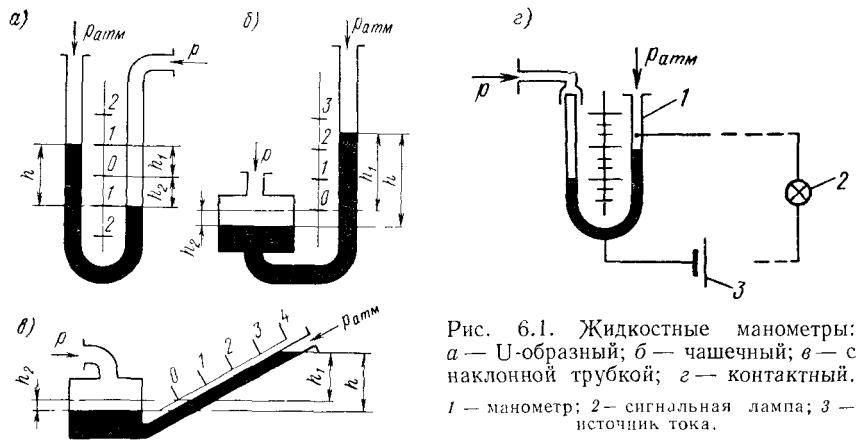



Рис. 6.1. Жидкостные манометры: *а* — U-образный; *б* — чашечный; *в* — с наклонной трубкой; *г* — контактный.

*1* — манометр; *2* — сигнальная лампа; *3* — источник тока.

**Жидкостные чувствительные элементы.** Жидкостные элементы, в которых измеряемое давление сопоставляется с давлением столба жидкости, применяются в измерительных приборах — жидкостных манометрах.

*U-образные* жидкостные манометры (рис. 6.1, *а*) изготавливают из вертикально укрепленной U-образной стеклянной трубки, заполненной жидкостью. Один конец трубки сообщается с резервуаром, в котором измеряется давление, другой — с атмосферой. Величина измеряемого избыточного давления равна

$$p = \gamma h, \tag{6.2}$$

где $h = h_1 + h_2$ — разность высот столбов жидкости в двух колепах трубки; $\gamma$ — удельный вес жидкости.

Подсоединив концы трубки к сосудам с разными давлениями, получим *дифференциальный манометр*, или *дифманометр*,— прибор для измерения разности давлений.

В *чашечных* жидкостных манометрах (рис. 6.1, *б*) малому опусканию уровня жидкости в чашечке ввиду разности диаметров соответствует значительный подъем уровня в трубке, т. е. $h_2 \ll h_1$, и поэтому $h \cong h_1$. Следовательно, вместо отсчета двух величин ($h_1$ и $h_2$) достаточно сделать отсчет одной ($h_1$).

В манометрах с *наклонной трубкой*, или *микроманометрах* (рис. 6.1, *в*), измеряемое давление определяется формулой (6.2), где $h \cong h_1$; но в данном случае $h_1 = n \sin \alpha$, где $\alpha$ — угол наклона трубки; $n$ — длина части трубки, заполненной жидкостью. Малому значению $h_1$ соответствует значительная величина $n$, что увеличивает точность отсчета.

Жидкости, применяемые для заполнения жидкостных манометров, приведены в табл. 6.1.

**Рабочие жидкости для заполнения жидкостных манометров**

| Рабочая жидкость | Формула | Удельный вес при 20°С, гс/см³ |
|---|---|---|
| Этиловый спирт | $C_2H_5OH$ | 0,790 |
| Керосин | — | 0,820 |
| Бензол | $C_6H_6$ | 0,880 |
| Толуол | $C_7H_8$ | 0,864 |
| Вода | $H_2O$ | 0,998 |
| Трикрезилфосфат | $(CH_3C_6H_4O)_3$ PO | 1,175 |
| Глицерин (безводный) | $C_3H_8O_3$ | 1,257 |
| Четыреххлористый углерод | $CCl_4$ | 1,594 |
| Бромистый этилен | $C_2H_4Br_2$ | 2,165 |
| Четырехбромистый ацетилен | $C_2H_2Br_4$ | 2,980 |
| Ртуть | Hg | 13,546 |

Жидкостные манометры используются в системах теплотехнического контроля при испытаниях судовых установок. Обычно они используются как показывающие приборы, но могут применяться и в качестве контактных приборов для автоматической сигнализации о достижении предельного давления (рис. 6.1, *г*). Их достоинства — малая стоимость и простота, недостатки — небольшая величина измеряемых давлений, невозможность дистанционной передачи и регистрации показаний.

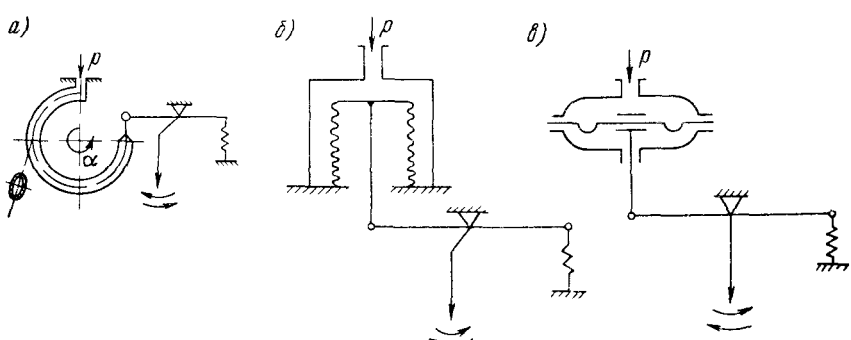



Рис. 6.2. Схемы измерительных приборов с упругими чувствительными элементами: *а* — с одновитковой трубчатой пружиной; *б* — с сильфоном; *в* — с мембраной.

**Упругие чувствительные элементы.** Принцип действия упругих чувствительных элементов основан на зависимости их деформации от давления. В качестве упругих чувствительных элементов применяются трубчатые пружины, сильфоны и плоские мембраны.

*Одновитковая трубчатая пружина* (рис. 6.2, *а*) заполняется средой, давление которой контролируется. Один конец витка пружины закреплен неподвижно и соединяется с резервуаром, в котором измеряется давление; другой конец, запаянный, перемещается при изменении давления внутри трубчатой пружины.

Трубчатая пружина имеет эллипсоидальное сечение. При повышении давления в трубке ее «распирает» изнутри: трубка стремится принять округлое сечение и одновременно — выпрямиться, т. е. угол ее закрутки $\alpha$ уменьшается. Угол $\alpha$ является, таким образом, функцией давления в трубке.

*Многовитковая трубчатая пружина* отличается только тем, что имеет несколько витков, благодаря чему деформация ее свободного конца увеличивается.

*Сильфон* (рис. 6.2, *б*) представляет собой цилиндр с гофрированными стенками. Перемещение дна сильфона, связанного с выходным рычагом, пропорционально давлению внутри сильфона. При равных условиях это перемещение больше, чем у одновитковой трубчатой пружины, что является достоинством данного элемента. Однако погрешность определения давления с помощью сильфона больше, чем с помощью трубчатой пружины. Сильфоны изготавливаются из томпака (для низких давлений), бериллиевой бронзы или стали (для высоких давлений) и пригодны для измерения давлений до 120 кгс/см$^2$ и даже выше.

*Плоская мембрана* (рис. 6.2, *в*) изготавливается из прорезиненной ткани и применяется, если действующее на мембрану давление не превышает 1,5 кгс/см$^2$, в противном случае толщина мембраны по соображениям прочности увеличивается и чувствительность ее сильно уменьшается. Достоинством мембранных элементов является удобство защиты мембраны от воздействия агрессивной среды путем покрытия ее с одной стороны фольгой из серебра или платины. Перемещение мембраны при сравнимых условиях значительно меньше, нежели перемещение дна сильфона.

Чувствительные элементы в виде сильфонов и мембран применяют на судах в измерительных органах автоматических регуляторов давления.

Соединив свободный конец трубчатой пружины с помощью передаточного механизма со стрелкой, перемещающейся по шкале, градуированной в единицах измеряемого давления, получим *пружинный манометр*. Аналогично устроены *мембранные* манометры и вакуумметры.

Манометры с упругими чувствительными элементами применяют на судах в системах теплотехнического контроля: с трубчатой пружиной — для измерения высоких давлений, с мембраной — для измерения небольших давлений. Мембранные приборы, предназначенные для измерения тяги или напора воздуха котельных вентиляторов, называют *тягомерами* и *напоромерами*.

Технические характеристики приборов для измерения давления с одновитковой трубчатой пружиной приведены в табл. 6.2.

**Датчики, преобразующие деформацию упругого тела под действием давления в электрический сигнал.** В электрических системах автоматического регулирования и в электрических манометрах деформацию упругого чувствительного элемента, возникающую под действием контролируемого давления, необходимо преобразовать в электрический сигнал; для этого используются различные датчики (см. § 21).

Применяемые для указанных целей *индуктивные датчики*, преобразующие механическое перемещение в изменение индуктивности, можно подразделить на два типа: с переменным коэффициентом самоиндукции и с переменным коэффициентом взаимной индукции (*индуктивные трансформаторные* датчики).

Датчик с переменным коэффициентом самоиндукции, используемый в системах регулирования и контроля давления (рис. 6.3, *а*), представляет собой статор *1* с неподвижной обмоткой, питаемой переменным током, и якорь *2*, связанный с мембраной *3*, находящейся под давлением; при перемещении мембраны воздушный зазор между якорем и статором изменяется, ввиду чего изменяется коэффициент самоиндукции $L$ — выходная величина прибора.

В качестве датчиков в электрических системах регулирования давления часто применяют *потенциометры* — переменные сопротивления, изменяющиеся в зависимости от положения токосъемника; выходной величиной такого датчика может быть электрическое сопротивление (если потенциометр включен в электрическую цепь как реостат) или напряжение (если потенциометр включен в цепь как делитель напряжения). Схема элемента с потенциометром, используемого для измерения давления, изображена на рис. 6.3, *б*. Мембрана *1*, подвергающаяся давлению, перемещает движок реохорда *2* и тем самым вызывает изменение электрического сопротивления $R$ в зависимости от измеряемого давления (см. § 21).

*Таблица 6.2*

**Основные данные показывающих манометров, вакуумметров и мановакуумметров с трубчатой одновитковой пружиной общего назначения**

| Наименование | Тип | Основная погрешность, в % от верхнего предела измерения | Диаметр корпуса, мм | Расположение присоединительного штуцера и резьба | Пределы измерений, кгс/см² |
|---|---|---|---|---|---|
| Манометры технические обыкновенные | ОБМ-100<br>ОБМ-100б | 2,5 | 100 | Радиальное, М20×1,5 | 0—1; 0—1,6; 0—2,5; 0—4; 0—6; 0—10; 0—16; 0—25; 0—40 |
| | МОШ-100 | | | Осевое, М20×1,5 | |
| | ОБМГн-100<br>ОБМГн-100б | | | Радиальное, М20×1,5 | 0—60; 0—100; 0—160; 0—250 |
| | МГнОШ-100 | | | Осевое, М20×1,5 | 0—60 |
| | ОБМ-160<br>ОБМ-160б | 1,6 | 160 | Радиальное, М20×1,5 | 0—1; 0—1,6; 0—2,5; 0—4; 0—6; 0—10; 0—16; 0—25; 0—40 |
| | МОШ-160 | | | Осевое, М20×1,5 | |
| | ОБМГн-160<br>ОБМГн-160б | | | Радиальное, М20×1,5 | 0—60; 0—100; 0—160; 0—250; 0—400; 0—600 |
| | МГнОШ-160 | | | Осевое, М20×1,5 | |
| | ОБМГв-160<br>ОБМГв-160б | | | Радиальное, М20×1,5 | 0—1000; 0—1600; 0—1000; 0—1600 |
| | М-250 | | 250 | | 0—10; 0—16; 0—25; 0—40 |
| | МГн-250 | | | | 0—60; 0—100; 0—160; 0—250; 0—400; 0—600 |

*Продолжение табл 6 2*

| Наименование | Тип | Основная погрешность, в % от верхнего предела измерения | Диаметр корпуса, мм | Расположение присоединительного штуцера и резьба | Пределы измерений, кгс/см² |
|---|---|---|---|---|---|
| Мановакуумметры технические обыкновенные | ОБМВ-100<br>ОБМВ-100б | 2,5 | 100 | Радиальное, М20×1,5 | (—1)÷0÷0,6; (—1)÷0÷1,5; (—1)÷0÷3; (—1)÷0÷5; (—1)÷0÷9; (—1)÷0÷15; —1)÷0÷24 |
| | МВОШ-100 | | | Осевое, М20×1,5 | |
| | ОБМВ-160<br>ОБМВ-160б | | 160 | Радиальное, М20×1,5 | |
| | МВОШ-160 | | | Осевое, М20×1,5 | |
| Вакуумметры технические обыкновенные * | ОБВ-100<br>ОБВ-100б | 2,5 | 100 | Радиальное, М20×1,5 | 0÷—1 |
| | ВОШ-100 | | | Осевое, М20×1,5 | |
| | ОБВ-160<br>ОБВ-160б | 1,6 | 160 | Радиальное, М20×1,5 | |
| | ВОШ-160 | | | Осевое, М20×1,5 | |

*Таблица 6.3*

**Манометры электрические**

| Наименование | Тип | Основная погрешность, в % от верхнего предела измерения | Питание | Исполнение | Пределы измерений |
|---|---|---|---|---|---|
| Манометр с упругим чувствительным элементом, индуктивным датчиком и электронным вторичным прибором | ДАД-5У-ВС<br>ДАД-4У-ВС | ±2,5<br>±2,5 | 220 В 400 Гц | Водозащищенное | 0—1—400 кгс/см² |
| | МАК<br>МВК | ±1÷±3 | | Водозащищенное | 500—900 мм рт. ст.<br>0—2,5 кгс/см² |
| Вакуумметр того же принципа действия | Комплект МИД-2337 АД-100 | ±2 | | Брызгозащищенное | —1,0—0 кгс/см² |
| Дифманометр того же принципа действия | Комплект ДМ-3554, АД-100 | ±2 | | Брызгозащищенное | 0—0,4—10 кгс/см² |

Схема *емкостного датчика*, применяемого в системах регулирования и контроля давления, показана на рис. 6.3, *в*. Датчик представляет собой конденсатор, одна из пластин которого воспринимает механическое перемещение (входной сигнал датчика); при уменьшении расстояния между пластинами увеличивается емкость *C* конденсатора (выходной сигнал).

Подвижная обкладка конденсатора *1* закреплена на мембране *2*, подверженной воздействию измеряемого давления. Неподвижная обкладка *3* закреплена на корпусе мембраны. Клеммы *4* служат для включения в электрическую сеть.

**Пьезоэлектрические чувствительные элементы.** На поверхности кристалла кварца (двуокиси кремния) и некоторых других кристаллов при их сжатии или растяжении выделяются электрические заряды (пьезоэлектрический эффект). Для использования в пьезоэлектрических чувствительных элементах из кварца вырезается прямоугольная призма. При сжатии или растяжении призмы на ее противоположных гранях, расположенных вдоль направления приложенной силы, появляются электрические заряды противоположных знаков. Величина зарядов пропорциональна приложенному к призме давлению.

Схема пьезоэлектрического чувствительного элемента показана на рис. 6.4.

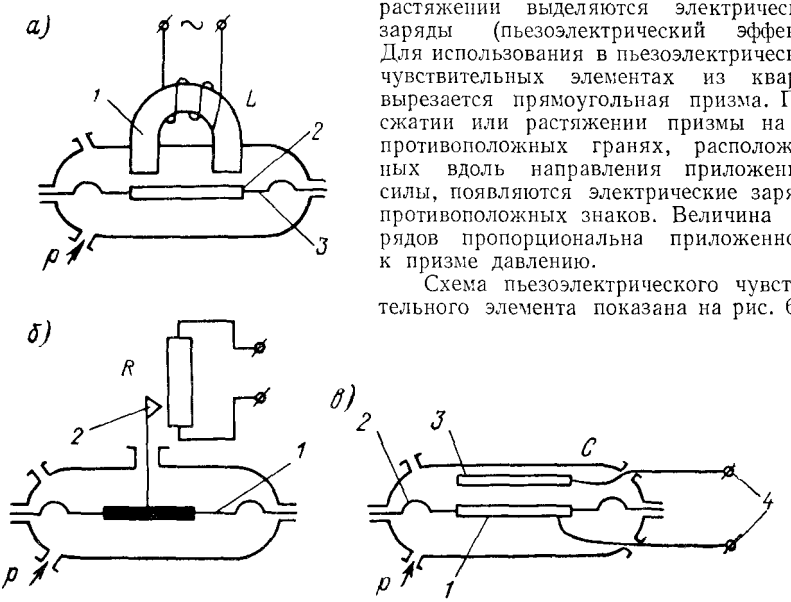



Рис. 6.3. Датчики электрических манометров: *а* — индуктивный; *б* — реостатный; *в* — емкостный.

Мембрана *2*, воспринимающая контролируемое давление, передает его кварцевым призмам *1*. Электрический сигнал на выходе элемента усиливается в электронном усилителе *3*.

Заряды, возникающие в пьезоэлектрических чувствительных элементах, подвержены быстрой утечке в измерительной цепи. В связи с этим данные элементы используют главным образом при измерении быстроменяющихся давлений (например, в судовых дизелях); непрерывно меняющееся давление возобновляет заряды.

**Электрические манометры.** Электрический манометр состоит из датчика или пьезоэлектрического элемента (первичный прибор), выдающего пропорциональный измеряемому давлению электрический сигнал, и вторичного прибора, осуществляющего усиление и автоматическую компенсацию этого сигнала. Усиленный сигнал используется для дачи показаний на шкалу прибора, для автоматической регистрации и т. п. Основным элементом вторичных приборов являются электронные или полупроводниковые усилители (см. § 22, 30).

Достоинства электрических манометров — возможность дистанционной передачи и регистрации показаний, удобство использования в системах автоматизированного дистанционного управления; но они дороже и сложнее манометров с упругими чувствительными элементами.

На судах применяются следующие электрические манометры, выпускаемые отечественной промышленностью: ДПР1-01, ВЭПМ1 с усилителем УМ1, МСИР-12Д, ВМД и другие с датчиками ММС-3М, МПС-1 и др.

**Сигнализаторы давления.** *Сигнализаторы давления* дают световой или звуковой сигнал при достижении контролируемым давлением заданного предельного значения.

Схема сигнализатора давления изображена на рис. 6.5. В корпус *1* чувствительного элемента подводится контролируемое давление, воспринимаемое мембраной *2*. При достижении предельного значения давления замыкаются электрические контакты *4*, ввиду чего на щите контроля возникает световой сигнал — включается одна из электроламп *5* соответствующего цвета.

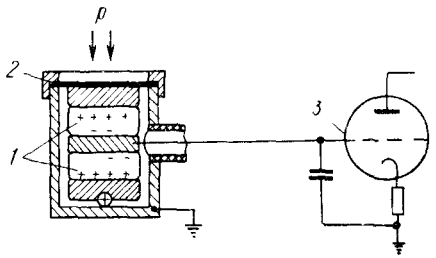



Рис. 6.4. Пьезоэлектрический чувствительный элемент.

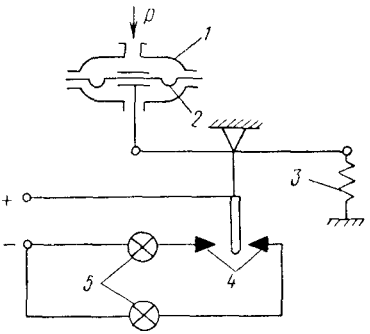



Рис. 6.5. Принципиальная схема сигнализатора давления.

*1* — корпус, *2* — мембрана; *3* — пружина, *4* — контакты, *5* — сигнальные лампы.

Сигнализаторы давления используются на судах для сигнализации о недопустимом повышении или понижении давления масла, воды и т. п. На отечественных судах применяются сигнализаторы давления типа СД, РДК, СДК и др.

## § 7. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА

Под расходом понимают количество вещества, протекающего через поперечное сечение трубопровода в единицу времени. Различают мгновенный расход и средний расход за определенный промежуток времени. Различают также объемный $Q$, м³/с, массовый $M$, кг/с, и весовой $G$, кгс/с, расходы, связанные соотношениями

$$M = \rho Q, \; G = \gamma Q, \tag{7.1}$$

где $\rho$ — плотность вещества в потоке, кг/м³; $\gamma$ — удельный вес, кгс/м³.

В системах автоматического регулирования и контроля расхода жидкости, пара или газа на судах применяют следующие чувствительные элементы:

*анемометрические элементы*, или *анемометры*, представляющие собой вертушки, частота вращения которых пропорциональна скорости потока и, следовательно, расходу;

— *дроссельные элементы*, принцип действия которых основан на зависимости мгновенного расхода от перепада давлений на установленном в трубопроводе сужающем устройстве;

— *гидродинамические элементы*, основанные на зависимости мгновенной скорости потока в данной точке от разности между полным и статическим давлением в этой точке;

— *ультразвуковые элементы*, в которых используется зависимость сдвига фаз ультразвуковых колебаний, распространяемых в потоке и в воздушной среде (либо по направлению потока и против него), от скорости потока и, следовательно, от мгновенного расхода;

— *индукционные элементы*, основанные на зависимости электродвижущей силы, наводящейся при движении потока проводящей жидкости между полюсами магнита, от скорости потока, однозначно связанной с мгновенным расходом;

— *калориметрические элементы*, в которых используется зависимость расхода от разности температур потока до и после установленного в трубопроводе нагревателя;

— *ротаметрические элементы*, основанные на зависимости расхода от перемещения поплавка, плавающего в вертикально установленном в трубопроводе коническом патрубке.

Измерительные приборы, показывающие мгновенные значения расхода, называют *расходомерами*. Приборы, определяющие суммарное количество вещества, прошедшего через трубопровод за некоторый отрезок времени, называют *счетчиками расхода*. Разделив показание счетчика расхода на время его работы, получим среднее значение расхода за рассматриваемый период времени.

Измерительные приборы, основанные на непрерывном отмеривании порций объема вещества, протекающего через трубопровод, называются объемными счетчиками расхода. Приборы с анемометрическими чувствительными элементами, подсчитывающие количество протекающего через трубопровод вещества в зависимости от скорости потока, называют скоростными счетчиками расхода. Приборы с гидродинамическими чувствительными элементами позволяют замерить мгновенные значения скорости в нескольких точках по сечению потока и, осреднив их, определить мгновенное значение расхода; они называются скоростными расходомерами. Приборы с дроссельными чувствительными элементами позволяют определять мгновенные значения расхода в зависимости от перепада давлений на сужающем устройстве и носят название дроссельных расходомеров, или расходомеров переменного перепада давлений. Измерительные приборы с ультразвуковыми чувствительными элементами называют ультразвуковыми расходомерами, с индукционными чувствительными элементами — индукционными расходомерами.

**Объемные счетчики расхода.** В зависимости от устройства различают поршневые, дисковые, шестеренные и ротационные объемные счетчики расхода.

В *поршневом* счетчике расхода (рис. 7.1, *а*) при положении крана $AB$ жидкость, расход которой измеряется, поступает от источника в нижнюю часть цилиндра и вытесняется поршнем к потребителю из верхней части цилиндра. Кран связан с поршнем и, когда поршень приходит в верхнее положение, он автоматически переставляется в положение $CD$. Тогда жидкость начинает поступать от источника в верхнюю полость цилиндра и вытесняться к потребителю из нижней полости. Таким образом, за один ход поршня к потребителю поступает один полный объем цилиндра. Ход поршня преобразуется во вращательное движение и передается счетчику, который представляет собой редуктор с большим передаточным числом, сильно снижающим частоту вращения. В результате стрелка показывающего прибора, медленно вращаясь, указывает на шкале расход в единицах объема. Недостатком этого прибора является сложность кинематической схемы.

*Дисковый* счетчик расхода (рис. 7.1, *б*) имеет мерную камеру *7*, боковые стенки которой представляют собой шаровую поверхность, а верхняя и нижняя крышки — направленные вершинами вовнутрь конусы. Диск *6* пригнан к поверхности камеры так, чтобы между ним и камерой не было протечек. Ось диска *9*, имеющая шаровой подшипник *8*, сверху выходит из камеры и при работе прибора вращается вокруг неподвижного направляющего конуса *4*, одновременно вращая вал *5*, упираясь в имеющиеся на нем крылышки. Вал *5* связан со счетным механизмом *2*. Камера *7* имеет глухую вертикальную перегородку, проходящую сквозь прорезь в диске. Диск, упираясь в перегородку, предохраняется от вращательного движения и совершает колебательное движение. По одну сторону перегородки в камере имеется отверстие для входа жидкости, по другую — для выхода.

Работа прибора протекает следующим образом. Камера при любом положении диска перегородкой (*OA* на рис. 7.1, *б*) и диском в месте прилегания его к образующим конусов камеры (*OB* — вверху, *OC* — внизу) разделена на четыре полости. В момент, изображенный на рисунке, полость над диском на дуге $\overset{\frown}{AB}$ и полость под диском на дуге $\overset{\frown}{ABC}$ сообщены с выходом, полость над диском на дуге $\overset{\frown}{ACB}$— со входом, полость под диском на дуге $\overset{\frown}{AC}$ разобщена от входа и вы-

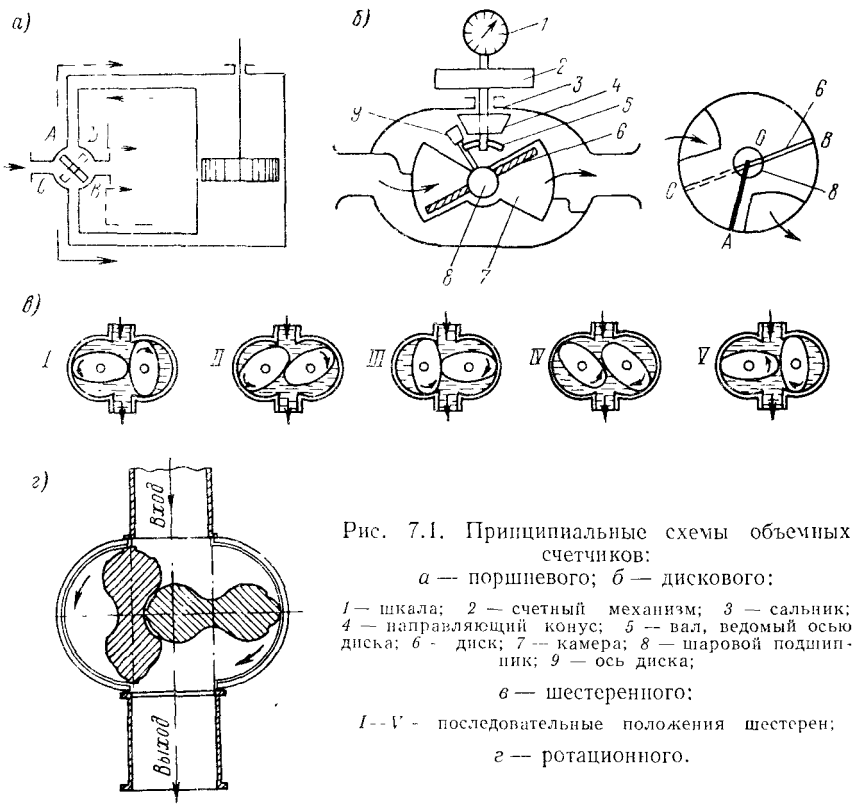



Рис. 7.1. Принципиальные схемы объемных счетчиков:

*а* — поршневого; *б* — дискового:

*1* — шкала; *2* — счетный механизм; *3* — сальник; *4* — направляющий конус; *5* — вал, ведомый осью диска; *6* - диск; *7* — камера; *8* — шаровой подшипник; *9* — ось диска;

*в* — шестеренного:

*I*—*V* - последовательные положения шестерен;

*г* — ротационного.

хода. Набегающий поток стремится опустить поднятый край диска, ввиду чего образующие прилегания *OB* и *OC* перемещаются, вращаясь по часовой стрелке. Поэтому полость над диском на дуге $\overset{\frown}{CB}$ окажется сообщенной с выходом и разобщенной со входом, а полость под диском на дуге $\overset{\frown}{AC}$, прежде разобщенная, соединится со входом. Теперь набегающий поток будет нажимать с другой стороны поверхности диска, и т. д. В результате ось диска при его колебаниях будет вращаться по часовой стрелке, и за каждый ее полный оборот через мерную камеру пройдет количество жидкости, равное объему камеры.

*Шестеренный* счетчик расхода содержит две овальные шестерни, вращающиеся в камере под действием давления набегающего потока. На рис. 7.1, *в* показаны пять последовательных положений шестерен, соответствующих одному циклу, за который каждая шестерня совершает пол-оборота. При полном обороте шестерен через камеру проходит количество жидкости, равное объему камеры. Ось одной из шестерен связывают со счетным механизмом; суммарный расход пропорционален числу оборотов шестерни.

В *ротационном* счетчике вместо шестерен вращаются два ротора, поперечное сечение которых имеет вид восьмерки (рис. 7.1, *г*).

Объемные счетчики расхода, в зависимости от их назначения, называют нефтемерами, водомерами, мазутомерами и т. п.

Технические характеристики объемных счетчиков расхода приведены в табл. 7.1.

**Анемометры и скоростные счетчики расхода.** Анемометрический чувствительный элемент представляет собой крыльчатый ротор, вращаемый набегающим потоком; ось ротора перпендикулярна движению потока, а частота его вращения пропорциональна средней скорости потока и, следовательно, мгновенному расходу. Соединив ротор анемометра с тахогенератором, получим электрический скоростной расходомер.

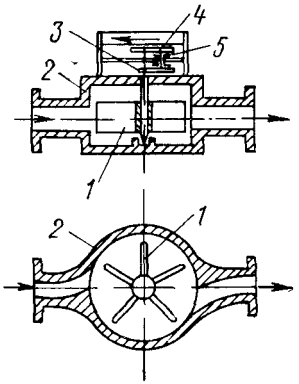



Рис. 7.2. Скоростной счетчик.

*1* — вертушка; *2* — корпус; *3* — передаточный механизм, *4* — счетный механизм; *5* — сальник.

Соединив ось крыльчатой вертушки со счетным механизмом, учитывающим число оборотов, совершаемых за определенное время, получим *скоростной счетчик расхода*.

В скоростных счетчиках расхода в качестве чувствительных элементов применяются как крыльчатые вертушки, ось вращения которых перпендикулярна потоку (рис. 7.2), так и винтовые с осью вращения, направленной вдоль потока. Частота вращения винтовых вертушек при одинаковой скорости потока меньше, чем у крыльчатых, благодаря чему при том же самом счетном механизме они пригодны для измерения бо́льших суммарных расходов. Однако они сложнее в изготовлении, нежели крыльчатые.

Технические характеристики судовых счетчиков расхода, изготавливаемых отечественной промышленностью, приведены в табл. 7.2.

**Дроссельные чувствительные элементы.** Перепад давления на определенной длине трубопровода однозначно связан со средней скоростью потока и, следовательно, с расходом. Для увеличения точности определения перепада давления в трубопроводе устанавливается сужающее (дроссельное) устройство (рис. 7.3, *а*). В месте сужения скорость потока возрастает, статическое давление падает, затем, после сужения, давление восстанавливается, за исключением потерь на трение и завихрение. Непосредственно перед дроссельным устройством давление на стенки трубопровода несколько повышается за счет подпора. Наибольшее сужение струи, ввиду инерции, происходит не в самом дроссельном отверстии, а несколько далее, там же и статическое давление принимает минимальное значение.

Для жидкости уравнения сохранения энергии и сплошности имеют вид

$$\frac{p_1}{\gamma}+\frac{w_1^2}{2g}=\frac{p_2}{\gamma}+\frac{w_2^2}{2g},\quad w_1F_1=w_2F_2, \tag{7 2}$$

где $F_1$, $F_2$ — площади поперечных сечений потока в наиболее широком и узком местах; $p_1$, $p_2$ и $w_1$, $w_2$ — статические давления и средние скорости потока в этих точках; $\gamma$ — удельный вес жидкости. Из уравнений (7.2) получаем

$$w_2=\frac{1}{\sqrt{1-\mu^2\frac{F_0^2}{F_1^2}}}\sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1-p_2)}, \tag{7.3}$$

где $\mu=F_2/F_0$ — коэффициент сужения струи; $F_0$ — площадь поперечного сечения дросселя. Для сжимаемой жидкости (газа) в правую часть формулы (7.3) следует добавить множитель $\varepsilon$ — коэффициент расширения. Заменив $p_1$

и $p_2$ давлениями $p_1'$, $p_2'$ непосредственно до и после дросселя, введем поправочный коэффициент $\zeta$, тогда для газа будем иметь

$$w_2' = \frac{\zeta\varepsilon}{\sqrt{1-\mu^2\frac{F_0^2}{F_1^2}}}\sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1'-p_2')}, \qquad (7.4)$$

для жидкости в (7.4) $\varepsilon = 1$. Объемный расход $Q = F_2 w_2' = \mu F_0 w_2'$, или с учетом (7.4)

$$Q = \alpha\varepsilon F_0\sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1'-p_2')}, \qquad (7\ 5)$$

где для жидкости $\varepsilon = 1$, а коэффициент расхода $\alpha = \mu\zeta\left(1-\mu^2F_0^2/F_1^2\right)^{-1/2}$.

В качестве дроссельных элементов применяются диафрагмы, сопла, трубы Вентури. *Диафрагмы* бывают дисковыми (рис. 7.3, *б*), у которых отбор давлений

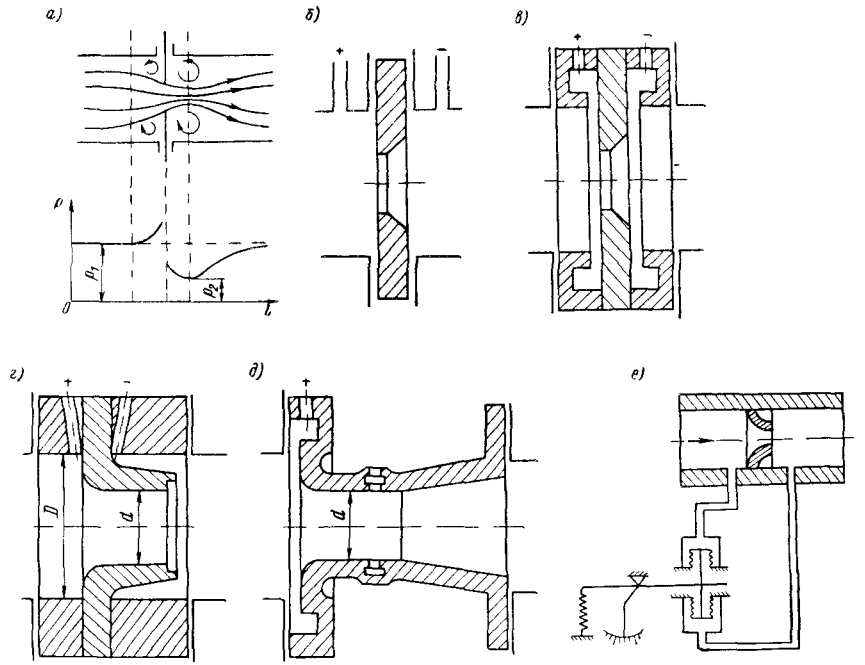



Рис. 7.3. Дроссельные элементы: *а* — распределение струй жидкости и статического давления на стенку трубопровода в окрестности дроссельного устройства (*p* — давление, *l* — длина трубопровода); *б* — диафрагма дисковая; *в* — диафрагма камерная; *г* — сопло; *д* — труба Вентури; *е* — схема дроссельного расходомера.

осуществляется через специальные отверстия, и камерными (рис. 7.3, *в*), у которых отбор давлений производится из кольцевых камер, служащих для выравнивания давления по окружности трубы.

В *соплах* (рис. 7.3, *г*), имеющих плавное сужение, аналогичное сужению струи, невозвратные потери давления на выходе за счет уменьшения завихрений

*Таблица 7 1*

**Технические характеристики объемных счетчиков для жидкости**

| Тип прибора | Тип чувствительного элемента | Калибр (диаметр условного прохода), мм | Контролируемая среда | Расход контролируемой среды, м³/ч | | Параметры контролируемой среды | | | Габаритные размеры, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | минимальный | максимальный | температура, °С | давление, кгс/см² | вязкость, сСт | |
| ШЖУ-15-16<br>ШЖУ-25-16<br>ШЖУ-40-16<br>ШЖУ-60-16<br>ШЖУ-80-16 | Овальные шестерни | 15<br>25<br>40<br>60<br>80 | Бензин, толуол, ксилол, ацетон, бензол, пентан, амилен, изопентан | | | | 16 | | 300×180×196<br>325×250×196<br>392×325×255<br>418×380×305<br>460×520×430 |
| 2-СВШС-25 | | 25 | Бензин, керосин, нефтепродукты | 0,800<br>0,600 | 4 | —20÷+40<br>0—40 | 3 | — | 221×186×148 |
| СВШ-5 16/40 | | 40 | | 2,5<br>1 | 15<br>12 | —20÷+40<br>0—60 | 6 | —<br>6—60 | 341×274×265 |
| СВШС-40 | | 40 | Бензин, керосин, нефтепродукты | 3<br>2 | 20<br>16 | —30÷+40<br>0—40 | 3 | —<br>6—60 | 270×303×257 |
| СШМ-80 | | 80 | | 6 | 60 | —20÷+40 | | | |

*Таблица 7.2*

**Технические характеристики судовых водомеров**

| Тип | Состав комплекта | | Предел показаний счетчика | Мгновенный расход, м³/ч | Питание | Принцип действия |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Первичный преобразователь | Вторичный прибор | | | | |
| РСК-50 | ПРВ-75Т<br>ПРВ-75С | БУАК-75<br>СУР-50 | 10 000—50 000 л | 25—70 | 220 В<br>400 Гц | Движение воды в завихряющем аппарате датчика создает акустическое поле, воспринимаемое электроакустическим прибором, частота следования импульсов которого пропорциональна частоте акустического поля и, следовательно, расходу |
| Дозатор РДК-75/90 | ПРВ-75Т<br>ПРВ-75С<br>ПРВ-90Т<br>ПРВ-90С | БУАК-75<br>БУАК-90<br>ДЭМ | 99,999—99 999 м³ | От 0—25 до 0—400 | 220 В<br>400 Гц | |
| СР2 | РШС-2,5÷400 | СР-0,1—14 | 100—9 900 л | 20—70<br>75—90 | 220 В<br>400 Гц | Датчик содержит вихревую камеру с шариком, увлекаемым потоком. Счетчик электрические импульсы преобразует в угол поворота зубчатых колес |

потока в сравнении с диафрагмами снижаются. В *трубе Вентури* (рис. 7.3, *д*), имеющей на выходе диффузор и благодаря этому в большей степени отвечающей форме струи, эти потери еще меньше. Однако сопло в изготовлении сложнее диафрагмы, а труба Вентури сложнее сопла и занимает больше места. Сопла, как и диафрагмы, могут иметь кольцевые камеры.

Технические характеристики дроссельных элементов приведены в табл. 7.3, 7.4.

*Таблица 7.3*

**Основные данные диафрагм на условные давления до 100 кгс/см²**

| Тип | Условное давление, кгс/см² | Диаметр условного прохода, мм |
|---|---|---|
| ДБ-2,5 | 2,5 | 400—3000 |
| ДБ-6 | 6 | 400—1400 |
| ДБ-10 | 10 | 400—1400 |
| ДБ-16 | 16 | 400—1400 |
| ДК-16 | 16 | 50—500 |
| ДК-25 | 25 | 50—500 |
| ДК-100 | 100 | 50—400 |

ДБ — диаграмма бескамерная; ДК — диаграмма камерная.

*Таблица 7.4*

**Предельно допустимые рабочие температуры и давления для диафрагм**

| Тип | Температура, °С | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | До 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 425 | 450 |
| ДК-25 | 25 | 23 | 20 | 18 | 14 | 14 | 11 |
| ДК-100 | 100 | 92 | 82 | 73 | 64 | 58 | 45 |
| ДБ-2,5 | 2,5 | 2,3 | 2,0 | — | — | — | — |
| ДБ-6 | 6 | 5,5 | 5,0 | — | — | — | — |
| ДБ-10 | 10 | 9,2 | 8,2 | — | — | — | — |
| ДБ-16 | 16 | 15 | 13 | — | — | — | — |

Соединив дроссельный элемент с каким-либо измерителем перепада давлений, получим дроссельный расходомер (рис. 7.3, *е*), широко применяемый в системах автоматического регулирования и контроля расходов на морских судах благодаря простоте устройства, надежности работы и малым погрешностям.

Для точного подсчета расхода на основе измерений дроссельные чувствительные элементы применяются в комплекте с жидкостными дифференциальными манометрами (см. § 6); при этом используется формула (7.5), в которой $F_0$ выражается через квадрат диаметра отверстия дросселя, перепад давлений — через

*Таблица 7.2, а*

**Сигнализаторы расхода, давления, положения, уровня**

| Тип | Пределы измерений | Погрешность | Питание | Контролируемая среда |
|---|---|---|---|---|
| | | Сигнализаторы расхода | | |
| СРИМ | От 2 до 160 м³/ч | ±15% | 220 В 400 Гц | Вода |
| СРВМ | От 10 до 30 м³/ч | ±15% | 220 В 400 Гц | Воздух |
| | | Сигнализаторы давления | | |
| СДМ | От 0,4 до 100 кгс/см² | ±3% | 220 В 400 Гц | Вода |
| *ИСДК* | От 0—1 до 0—500 кгс/см² | ±2% | 220 В 400 Гц | Вода, масло, воздух |
| | | Сигнализаторы положения | | |
| СПМ | От 0—2 до 0—4 мм | ±0,2 мм | 220 В 400 Гц | |
| СПА-1 | 0—62 мм | | 127 В 50 Гц | |
| | | Сигнализаторы уровня | | |
| СУМ-1 | От 0—0,5 до 0—3 м | ±20 мм | 220 В 400 Гц | Вода, масло |
| УЗС-12 УЗС-4М | | ±5 мм | 220В 400 Гц | Вода, масло, топливо |

показание дифманометра, поправочные коэффициенты выбираются по таблицам и графикам, прилагаемым в комплекте к дроссельному элементу.

**Гидродинамические чувствительные элементы.** Согласно уравнению Бернулли

$$\frac{p_c}{\gamma} + \frac{w^2}{2g} + h = \text{const}, \tag{7.6}$$

где $p_c$ и $w$ — статическое давление и скорость в данной точке потока; $\gamma$ — удельный вес; $g$ — ускорение свободного падения. Пренебрегая энергией положения $h$, выразим полную энергию в данной точке потока в единицах давления:

$$p_c + \frac{w^2}{2g}\gamma = p_п, \quad \text{т. е.} \quad w = \sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_п - p_c)}. \tag{7.7}$$

По формуле (7.7), зная полное $p_п$ и статическое $p_c$ давления, можно определить скорость потока $w$ в данной точке. Определив таким путем скорость в ряде точек

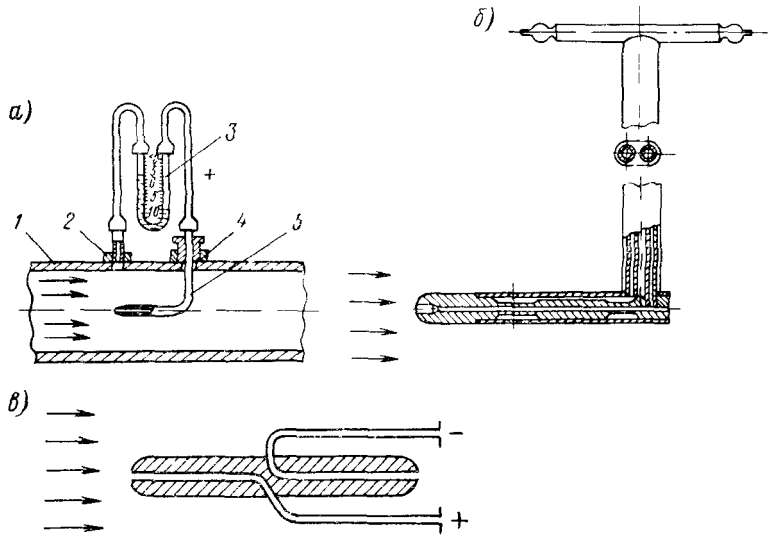



Рис. 7.4. Пневмометрические (гидродинамические) трубки:

*а* — трубка Пито.

*1* — трубопровод; *2* — штуцер; *3* — дифманометр, *4* — сальник; *5* — трубка;

*б* — трубка Прандтля; *в* — трубка Клеве.

по сечению потока и осреднив их, можно найти среднюю скорость, а умножив ее на площадь сечения — мгновенный объемный расход.

В качестве гидродинамических чувствительных элементов, используемых в комплекте с дифманометрами для определения разности полного и статического давлений в потоке, применяют гидродинамические (пневмометрические) трубки.

*Трубка Пито* (рис. 7.4, *а*) представляет собой изогнутую под углом и устанавливаемую в трубопроводе открытым заостренным концом навстречу потоку трубку. Через сальник конец трубки выводится из трубопровода для подсоединения к дифманометру; трубка воспринимает полное давление $p_п$. Во второе колено дифманометра через штуцер в трубопроводе отбирается статическое давление $p_c$, так что дифманометр измеряет разность $p_п - p_c$.

*Трубка Прандтля* (рис. 7.4, *б*) осуществляет отбор жидкости для замера и полного, и статического давлений, для чего имеет два канала. Для замера полного давления $p_п$ жидкость поступает в отверстие на конце трубки, обращенное навстречу потоку. Отбор жидкости для замера статического давления $p_с$ берется через отверстия в средней части изогнутого конца трубки. Трубка Прандтля позволяет более точно определять скорость в данной точке потока, нежели трубка Пито, за счет сближения точек отбора $p_п$ и $p_с$.

*Трубка Клеве* (рис. 7.4, *в*) также имеет два канала, один для отбора полного, другой — для отбора статического давления. Конструкция трубки позволяет устанавливать ее в трубопроводах малого сечения. Эту трубку при смене направления потока не нужно поворачивать, что может представлять определенное преимущество (например, при контроле опрокидывания циркуляции в водотрубных котлах).

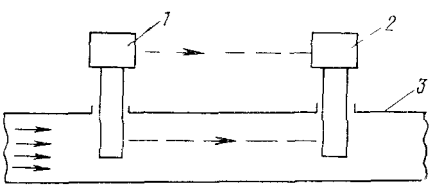



Рис. 7.5. Схема ультразвукового чувствительного элемента.

*1* — излучатель; *2* — приемник; *3* — трубопровод.

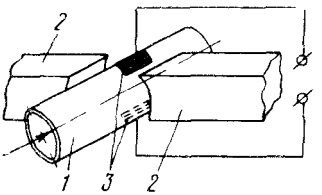



Рис. 7.6. Схема индукционного чувствительного элемента.

*1* — трубопровод; *2* — полюса магнита; *3* — контакты для съема э. д. с.

Гидродинамические чувствительные элементы служат для определения скорости лишь в одной точке потока и поэтому не могут дать непосредственно значение расхода. Однако они незаменимы в случае, если нужно знать распределение скоростей по сечению потока.

**Ультразвуковые чувствительные элементы.** В этих элементах (рис. 7.5) в качестве источников и приемников ультразвука используются пьезоэлектрические элементы (см. § 6), которые обладают способностью превращать механические колебания в электрические и обратно. Источники питаются от высокочастотного генератора. Ультразвук, проходя внутри потока и в воздушной среде, доходит до приемников со сдвигом фаз, зависящим от скорости жидкости в трубопроводе и, следовательно, от ее мгновенного расхода. Выходным сигналом прибора является разность фаз напряжений, снимаемых с приемников ультразвука.

В другой конструкции с помощью автоматического переключения попеременно один из двух установленных в трубопроводе пьезоэлектрических элементов становится то источником, то приемником ультразвука. Сдвиг фаз напряжений, снимаемых с пьезоэлементов, возникает из-за различия в распространении ультразвука по направлению потока и против него. Этот сдвиг фаз пропорционален скорости потока и мгновенному расходу.

На судах применяют ультразвуковой расходомер типа УЗР, позволяющий измерять расход жидкости в пределах от 0 до 7 м³/ч с погрешностью ±2%.

**Индукционные чувствительные элементы.** Индукционный чувствительный элемент (рис. 7.6) состоит из охватывающих трубопровод *1* полюсов *2* электромагнита и контактов *3*, между которыми согласно закону электромагнитной индукции при движении по трубопроводу проводящей жидкости наводится э. д. с., равная

$$e = kDBw, \tag{7.8}$$

где $k$ — постоянный коэффициент; $D$ — диаметр трубопровода; $B$ — магнитная индукция; $w$ — скорость жидкости в трубопроводе.

Эти элементы применяют в системах контроля расходов электролитов, жидких металлов и других проводящих жидкостей.

Присоединив к чувствительному элементу прибор для измерения э. д. с, получим индукционный расходомер. На судах применяют индукционные расходомеры типа 4-РИ, питаемые от сети переменного тока 220 В, 50 Гц, с потребляемой мощностью 575 Вт. Чувствительные элементы этих расходомеров рассчитаны на давление жидкости 6 кгс/см² при температуре 5—120° С или давление 25 кгс/см² при температуре 5—50° С, диапазон измеряемого расхода — от 0,4 до 400 м³/ч.

**Калориметрические чувствительные элементы.** Данный элемент (рис. 7.7) состоит из размещенного в трубопроводе нагревателя *1* и термосопротивлений *2*,

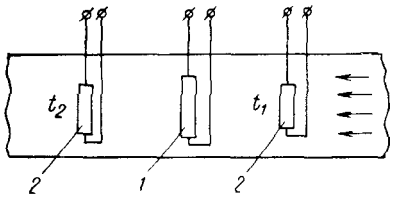
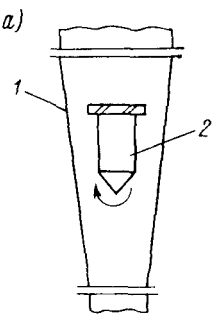



Рис. 7.7. Схема калориметрического чувствительного элемента.



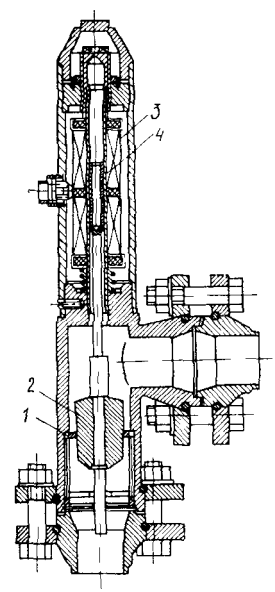




Рис. 7.8. Ротаметры: *а* — принципиальная схема; *б* — ротаметр с электрическим датчиком.

позволяющих измерять температуру потока до и после нагревателя. Количество тепла $Q_т$, ккал/с, передаваемого потоку нагревателем в единицу времени, равно

$$Q_т = cM\,(t_2 - t_1), \qquad (7.9)$$

где $c$ — удельная теплоемкость жидкости в трубопроводе, ккал/(кг·°С); $M$ — мгновенный массовый расход, кг/с; $t_2$ и $t_1$ — температуры до и после нагревателя, °С.

Согласно формуле (7.9) при постоянной мощности нагревателя и равномерном прогреве потока ($Q_т/c = k = \text{const}$) мгновенный расход обратно пропорционален разности температур, $M = k/(t_2 - t_1)$. Температуры, воспринимаемые термометрами сопротивления, легко могут быть преобразованы в электрические сигналы (см. § 5).

**Ротаметрические чувствительные элементы.** Принцип действия ротаметрического чувствительного элемента ясен из его схемы (рис. 7.8, *а*). В трубопроводе, расход жидкости через который измеряется, вертикально устанавливается расширяющийся вверх конический патрубок *1*, в котором размещается свободно плавающий поплавок *2* (для устойчивости положения поплавок закручивается восходящим потоком, для чего он имеет косые прорези на выступающем ободке.) Сила тяжести поплавка $G_п$ уравновешивается напором набегающего потока:

$$G_п = F_п\,(p_1 - p_2), \qquad (7.10)$$

где $F_п$ — площадь сечения поплавка; $p_1$, $p_2$ — давления на его нижнюю и верхнюю поверхности. Так как $G_п$ и $F_п$ постоянны, то и перепад давлений $p_1 - p_2$

*Таблица 7.5*

**Технические характеристики расходомеров с электрической дистанционной передачей показаний**

| Тип | Наибольший предел измерения по воде, м³/ч | Рабочее давление, кгс/см² | Питание | Принцип действия |
|---|---|---|---|---|
| УЗР-Д7 | 100<br>125<br>250 | 100 | 220 В<br>400 Гц | Ультразвуковой.<br>Исполнение водозащищенное |
| ДРДУ-1 | 10<br>25<br>32<br>63<br>100<br>160<br>250<br>320 (дистиллят)<br>63<br>100<br>160<br>250<br>(морская вода) | 5—100<br><br><br><br><br><br><br><br>60<br><br><br><br> | 200 В<br>400 Гц | Перепад давления в сужающем устройстве, воспринимаемый упругим элементом, преобразуется в электрический сигнал. Исполнение водозащищенное |
| МДС-5М с различными вторичными приборами | 0,4<br>0,63<br>1,0<br>1,6<br>2,5<br>3,2<br>4,0<br>5,0<br>6,3<br>8,0<br>10,0<br>12,5<br>16,0 | 45 | 127 В<br>50 Гц | Чувствительный элемент — сопло Вентури и мембрана, перемещение которой преобразуется в электрический сигнал |

Материал для табл. 5.5, 5.7, 5.9, 6.3; 7.2, 7.5, 11.2 предоставил О. П. Демченко

постоянен, а поэтому и средняя скорость $w$ в кольцевом зазоре между патрубком и поплавком примерно постоянна. Объемный расход $Q = wF_к$, где $F_к$ — площадь кольца между поплавком и патрубком, являющаяся функцией высоты $h$ положения поплавка, $F_к = F_к(h)$. Поэтому и расход будет связан с высотой положения поплавка, при увеличении расхода высота $h$ увеличивается. Высота положения поплавка — *выходная координата элемента* — позволяет судить о мгновенном расходе.

Ротамеры — приборы для измерения расхода, в отличие от дроссельных расходомеров, в которых изменяется перепад давления, относятся к расходомерам постоянного перепада.

Конструкция ротамера с электрическим датчиком показана на рис. 7.8, *б*. При увеличении расхода поплавок *2* поднимается, перемещая связанный с ним сердечник *4*, ввиду чего изменяется индуктивность катушки *3*, служащая выходным сигналом, поступающим на вторичный прибор. Поплавок, перемещающийся внутри диафрагмы *1*, имеет форму расширяющегося вверх конуса, так что площадь кольцевого зазора между поплавком и диафрагмой однозначно зависит от высоты положения поплавка.

Технические характеристики расходомеров приведены в табл. 7.5.

## § 8. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ

Уровень жидкости (воды, масла, нефти и т. д.) в резервуаре определяется высотой, отсчитываемой от некоторой точки, принятой за начало отсчета, и измеряется в единицах длины.

В системах автоматического регулирования и контроля уровня на морских судах используются следующие чувствительные элементы:

— *поплавковые элементы*, основанные на поддержании полого тела силой Архимеда на поверхности жидкости, уровень которой измеряется;

— *мембранные элементы*, воспринимающие пропорциональное уровню давление высоты столба жидкости в резервуаре;

— *буйковые элементы*, представляющие собой подвешенное на пружине и частично погруженное в жидкость цилиндрическое тело, на которое действует выталкивающая сила, меняющаяся при изменении уровня жидкости;

— *емкостные элементы*, принцип действия которых основан на зависимости емкости конденсатора, пространство между пластинами которого частично заполнено жидкостью, от уровня этой жидкости;

— *радиоактивные элементы*, в которых используется зависимость поглощения гамма-лучей от плотности среды, через которую они проходят;

— *термогидравлические элементы*, в которых в зависимости от контролируемого уровня нагретой жидкости изменяется количество тепла, передаваемого в замкнутую полость, заполненную другой жидкостью, а следовательно, и давление в этой полости;

— *термостатные элементы*, основанные на зависимости температуры и, следовательно, теплового расширения заполненной нагретой жидкостью металлической трубки от уровня жидкости.

Прибор для измерения уровня называется *уровнемером*. Самым простым и надежным прибором для измерения уровня является водомерное стекло, представляющее собой цилиндрический прозрачный сосуд, сообщающийся с резервуаром, в котором измеряется уровень. Недостатком этих приборов является необходимость их установки непосредственно на объекте контроля. Для дистанционного измерения уровня может быть использован любой из перечисленных элементов.

**Поплавковые чувствительные элементы.** Основной частью элемента является поплавок (рис. 8.1, *а*), представляющий собой полое металлическое тело, имеющее форму шара или цилиндра и размещаемое в камере, соединенной по принципу

сообщающихся сосудов с резервуаром, в котором регулируется уровень. Выходной координатой поплавкового элемента является положение рычага, связанного с поплавком. Недостатками поплавковых чувствительных элементов являются возможность ложных показаний при качке судна, а также повышенная нечувствительность из-за трения в рычажных сочленениях.

**Мембранные чувствительные элементы.** В камере, сообщенной с резервуаром, в котором контролируется уровень, размещается мембрана, воспринимающая пропорциональную уровню в резервуаре разницу давлений в нижней и верхней полостях камеры (рис. 8.1, *б*). Выходной координатой элемента является перемещение штока мембраны или усилие, приложенное к штоку. В измерительных органах автоматических регуляторов с мембранными чувствительными элементами усилие, развиваемое мембраной, обычно передается рычагу и уравновешивается натяжением пружины.

Преимущество этих элементов — возможность установки их на некотором расстоянии от резервуара, в котором контролируется уровень. Для компенсации влияния качки судна на работу мембранного элемента к мембране подвешивают груз, воспринимающий бо́льшую часть усилия, возникающего от действия на мембрану перепада давлений. При качке судна составляющая веса груза, направленная вниз, меняется по тому же закону, что и высота столба жидкости, отсчитываемая вертикально и воспринимаемая мембраной, что исключает появление периодической внешней силы, действующей на мембрану.

Мембранные чувствительные элементы широко применяются для измерения уровней в различных емкостях судовых установок.

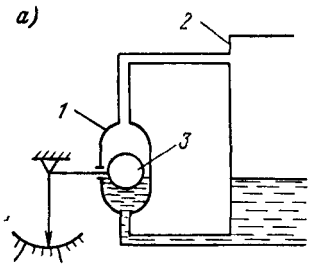
Конструкция мембранного чувствительного элемента, применяемого в судовых паросиловых установках, изображена на рис. 8.2.

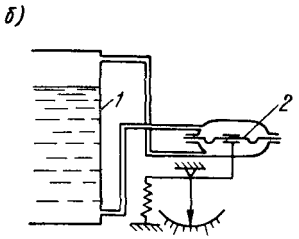
**Буйковые чувствительные элементы** (рис. 8.1, *в*). В камере, сообщенной с резервуаром, в котором измеряется уровень, на пружине *1* подвешен буек *2*, частично погруженный в жидкость. Пружина воспринимает разность между силой тяжести и выталкивающей силой. При увеличении уровня выталкивающая сила возрастает, действующая на пружину разность сил уменьшается, ввиду чего уменьшается растяжение пружины и буек поднимается вверх. Высота положения буйка однозначно связана с уровнем.

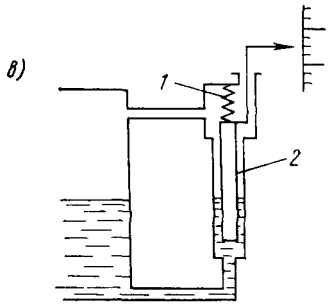
**Емкостные чувствительные элементы.** Емкостной чувствительный элемент (рис. 8.1, *г*) представляет собой цилиндрический сосуд *1*, заполненный жидкостью, уровень которой измеряется, и вставленный в него стержень *2*. Сосуд и стержень образуют обкладки конденсатора, емкость которого $C = C_1 + C_2$, где $C_1$ — емкость нижней части, заполненной проводящей жидкостью; $C_2$ — емкость верхней части. Суммарная емкость $C$, линейно зависящая от уровня жидкости, является выходной координатой элемента. Аналогично вместо цилиндрического может быть использован и плоский конденсатор.

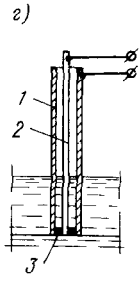
**Радиоактивные чувствительные элементы.** Радиоактивный чувствительный элемент, или элемент поглощения (рис. 8.1, *д*), содержит источник гамма-излучения *2* и приемник *4*, между которыми размещен сосуд *3*, сообщенный с резервуаром, в котором контролируется уровень. От уровня в сосуде *3* зависит поглощение излучения. Источником гамма-излучения служат радиоактивные изотопы (чаще кобальт-60), приемником — ионизационные камеры. Ионизационная камера представляет собой сосуд с газом под давлением и размещенными в ней электродами, на которые подается разность потенциалов. Поток гамма-лучей ионизирует газ в камере, возникающий ионизационный ток зависит от интенсивности непоглощенного гамма-излучения и, следовательно, от контролируемого уровня.

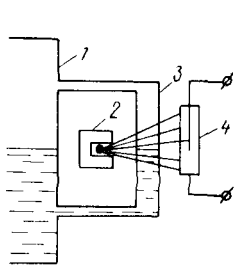
Прибор для измерения уровня с радиоактивным элементом называется радиоактивным уровнемером. Схема одного из радиоактивных уровнемеров представлена на рис. 8.3. Источник *1* и приемник *9* гамма-излучения заключены в герметичных трубах. Измерительная схема представляет собой следящую систему, поддерживающую интенсивность воспринимаемого приемником излучения на заданном значении, при котором излучатель *1* и приемник *9* расположены на одной высоте с контролируемым уровнем. При отклонении этой высоты от измеряемого уровня интенсивность воспринимаемого приемником излучения меняется, электронный блок *7* усиливает сигнал рассогласования и включает исполнитель-

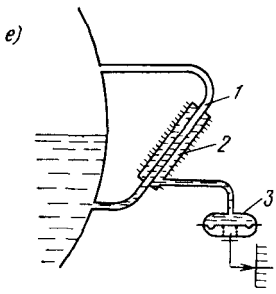


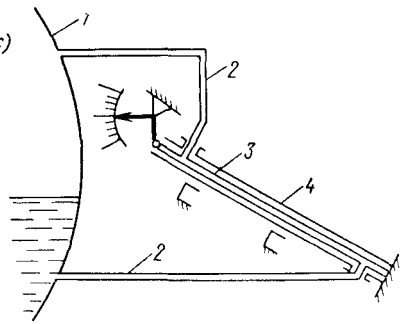




Рис. 8.1. Элементы для измерения уровня:

*а* — поплавковый:

*1* — измерительная камера; *2* — объект измерения уровня; *3* — поплавок;

*б* — мембранный:

*1* — объект измерения уровня; *2* — мембрана;

*в* — буйковый:

*1* — пружина; *2* — буек;

*г* — емкостный:

*1* — сосуд с жидкостью; *2* — стержень, *3* — изолятор;

*д* — радиоактивный:

*1* — объект измерения уровня; *2* — источник гамма-излучения; *3* — сообщающийся сосуд; *4* — ионизационная камера;

*е* — термогидравлический:

*1* — внутренняя полость термогенератора; *2* — внешняя полость термогенератора; *3* — мембрана;

*ж* — термостатный:

*1* — паровой коллектор котла; *2* — сообщающие трубки; *3* — термостатная трубка; *4* — корпус.

ный реверсивный двигатель *4*; последний вращает барабан *5* с гибкими лентами и меняет высоту подвеса излучателя и приемника, пока она не совпадет с контролируемым уровнем. Сельсин-датчик *6*, связанный с механической системой прибора, выдает сигнал, пропорциональный уровню.

**Термогидравлические чувствительные элементы** (рис. 8.1, *е*). Внутренняя полость *1* элемента сообщена с резервуаром, в котором контролируется уровень

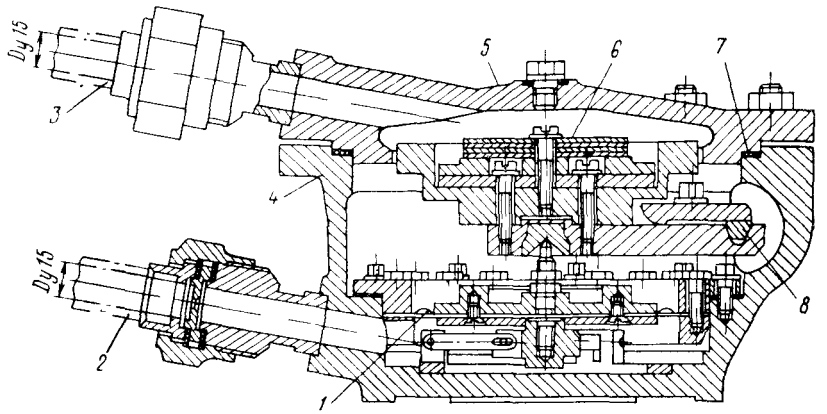



Рис. 8.2. Конструкция мембранного чувствительного элемента.

*1 — мембрана; 2 — подвод давления в нижнюю полость; 3 — подвод давления в верхнюю полость; 4 — корпус; 5 — крышка; 6 — грузы; 7 — прокладка; 8 — выходной валик.*

нагретой жидкости (например, с паровым коллектором судового котла). Внешняя полость *2* заполнена конденсатом. При уменьшении контролируемого уровня (и соответствующего ему уровня во внутренней полости) меняется теплопередача к конденсату, так как коэффициенты теплоотдачи от воды и от пара к стенке

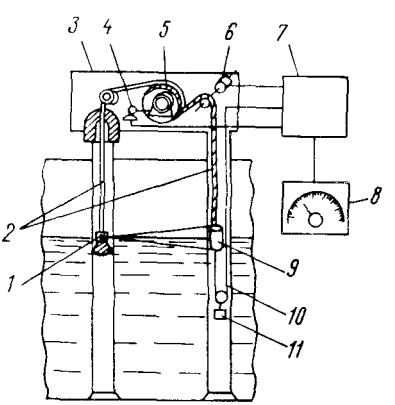



Рис. 8.3. Радиоактивный уровнемер.

*1* — источник излучения, *2* — гибкие металлические ленты; *3* — корпус; *4* — реверсивный электродвигатель; *5* — барабан для намотки гибких лент; *6* — сельсин-датчик; *7* — электронный блок управления электродвигателем; *8* — показывающий прибор; *9* — приемник излучения; *10* — гибкий кабель; *11* — груз.

трубки различны. Ввиду этого изменяются температура и давление в замкнутой полости *2*; изменение давления, однозначно связанное с уровнем, воспринимает мембрана *3*.

**Термостатные чувствительные элементы.** Термостатный чувствительный элемент (рис. 8.1, *ж*) представляет собой трубку, сообщающуюся с резервуаром, в котором измеряется уровень нагретой жидкости, и размещенную в корпусе.

При изменении уровня нагретой жидкости изменяются температура трубки и ее тепловое расширение, служащее выходным сигналом элемента. Трубка должна иметь тепловую изоляцию от внешней среды. Данные элементы применяются при условии, если температура жидкости, уровень которой измеряется, постоянна. В частности, они применяются для измерения и контроля уровня воды в судовых паровых котлах.

**Дистанционные указатели уровня жидкости.** Соединив один из рассмотренных чувствительных элементов с каким-либо датчиком и вторичным прибором, получим дистанционный указатель уровня.

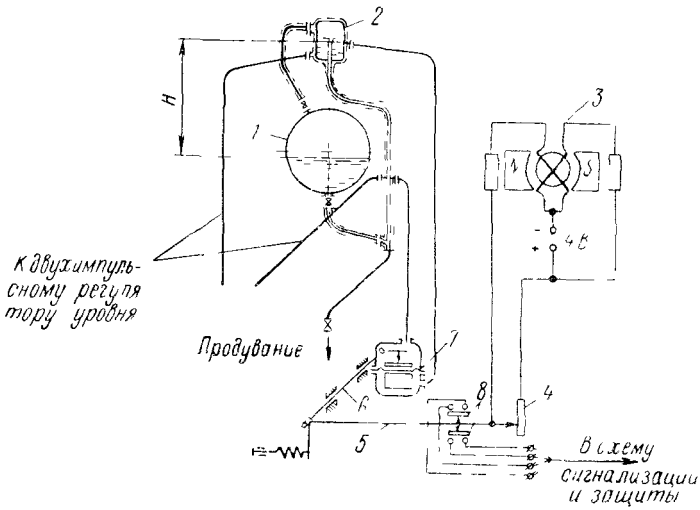



Рис. 8.4. Схема дистанционного мембранного указателя уровня воды в судовом паровом котле.

*1* — паровой коллектор котла; *2* — уравнительный (конденсационный) сосуд; *3*—логометр; *4* — переменное сопротивление; *5* — рычаг; *6* — палик; *7* — мембрана; *8* — контакты системы сигнализации и защиты.

В качестве дистанционных указателей уровня в судовых паровых котлах распространены указатели с мембранными чувствительными элементами (рис. 8.4). На мембрану *7* действует усилие, пропорциональное высоте столба воды *H* между постоянным уровнем в конденсационном сосуде *2* и измеряемым переменным уровнем в паровом коллекторе *1* котла. Перемещение мембраны через рычажную шкалу вызывает смещение движка реохорда *4*, сопротивление которого измеряется логометром (см. § 5).

## § 9. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Частотой вращения *n* называют число оборотов, совершаемых в минуту твердым телом, вращающимся вокруг неподвижной оси. Между частотой вращения *n*, об/мин, угловой скоростью $\omega$, рад/с, и периодом *T*, с, существуют зависимости:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \qquad T = \frac{2\pi}{\omega}. \tag{9.1}$$

В системах автоматического регулирования и контроля частоты вращения судовых механизмов находят применение следующие чувствительные элементы:

— *механические центробежные элементы*, принцип действия которых основан на зависимости центробежной силы, действующей на вращающееся вокруг оси твердое тело, от частоты вращения;

— *гидравлические центробежные элементы*, давление нагнетания которых является функцией частоты вращения их роторов;

— *магнитоиндукционные элементы*, основанные на зависимости от частоты вращения силы взаимодействия поля вращающегося постоянного магнита с индуцированными в металлическом стержне вихревыми токами;

— *тахогенераторные элементы*, принцип действия которых основан на возникновении э. д. с. при движении проводника в магнитном поле согласно закону электромагнитной индукции;

— *стробоскопические элементы*, применяемые в измерительных приборах и основанные на уравнивании измеряемой частоты вращения с известной частотой вращения прибора путем наблюдения за прерывающимся световым потоком, поступающим от вращающегося вала.

Приборы для измерения частоты вращения носят название *тахометров*.

**Механические центробежные элементы.** Механические центробежные элементы имеют груз, вращающийся вокруг оси с частотой, которую требуется измерять. Центробежная сила, приложенная к грузу и пропорциональная квадрату угловой скорости, уравновешивается натяжением пружины. При изменении частоты вращения центробежная сила растягивает пружину, груз удаляется от оси; перемещение груза передается выходному рычагу.

На рис. 9.1, *а* изображена схема механического центробежного элемента, применяемого в системах автоматического регулирования угловой скорости судовых двигателей. Вращение валика *1* через крестовину *2* передается грузам *3*. При увеличении частоты вращения грузы расходятся, и муфта *4*, преодолевая сопротивление пружины *5*, поворачивает по часовой стрелке рычаг *6*.

На рис. 9.1, *б* изображена схема механического центробежного тахометра с кольцевым грузом. Валик *1* тахометра приводится во вращение от вала, частота вращения которого измеряется. Кольцо *2*, служащее грузом, при увеличении частоты вращения под действием центробежной силы преодолевает натяжение спиральной пружины *3* и стремится занять перпендикулярное к валику *1* положение. Перемещение кольца через рычаг *5* и зубчатую передачу *4* передается стрелке указателя.

Центробежные механические элементы применяются в защитных устройствах — регуляторах предельной частоты вращения механизмов, в системах автоматического регулирования угловой скорости, в стационарных и переносных тахометрах. Их достоинствами являются высокая точность, отсутствие специальных источников питания. Однако они подвержены воздействию сотрясений.

**Гидродинамические центробежные элементы.** Эти элементы представляют собой импеллеры или шестеренные насосы.

Крыльчатка *1* импеллера (рис. 9.1, *в*) нагнетает масло из камеры *2* с давлением $p_0$. Давление нагнетания $p$, служащее выходным сигналом элемента, пропорционально квадрату угловой скорости $\omega$ вала *3*.

В другом элементе давление нагнетания шестеренного насоса *1* (рис. 9.1, *г*), однозначно зависящее от частоты вращения, воспринимается сильфоном *2*; перемещение дна сильфона передается выходному рычагу.

В качестве рабочей жидкости в гидродинамических элементах обычно используют масло, идущее на смазку подшипников механизма.

Гидродинамические чувствительные элементы не подвержены воздействию сотрясений; в этом состоит их преимущество перед центробежными механическими элементами. Они удобны для дистанционной передачи выходного сигнала — давления масла, однако имеют неравномерную шкалу вторичного прибора. На судах они находят применение в основном в системах автоматического регулирования и защиты частоты вращения механизмов.

**Магнитоиндукционные элементы.** На валу *1* (рис. 9.1, *д*), частота вращения которого измеряется, закреплен магнит *2* с магнитопроводом *4*. Во вращающемся магнитном поле этого магнита находится стакан *3*, насаженный на ось *5*.

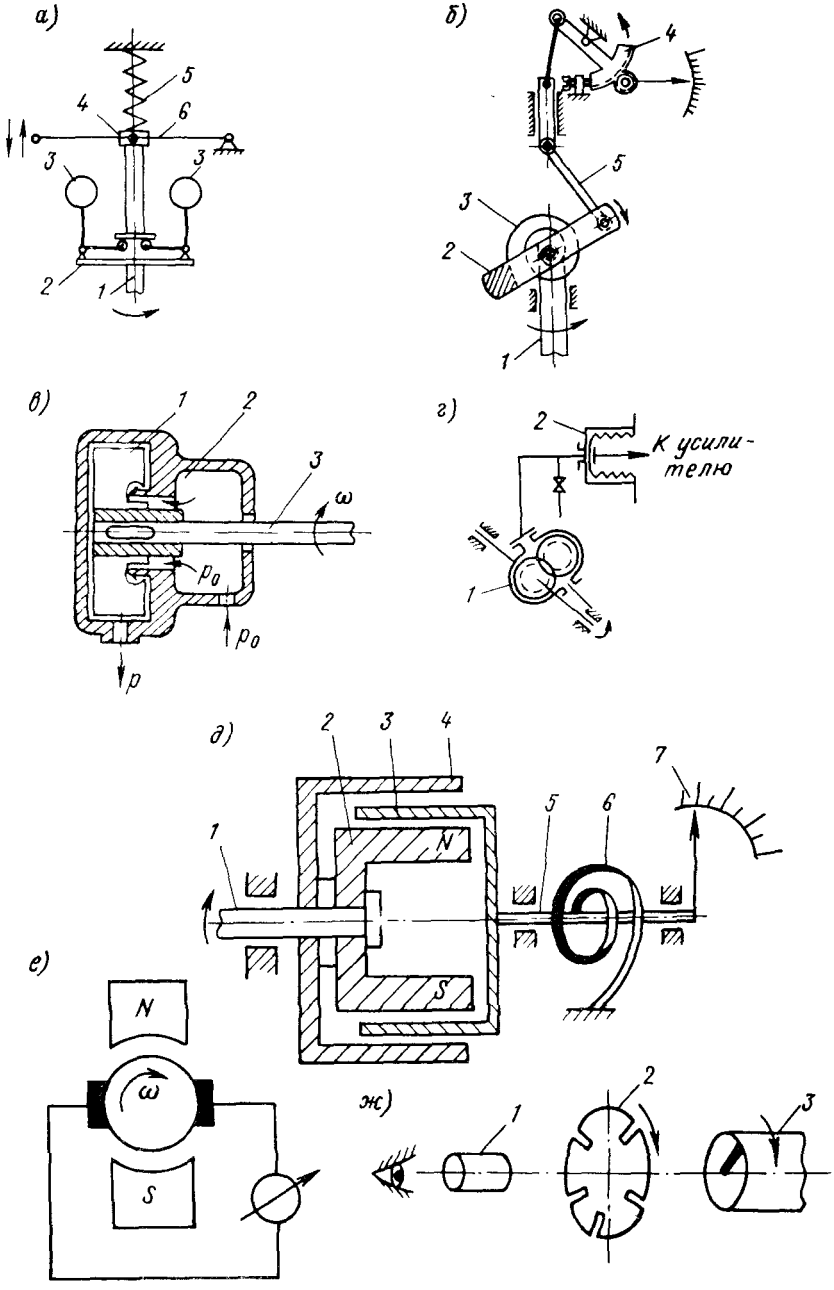



Рис. 9.1. Схемы устройств для измерения частоты вращения: *а* — центробежный маятник; *б* — механический тахометр кольцевого типа; *в* — центробежный импеллер; *г* — шестеренный измеритель частоты вращения; *д* — магнитоиндукционный элемент; *е* — тахогенератор; *ж* — стробоскопический тахометр.

В стакане индуцируется э. д. с., создающая вихревые токи. Взаимодействие магнитного поля вращающегося магнита *2* с магнитными полями вихревых токов создает момент, величина которого зависит от частоты вращения и который стремится повернуть стакан *3* в направлении вала *1*. Этому моменту противодействует момент спиральной пружины *6*. Равновесное положение устанавливается в зависимости от частоты вращения при определенном угле поворота стакана, отмечаемом по шкале *7*. Шкала градуируется в единицах измеряемой частоты вращения.

Изложенный принцип действия и устройства имеют применяемые на судах магнитоиндукционные тахометры типа ТКМ и ТКМС; последние снабжаются счетчиком оборотов вала за период эксплуатации. Магнитоиндукционные тахометры типа ТЭ-204 и ИТМ, используемые на судах, имеют дистанционную передачу, представляющую собой трехфазный синхронный генератор, насаженный на вал, частота которого измеряется, и электрический двигатель, на валу которого размещен непосредственно тахометр. Магнитоиндукционные тахометры имеют равномерную шкалу, надежны в работе.

**Тахогенераторы.** Тахогенератор (рис. 9.1, *е*) представляет собой миниатюрный генератор переменного или постоянного тока, приводимый в движение от вала, частота вращения которого измеряется. Выходной величиной тахогенератора является напряжение, пропорциональное частоте вращения. Если обмотка генератора выведена через контактные кольца, на выходе будет переменное напряжение, если через коллектор — постоянное напряжение.

Достоинствами тахогенераторов являются небольшие размеры и масса, удобство дистанционной передачи показаний, равномерность шкалы вторичного прибора. Так как тахогенераторы выдают электрический сигнал, они удобны для использования в электрических системах. Они применяются на судах также для измерения частоты вращения гребного вала, причем вторичными приборами служат вольтметры.

На судах для измерения частоты вращения гребных валов применяют электрические тахометры типа К16 с тахогенераторами типа МЭТ 8/30 и вольтметрами типа М189 или М170; погрешность их показаний составляет 1—2%.

Тахогенераторы используются в качестве датчиков в *синхроноскопах* — приборах для синхронизации частоты вращения двух участков гребного вала, временно разобщенных муфтой, перед их соединением. Синхронизация частоты вращения необходима для плавного соединения муфтой разобщенных участков. Тахогенераторы, устанавливаемые на каждом из участков, генерируют напряжения, включенные в электрическую сеть навстречу друг другу, благодаря чему возникает сигнал, пропорциональный разности угловых скоростей вращающихся валов. При равенстве этого сигнала нулю частоты вращения валов совпадают.

**Стробоскопические тахометры.** Стробоскопический тахометр (рис. 9.1, *ж*) имеет диск *2* с прорезями, приводимый во вращение от автономного пружинного привода или миниатюрного электродвигателя. Частота вращения диска через передаточный механизм передается стрелке на шкале прибора, заранее отградуированной с высокой точностью. Тахометр снабжают приспособлением для изменения частоты вращения диска, а также автоматическим регулятором для стабилизации этой частоты.

Прибор визируют на какую-либо деталь вала, частоту вращения которого нужно измерить (например, на черту, нанесенную на торце вала); затем меняют частоту вращения диска прибора, наблюдая в окуляр *1*, пока названная деталь вращающегося вала *3* не будет постоянно видна на одном и том же месте, т. е. пока глазу не станет казаться, что вал остановился. Этот зрительный эффект возникает при условии, если наблюдаемая вращающаяся деталь во всех положениях, кроме одного, закрыта от глаза, причем периоды, когда она не видна, малы, так что зрительный образ не успевает исчезнуть. Данный эффект возникает, когда частота вращения вала равна частоте, с которой световые импульсы через вращающийся диск с прорезями достигают глаза наблюдателя. Благодаря этому шкала прибора может быть отградуирована в единицах измеряемой частоты вращения.

Достоинствами прибора являются высокая точность, возможность бесконтактного дистанционного измерения частоты вращения, его недостатки — сложность кинематической схемы, необходимость непосредственного участия человека в процессе измерения.

## § 10. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Крутящий момент $M_{кр}$, кгс·м, совместно с частотой вращения $n$, об/мин, однозначно определяет мощность $N$, передаваемую вращающимся валом:

$$N = \frac{1}{60} M_{кр} n, \text{ кгс·м/с}. \qquad (10.1)$$

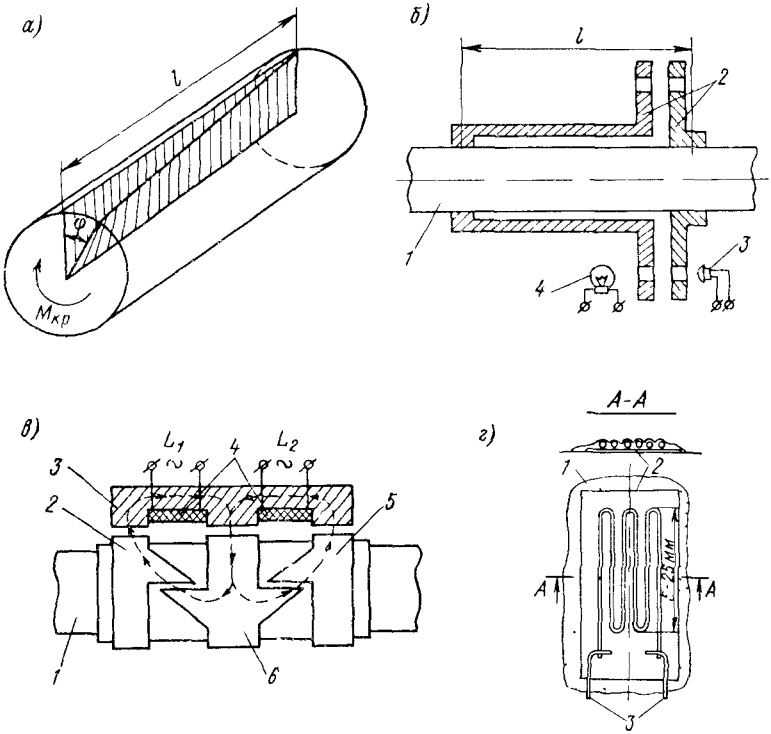



Рис. 10.1. Торсиометры:

*а* — скручивание вала при передаче крутящего момента;
*б* — фотоэлектрический датчик торсиометра:
*1* — вал, *2* — диски с отверстиями, *3* — фотоэлемент, *4* — электролампа;
*в* — индуктивный датчик торсиометра; *г* — проволочный тензодатчик:
*1* — клей, *2* — бумага, *3* — выводы.

При передаче мощности вращающимся валом происходит скручивание вала (рис. 10.1, *а*). Величина угла скручивания φ между сечениями вала, расположен-

ными на расстоянии $l$ друг от друга, пропорциональна крутящему моменту:

$$\varphi = \frac{l}{EJ} M_{кр}, \qquad (10\ 2)$$

где $E$ — модуль упругости материала, из которого изготовлен вал; $J = \pi D^4/32$ — полярный момент инерции сечения круглого вала.

*Для измерения величины угла скручивания вала между двумя его сечениями*, характеризующей крутящий момент, наиболее часто применяют следующие датчики:

— *фотоэлектрические датчики*, принцип действия которых основан на зависимости интенсивности светового потока, идущего от источника к фотоэлементу, от угла скручивания вала и, следовательно, от крутящего момента;

— *индуктивные датчики*, в которых индуктивные сопротивления катушек, включенных в измерительную электрическую сеть, являются функциями угла скручивания вала;

— *тензометрические (проволочные) датчики*, основанные на зависимости электрического сопротивления проволочного проводника от его деформации, пропорциональной углу скручивания вала.

Приборы для измерения крутящего момента называют *торсиометрами*.

**Торсиометры с фотоэлектрическими датчиками.** Датчик этого торсиометра (рис. 10.1, *б*) имеет диски с отверстиями насаженные на вал на расстоянии $l$ друг от друга. Через отверстия в дисках проходит световой поток от электролампы к фотоэлементу. При передаче крутящего момента вал скручивается, отверстия в дисках смещаются друг относительно друга, ввиду чего изменяется интенсивность светового потока, падающего на фотоэлемент. Сила тока, вырабатываемого фотоэлементом, является функцией крутящего момента и служит выходным сигналом датчика, поступающим через усилитель на вторичный прибор.

**Индуктивные датчики торсиометров** (рис. 10.1, *в*). Прибор состоит из закрепленных на вращающемся валу *1* магнитопроводов *2*, *5* и *6* и индуктивных катушек *4*, питаемых переменным током, витки которых уложены в неподвижном сердечнике *3*. При неподвижном вале зазоры в парах магнитопроводов *2*, *6* и *5*, *6* одинаковы, индуктивности $L_1$ и $L_2$ катушек равны. При вращении вал скручивается, названные зазоры становятся разными по величине, что приводит к различию индуктивных сопротивлений катушек, воспринимаемому электрической сетью. Разность $L_1 - L_2$, являющаяся функцией частоты вращения вала, служит выходным сигналом.

**Проволочные тензодатчики торсиометров.** Проволочный тензодатчик изготавливается из проволоки диаметром 0,02—0,05 мм, материал которой имеет высокое удельное сопротивление (константан, нихром, манганин). Электрическое сопротивление тензодатчика составляет от нескольких сотен до 2000 Ом. Проволока приклеивается зигзагообразно к полоске папиросной бумаги, сверху заклеивается вторым листом папиросной бумаги (рис. 10.1, *г*), и все это наклеивается на деталь, малая деформация которой измеряется, в данном случае — на вал. Прямолинейные участки проволоки размещаются по направлению измеряемой деформации. Скручивание вала вызывает растяжение проволочного тензодатчика, ввиду чего поперечное сечение проволоки уменьшается, а электрическое сопротивление возрастает.

Для включения расположенного на вращающемся валу датчика в измерительную схему используются контакты, скользящие по охватывающим вал кольцам. Изменение сопротивления тензодатчика составляет доли процента. Это требует усиления сигнала и температурной компенсации. Электронный усилитель целесообразно размещать непосредственно на валу между тензодатчиком и контактными кольцами, чтобы уменьшить влияние непостоянства сопротивления скользящих контактов на величину выходного сигнала.

В качестве вторичных приборов, измеряющих изменение сопротивления тензодатчика, используются измерительные мосты (см. § 5).

Торсиометры с электрическими датчиками являются относительно сложными в настройке приборами. Они используются для определения мощностей механизмов судовых установок, главным образом при их испытаниях и настройке.

## § 11. СОЛЕМЕРЫ

Соленость воды определяется общим количеством содержащихся в ней хлористых солей (хлоридов) и является важным показателем качества технической воды. Единицей измерения солености служит градус Брандта (°Б). Один градус Брандта соответствует содержанию в 1 л воды хлористых солей, эквивалентному содержанию 10 мг/л NaCl.

*Приборы, служащие для измерения солености воды (или пара), называют солемерами.*

Наиболее точно соленость воды может быть определена на основе химических реакций путем подсчета количества реактивов, участвовавших в реакции, однако химические способы трудно автоматизировать.

Принцип действия электрических солемеров основан на зависимости удельной электропроводности воды от количества растворенных в ней солей. Удельная электропроводность $\chi$ — величина, обратная удельному сопротивлению $\rho$:

$$\chi = \frac{1}{\rho}, \quad \rho = \frac{RS}{l}, \qquad (11\ 1)$$

где $R$ — полное электрическое сопротивление проводника; $S$ — площадь его поперечного сечения; $l$ — длина.

*При постоянной температуре раствора* с увеличением концентрации растворенных солей его электропроводность увеличивается, причем между концентрацией раствора данной соли и удельной электропроводностью существует однозначная зависимость (табл. 11.1). Чувствительным элементом электрических солемеров служит камера с электродами, по которой протекает исследуемая вода. К электродам подключается вторичный прибор, измеряющий сопротивление

*Таблица 11.1*

**Зависимость удельной электропроводности водного раствора NaCl от концентрации раствора при температуре 20° С**

| Концентрация раствора, мг/л | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|
| Удельная электропроводность, $Ом^{-1} \cdot см^{-1}$ | 10,0 | 19,6 | 28,4 | 38,0 | 46,6 |

протеканию тока, шкала которого градуируется в градусах Брандта. В качестве вторичных приборов для измерения электрического сопротивления применяют логометры и измерительные мосты (см. § 5).

Электроды солемеров подвержены поляризации (например, на катоде выделяются пузырьки водорода, образующиеся из ионов водорода), ввиду чего происходит повышение сопротивления раствора, не связанное с его концентрацией. Это явление исключается при работе солемера на переменном токе.

Ввиду интенсификации электролитической диссоциации с ростом температуры при той же концентрации раствора его электрическое сопротивление уменьшается. Во избежание искажения показаний из-за изменения температуры раствора электрические солемеры снабжают устройствами температурной компенсации.

**Электрический солемер на переменном токе с неуравновешенным измерительным мостом.** Принципиальная схема солемера представлена на рис. 11.1. К одной диагонали неуравновешенного измерительного моста (см. § 5) подводится переменный ток, в другую через полупроводниковые выпрямители включен магнитоэлектрический милливольтметр. Сопротивления $R_1$, $R_2$, $R_3$ обычно изготавливают из манганина, $R_5$ — из меди. Сопротивление $R_4$ с ростом температуры уменьшается, а $R_5$ — увеличивается; эти сопротивления подбираются

так, чтобы их сумма при изменении температуры в определенном диапазоне не менялась. Сопротивление $R_4$ с увеличением концентрации раствора уменьшается; это позволяет градуировать шкалу милливольтметра в градусах Брандта.

Аналогично устроены электрические солемеры с автоматическими уравновешенными измерительными мостами.

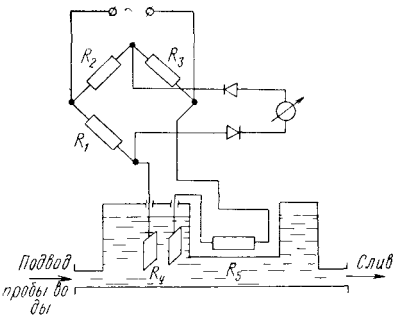



Рис. 11.1. Принципиальная схема электрического солемера с температурной компенсацией и неуравновешенным измерительным мостом в качестве вторичного прибора.

На точности показаний электрических солемеров сказывается переменность состава солей.

Технические характеристики электрических солемеров даны в табл. 11.2.

*Таблица 11.2*

**Технические характеристики солемеров**

| Тип солемера | Пределы показаний прибора | Погрешность, % | Питание | Тип датчика | Тип вторичного прибора |
|---|---|---|---|---|---|
| СУВ1-01 | 0—0,4 мг/л | ±4 | 220 В 400 Гц | ДСВ14-01 | ИПТВ-51 |
| СУВ1-03 | 0—4 мг/л | ±4 | 220 В 400 Гц | ДСВ15-01 | ИПТВ-51 |
| СУВ1-05 | 0—20 мг/л | ±4 | 220 В 400 Гц | ДСВ16-06 | ИПТВ-51 |
| СУВ1-07 | 0—100 мг/л | ±4 | 220 В 400 Гц | ДСВ16-01 | ИПТВ-51 |
| СУВ2-01 | 0—0,4 мг/л | ±4 | 220 В 400 Гц | ДСВ14-01 | ПИ-51 |
| СПИ-01 | От 0—2 до 0—400 мг/л | ±6 | 220 В 400 Гц | | |
| СПИ-05 СПИ-06 | От 0—0,4 до 0—400 мг/л | ±6 | 220 В, 400 Гц | | |

## § 11. СОЛЕМЕРЫ

*Соленость воды определяется общим количеством содержащихся в ней хлористых солей (хлоридов) и является важным показателем качества технической воды. Единицей измерения солености служит градус Брандта (°Б). Один градус Брандта соответствует содержанию в 1 л воды хлористых солей, эквивалентному содержанию 10 мг/л NaCl.*

*Приборы, служащие для измерения солености воды (или пара), называют солемерами.*

Наиболее точно соленость воды может быть определена на основе химических реакций путем подсчета количества реактивов, участвовавших в реакции, однако химические способы трудно автоматизировать.

Принцип действия электрических солемеров основан на зависимости удельной электропроводности воды от количества растворенных в ней солей. Удельная электропроводность $\chi$ — величина, обратная удельному сопротивлению $\rho$

$$\chi = \frac{1}{\rho}, \quad \rho = \frac{RS}{l}, \tag{11 1}$$

где $R$ — полное электрическое сопротивление проводника; $S$ — площадь его поперечного сечения; $l$ — длина.

*При постоянной температуре раствора* с увеличением концентрации растворенных солей его электропроводность увеличивается, причем между концентрацией раствора данной соли и удельной электропроводностью существует однозначная зависимость (табл. 11 1). Чувствительным элементом электрических солемеров служит камера с электродами, по которой протекает исследуемая вода. К электродам подключается вторичный прибор, измеряющий сопротивление

*Таблица 11 1*

**Зависимость удельной электропроводности водного раствора NaCl от концентрации раствора при температуре 20° С**

| Концентрация раствора, мг/л | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|
| Удельная электропроводность, $Ом^{-1} \cdot см^{-1}$ | 10,0 | 19,6 | 28,4 | 38,0 | 46,6 |

протеканию тока, шкала которого градуируется в градусах Брандта В качестве вторичных приборов для измерения электрического сопротивления применяют логометры и измерительные мосты (см. § 5).

Электроды солемеров подвержены поляризации (например, на катоде выделяются пузырьки водорода, образующиеся из ионов водорода), ввиду чего происходит повышение сопротивления раствора, не связанное с его концентрацией. Это явление исключается при работе солемера на переменном токе.

Ввиду интенсификации электролитической диссоциации с ростом температуры при той же концентрации раствора его электрическое сопротивление уменьшается. Во избежание искажения показаний из-за изменения температуры раствора электрические солемеры снабжают устройствами температурной компенсации.

**Электрический солемер на переменном токе с неуравновешенным измерительным мостом.** Принципиальная схема солемера представлена на рис. 11.1. К одной диагонали неуравновешенного измерительного моста (см. § 5) подводится переменный ток, в другую через полупроводниковые выпрямители включен магнитоэлектрический милливольтметр. Сопротивления $R_1$, $R_2$, $R_3$ обычно изготавливают из манганина, $R_5$ — из меди. Сопротивление $R_4$ с ростом температуры уменьшается, а $R_5$ — увеличивается; эти сопротивления подбираются

так, чтобы их сумма при изменении температуры в определенном диапазоне не менялась. Сопротивление $R_4$ с увеличением концентрации раствора уменьшается; это позволяет градуировать шкалу милливольтметра в градусах Брандта.

Аналогично устроены электрические солемеры с автоматическими уравновешенными измерительными мостами.

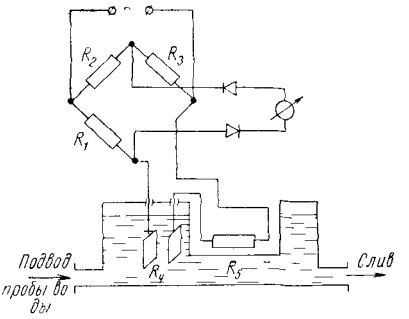



Рис. 11.1. Принципиальная схема электрического солемера с температурной компенсацией и неуравновешенным измерительным мостом в качестве вторичного прибора.

На точности показаний электрических солемеров сказывается переменность состава солей.

Технические характеристики электрических солемеров даны в табл. 11.2.

*Таблица 11.2*

**Технические характеристики солемеров**

| Тип солемера | Пределы показаний прибора | Погрешность, % | Питание | Тип датчика | Тип вторичного прибора |
|---|---|---|---|---|---|
| СУВ1 01 | 0—0,4 мг/л | ±4 | 220 В 400 Гц | ДСВ14 01 | ИПТВ 51 |
| СУВ1-03 | 0—4 мг/л | ±4 | 220 В 400 Гц | ДСВ15 01 | ИПТВ-51 |
| СУВ1-05 | 0—20 мг/л | ±4 | 220 В 400 Гц | ДСВ16-06 | ИПТВ-51 |
| СУВ1-07 | 0—100 мг л | ±4 | 220 В 400 Гц | ДСВ16-01 | ИПТВ-51 |
| СУВ2-01 | 0—0,4 мг/л | ±4 | 220 В 400 Гц | ДСВ14-01 | ПИ-51 |
| СПИ-01 | От 0—2 до 0—400 мг/л | ±6 | 220 В 400 Гц | | |
| СПИ-05 СПИ-06 | От 0—0,4 до 0—400 мг/л | ±6 | 220 В, 400 Гц | | |

## § 12. КИСЛОРОДОМЕРЫ

Кислородосодержание воды определяется количеством растворенного в ней кислорода и измеряется в миллиграммах кислорода, содержащегося в 1 л воды. Кислородосодержание технической воды должно удовлетворять нормам, так как *его повышение вызывает коррозию оборудования.*

Приборы для измерения кислородосодержания называют *кислородомерами.*

**Электрический кислородомер, воспринимающий парциальное давление кислорода в среде, соприкасающейся с водой.** Принцип действия этого кислородомера (рис. 12.1) основан на зависимости концентрации кислорода в воде от парциального давления его в среде, соприкасающейся с водой. К одной из диагоналей неуравновешенного измерительного моста подводится ток от источника постоянного напряжения, в другую включен милливольтметр, шкала которого градуирована в миллиграммах $O_2$ на литр воды. Сопротивления $R_2$, $R_3$ изготавливают из манганина, $R_1$ и $R_4$ — из платины. Глухая камера *1* заполнена чистым водородом. Камера *2* заполняется водородом, непрерывно поступающим из электролизера *4*. Электролизер, к которому подводится постоянный ток, содержит раствор КОН, при диссоциации которого образуются ионы гидроксила и калия. Последние собираются на катоде, где происходит реакция

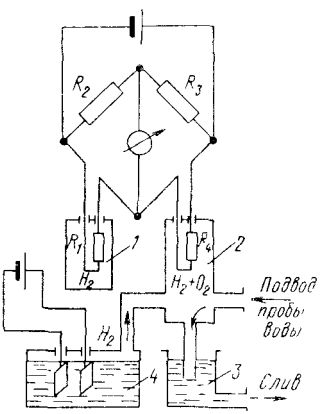



Рис. 12.1. Принципиальная схема электрического кислородомера.

*1* — глухая камера с водородом; *2* — камера с водородом, поступающим из электролизера, и кислородом, выделяемым из пробы воды; *3*—гидравлический затвор на сливе пробы воды; *4* — электролизер с раствором КОН.

$$2K + 2H_2O \rightarrow 2KOH + H_2\uparrow, \qquad (12.1)$$

в результате которой выделяется водород. Через камеру *2* протекает исследуемая вода, из которой выделяется растворенный в ней кислород, пока не установится определенное равновесие между концентрацией кислорода, растворенного в воде и в среде водорода над водой. Вода из камеры *2* стекает через гидравлический затвор *3*. Ток в диагонали моста, идущий через милливольтметр, согласно (5.5) равен

$$I_м = K(R_2R_4 - R_1R_3), \qquad (12.2)$$

где $K$ — некоторый коэффициент пропорциональности. Выбирают $R_2 = R_3$ и, если в камере *2* нет кислорода, то и $R_1 = R_4$, $I_м = 0$. При наличии в камере *2* кислорода теплопроводность от сопротивления $R_4$ к стенкам камеры ухудшается, так как теплопроводность кислорода примерно в семь раз меньше теплопроводности водорода. В результате повышения температуры сопротивление $R_4$ будет увеличиваться в соответствии с увеличением $O_2$, а согласно (12.2) пропорционально $R_4$ будет возрастать $I_м$.

*По описанному принципу работают* применяемые на судах кислородомеры типа АКК, снабжаемые охладителем контролируемой воды с регулятором температуры, регуляторами давлений контролируемой и охлаждающей воды и стабилизатором напряжения питания.

## § 13. ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ

Анализ состава дымовых газов позволяет судить об экономичности процесса горения. Если за 100% принять объем сухих дымовых газов в расчете на 1 кг топлива, то

$$100\% = CO_2 + SO_2 + CO + N_2 + O_2\%, \qquad (13.1)$$

где обозначим $CO_2 + SO_2 = RO_2$. При $CO = 0$ (полное горение) и $O_2 = 0$ (совершенное горение) из (13.1) имеем

$$100\% = RO_2 + N_2\%, \tag{13.2}$$

где $RO_2 = RO_2^{max}$ — величина, зависящая только от химического состава топлива.

Практически горение совершенным не бывает. Отношение объема воздуха $V$, $\frac{нм^3}{кг\ топл.}$, фактически требующегося для сжигания 1 кг топлива, к теоретически необходимому для этого объему $V_0$, $\frac{нм^3}{кг\ топл.}$, называется коэффициентом избытка воздуха $\alpha$. Величина $\alpha$ при экономичном горении не должна отклоняться от некоторого оптимального для данного топливосжигающего устройства

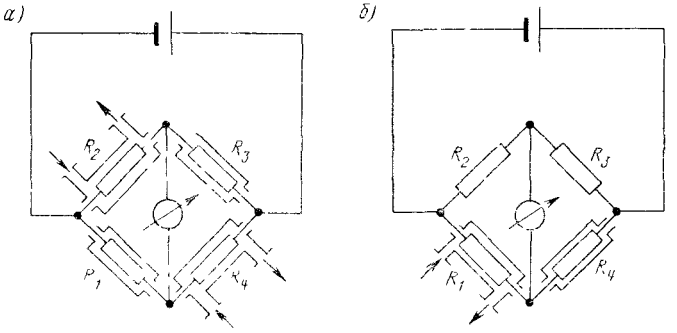



Рис. 13.1. Принципиальные схемы электрических газоанализаторов: *а* — газоанализатора на $CO_2$; *б* — газоанализатора на $CO + H_2$.

значения, так как недостаток воздуха приводит к неполному горению, а избыток — к излишнему уносу тепла с подогретым воздухом (в составе дымовых газов).

Обозначим объемное количество $RO_2$ в расчете на 1 кг топлива через $V_{RO_2}$. Приближенно можно считать, что объем сухих дымовых газов в расчете на 1 кг топлива равен объему воздуха $V$, пошедшего на сгорание этого топлива. Тогда процентное содержание $RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{\alpha V_0} 100\%$. Если $\alpha = 1$, то $RO_2^{max} = \frac{V_{RO_2}}{V_0} 100\%$.

Из написанных соотношений получаем

$$\alpha = \frac{RO_2^{max}}{RO_2}. \tag{13.3}$$

Согласно (13.3) величина $\alpha$ для данного топлива определяется процентным содержанием $RO_2 \cong CO_2$ в дымовых газах.

Приборы для определения состава дымовых газов называют *газоанализаторами*. Они позволяют определять коэффициент избытка воздуха, содержание в дымовых газах продуктов неполного сгорания и т. п.

Наиболее точно и полно состав дымовых газов может быть определен путем химических анализов; для этой цели применяют специальные приборы— химические газоанализаторы. Однако операции, которые необходимо выполнять при

использовании этих приборов, не поддаются автоматизации. Для автоматического анализа состава дымовых газов применяют различные электрические газоанализаторы.

**Электрический газоанализатор на $CO_2$.** Данный газоанализатор (рис. 13.1, *а*) основан на измерении теплопроводности газовой смеси. К одной диагонали неуравновешенного измерительного моста подводится постоянное напряжение, в другую включен милливольтметр, шкала которого градуирована в процентах $CO_2$. Плечи моста изготовлены из платины и заключены в камеры. Камеры с сопротивлениями $R_1$ и $R_3$ заполнены воздухом. Через камеры с сопротивлениями $R_2$ и $R_4$ прокачивают сухие дымовые газы, содержащие $RO_2 \cong CO_2$, CO, $O_2$ и $N_2$. Теплопроводности CO, $O_2$ и $N_2$ близки к теплопроводности воздуха, а теплопроводность $CO_2$ примерно в два раза меньше. Поэтому плечи $R_2$ и $R_4$ будут нагреваться, сопротивление их будет возрастать. Ток в диагонали моста $I_м = K(R_2R_4 - R_1R_3)$ пропорционален этим сопротивлениям и, следовательно, является функцией содержания $CO_2$. Зная $CO_2$, по формуле (13.3) можно определить коэффициент избытка воздуха $\alpha$.

Чтобы содержание $H_2$ в дымовых газах не влияло на показания, поскольку теплопроводность водорода почти в 15 раз больше, чем теплопроводность $CO_2$, перед прибором устанавливают камеры для дожигания продуктов неполного сгорания.

На рассмотренном принципе основан применяемый на судах газоанализатор ГЭУК-21.

**Электрический газоанализатор на $CO + H_2$.** Этот прибор измеряет содержание в дымовых газах продуктов неполного сгорания — окиси углерода и водорода. Он воспринимает повышение температуры при сгорании CO и $H_2$ в присутствии катализатора.

Плечи $R_2$ и $R_3$ неуравновешенного измерительного моста прибора (рис. 13.1, *б*) выполнены из манганина, $R_1$ и $R_4$ — из платины. Камера с сопротивлением $R_4$ заполнена воздухом, камера с сопротивлением $R_1$ прокачивается анализируемым газом. Сопротивления $R_1$ и $R_4$ нагреваются током до 450—500° С. При этом под действием катализаторов CO и $H_2$ сгорают, ввиду чего температура плеча $R_1$ повышается и сопротивление возрастает. Вследствие этого в диагонали моста появляется ток, величина которого пропорциональна сопротивлению $R_1$, и, следовательно, зависит от содержания продуктов неполного сгорания в анализируемом газе. Шкала милливольтметра градуирована в процентах содержания $CO + H_2$.

Существуют газоанализаторы, в которых газ сначала проходит через часть прибора, выполненную по схеме, показанной на рис. 13.1, *б*, где определяется содержание $CO + H_2$%, а затем — через вторую часть прибора, выполненную по схеме, изображенной на рис. 13.1, *а*, с целью определения $CO_2$%. Таким образом устроен применяемый на судах газоанализатор типа ГЭД.

ГЛАВА III

# ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

## § 14. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

В усилительных, исполнительных и других элементах гидравлических систем автоматики используется энергия давления поступающей от специального источника жидкости, которая преобразуется в механическое перемещение, служащее выходным (управляющим) воздействием системы.

Достоинствами гидравлических элементов являются их высокая надежность и долговечность. Они нечувствительны к действию магнитных и электрических полей, имеют высокую стойкость к воздействию вибраций, сотрясений, температурных изменений. Вследствие несжимаемости жидкости сигналы по гидравлическим линиям передаются практически мгновенно. Коэффициент усиления по мощности гидравлических усилителей весьма высок; для двухкаскадных усилителей он достигает 20 000. Гидравлические двигатели — поршневые сервомоторы — обладают малой инерционностью, плавностью хода, высокой приемистостью.

Недостатком гидравлических систем является наличие, как правило, подвижных частей. Это вызывает искажения их характеристик из-за сил трения и возможных перекосов в соединениях. Изготовление гидравлических элементов требует большого объема станочных работ, в связи с чем обходится дороже, нежели изготовление электронных схем. Трубопроводы, служащие для транспортировки рабочей жидкости и передачи гидравлических сигналов в сравнении с электрическими линиями передачи громоздки. Гидравлические элементы менее, нежели электронные, приспособлены для построения функционально сложных схем. Наконец, гидравлические элементы в сравнении с электронными громоздки и имеют бо́льшую массу.

В связи с изложенным сложились традиционные области применения гидравлических систем автоматики на морских судах. Там, где

требуется непрерывная надежная работа имеющих сравнительно простую принципиальную схему автономных устройств автоматического регулирования, широко применяются гидравлические системы. На морских судах это — локальные системы автоматического регулирования энергетических агрегатов и различных механизмов. Там, где требуются сложные многофункциональные системы управления, целесообразно применение электрических и электронных элементов, в первую очередь — микроэлектронных схем. На судах это — системы сбора, обработки и представления информации, дискретные логические системы управления и т. п.

Широко применяются комбинированные электрогидравлические и иные системы, использующие малогабаритные многофункциональные электронные

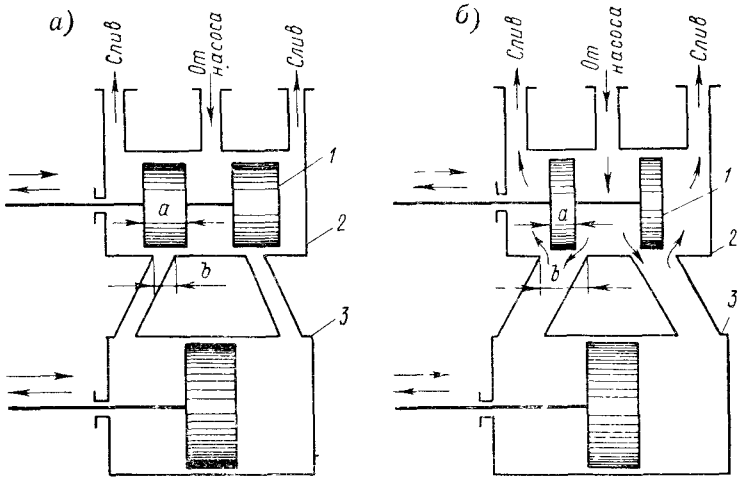



Рис. 14.1. Принципиальные схемы золотниковых усилителей: *а* — с положительными перекрышами (отсечной золотник); *б*—с отрицательными перекрышами (проточный золотник).

*1* — золотник; *2* — корпус золотника; *3* — гидравлический двигатель.

схемы в качестве счетно-решающих устройств и надежные гидравлические сервомеханизмы — в качестве исполнительных устройств.

Рабочей жидкостью в гидравлических системах обычно служит масло или вода. Применение масла естественно в системах автоматического регулирования двигателей (дизели, паровые и газовые турбины), где то же самое масло служит для смазки подшипников двигателя. Использование воды целесообразно в паросиловых установках, где вода (конденсат) циркулирует в энергетической установке в качестве рабочего тела.

Основными типами гидравлических усилительных элементов являются золотники, усилители дроссельного типа, струйные усилители с подвижными частями и струйные усилители без подвижных частей.

**Золотниковые усилители.** Наиболее распространенными гидроусилителями являются золотники (рис. 14.1).

При смещении *отсечного золотника* (рис. 14.1, *а*) под воздействием входного сигнала, поступающего от измерительного органа или от датчика рассогласования следящей системы, одна из полостей исполнительного элемента — гидравлического поршневого сервомотора — сообщается с напорной магистралью, другая — со сливной, ввиду чего поршень сервомотора перемещается в нужную

сторону *. Входным воздействием золотника является перемещение его штока, выходным — расход жидкости через его окна; выходным сигналом системы золотник—исполнительный двигатель является перемещение штока гидравлического двигателя.

Рабочей жидкостью в золотниковых усилителях служит, как правило, масло, что обеспечивает смазку трущихся поверхностей.

Для исключения протечек рабочей жидкости при среднем положении отсечного золотника ширина рабочего пояска $a$ делается больше ширины окна $b$, разность $a - b$ называется *перекрышей*. Однако наличие положительной перекрыши неизбежно приводит к появлению так называемой «мертвой зоны» гидравлического двигателя — поршень двигателя остается неподвижным, пока не будет выбрана перекрыша.

Для устранения этого недостатка делают золотники с отрицательной перекрышей, у которых $a - b < 0$ (рис. 14.1, *б*). В этом случае жидкость постоянно протекает через золотник к сервомотору, ввиду чего такой золотник называется *проточным*. При смещении золотника одно из окон прикрывается, другое приоткрывается, ввиду чего возникает перепад давлений на поршне сервомотора, вызывая его перемещение. В проточных золотниках мертвая зона уменьшается, однако они требуют постоянного расхода рабочей жидкости на работу автоматики, в связи с чем при большой мощности гидропривода целесообразнее применение отсечных золотников.

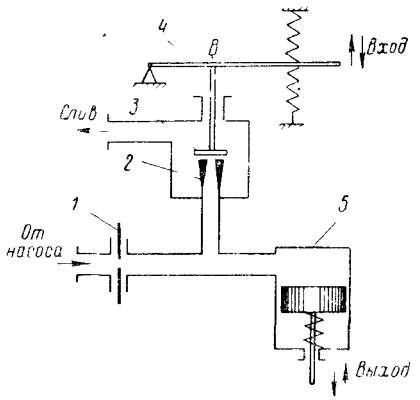



Рис. 14.2. Принципиальная схема усилителя типа сопло— заслонка.

*1* — дроссель постоянного сечения; *2* — сопло; *3* — заслонка; *4* — рычаг входного устройства, *5* — поршневой гидравлический двигатель с односторонним подводом рабочей жидкости.

Достоинствами золотниковых усилителей являются большие коэффициенты усиления, надежность работы, аксиальная уравновешенность от сил статического давления жидкости. Некоторым недостатком их является трение золотника о стенки его цилиндра, отрицательно влияющее на динамику систем (для уменьшения этого трения применяют вращающиеся золотники).

При автоматизации установок морских судов золотниковые усилители широко применяются в гидравлических масляных системах автоматического регулирования двигателей.

**Усилитель типа сопло — заслонка.** Усилитель типа сопло — заслонка относится к усилителям дроссельного типа, основанным на зависимости давления жидкости между двумя дросселями от изменяемой площади проходного сечения одного из них (рис. 14.2).

При поднятии точки $B$ входного рычага и, следовательно, заслонки увеличивается расход жидкости на слив, ввиду чего уменьшается давление над поршнем сервомотора и он отжимается вверх пружиной. При опускании точки $B$ рычага давление над поршнем исполнительного двигателя повышается и поршень опускается вниз.

Усилители типа сопло—заслонка, как и проточный золотник, требуют непрерывного расхода рабочей жидкости. На морских судах они получили применение для регулирования давления пара в системах уплотнения главных турбин и т. п. Такие усилители применяются и в пневматических системах, где в качестве рабочего агента используется воздух.

---

* На рис. 14.1 и последующих усилительный элемент изображен совместно с таким исполнительным элементом, с которым он чаще всего применяется.

**Струйные усилители с подвижными частями.** К гидравлическим усилителям струйного типа, управляющими струей (или струями) протекающей через них жидкости, относятся усилители со *струйной трубкой* (рис. 14.3, *а*) и с *регулирующей заслонкой* (рис. 14.3, *б*). Принцип действия этих усилителей основан на преобразовании кинетической энергии струи движущейся жидкости в потенциальную энергию давления.

Через шарнирно закрепленный конец струйной трубки *1* внутрь ее непрерывно подводится рабочая жидкость от насоса под давлением. Другой конец трубки имеет конический насадок, в котором скорость течения жидкости достигает 30—40 м/с при давлении на входе в трубку, равном 6—8 кгс/см². Если насадок струйной трубки расположен точно между двух приемных каналов, соеди-

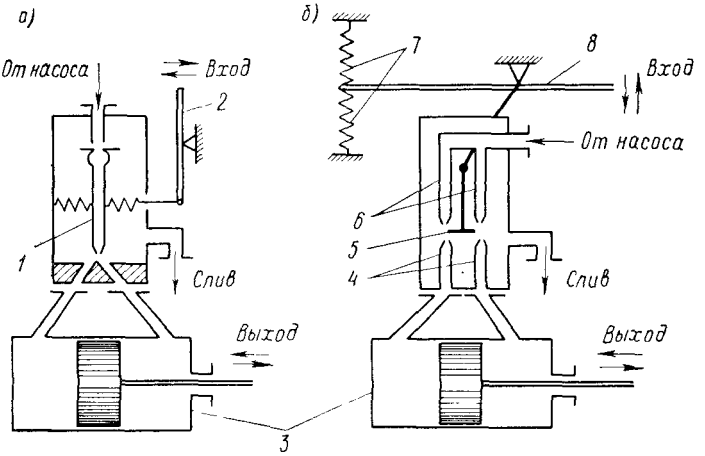



Рис. 14.3. Принципиальные схемы усилителей струйного типа: *а* — усилитель со струйной трубкой; *б* — усилитель с регулирующей заслонкой.

*1* — струйная трубка; *2* — рычаг задатчика; *3* — поршневой гидравлический двигатель; *4* — приемные сопла; *5* — регулирующая заслонка; *6* — напорные сопла; *7* — пружины; *8* — входной рычаг.

ненных трубопроводами с полостями поршневого сервомотора, то давление жидкости в обеих полостях сервомотора одинаково и поршень его неподвижен. При отклонении рычага задатчика от вертикали струйная трубка отклоняется, давление в одной из полостей сервомотора повышается, в другой понижается, и поршень перемещается в соответствующую сторону. При перемещении поршня рабочая жидкость из одной его полости вытесняется на слив через корпус усилительного элемента.

Во втором устройстве рабочая жидкость от насоса непрерывно подается в два неподвижных напорных сопла, строго напротив которых закреплены приемные сопла, связанные трубопроводами с полостями цилиндра сервомотора. Между напорными и приемными соплами расположен подвижный элемент — регулирующая (отражательная) заслонка, связанная с входным рычагом управления. При отклонении входного рычага от горизонтали регулирующая заслонка отклоняется от среднего положения, давление в одном из приемных сопл повышается, в другом понижается. Вследствие этого возникает перепад давлений на поршне двигателя и он перемещается, вытесняя жидкость из одной полости через корпус усилительного элемента на слив.

В качестве рабочей жидкости для усилителей со струйной трубкой применяется масло или конденсат, для усилителей с регулирующей заслонкой — обычно конденсат.

Как и усилители типа сопло—заслонка, данные усилители имеют значительно меньшие, нежели золотниковые, силы трения и инерции; они проще в изготовлении, чем золотники. Однако они имеют и меньшие коэффициенты усиления. Кроме того, их недостатком является непрерывный расход рабочей жидкости, что связано с повышенными затратами энергии на работу автоматики. При этом расход жидкости через усилитель со струйной трубкой (однопроточное реле) меньше, чем через усилитель с регулирующей заслонкой (двухпроточное реле). Для усилителей со струйной трубкой затраты на управление составляют 15—20% от мощности, подведенной к усилителю.

В связи с изложенным усилители струйного и дроссельного типов целесообразно применять для приводов сравнительно небольшой мощности, а золотниковые усилители — для мощных приводов, где требуются большие коэффициенты усиления.

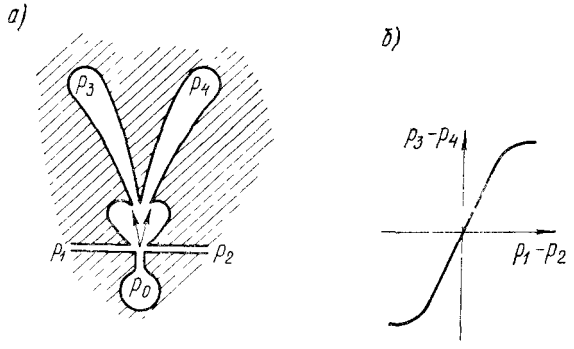



Рис. 14.4. Схема (*а*) и характеристика (*б*) аналогового струйного усилителя.

На морских судах однопроточные и двухпроточные гидравлические усилительные реле струйного типа, работающие на конденсате, получили применение в системах автоматического регулирования паросиловых установок (см. § 15).

**Струйные усилители без подвижных частей.** Дальнейшим развитием струйной техники явилась разработка струйных усилителей (и других элементов), работающих без подвижных частей. В этих элементах распределение рабочих струй жидкости осуществляется не с помощью каких-либо подвижных трубок или заслонок, а с помощью струй жидкости — управляющих струй.

Конфигурация аналогового гидравлического струйного усилителя изображена на рис. 14.4, *а*, а его характеристика — на рис. 14.4, *б*. Давление питания $p_0$ подводится в нижнюю камеру. Если давления управляющих сигналов $p_1$ и $p_2$ равны, то равны давления $p_3$, $p_4$ на выходе усилителя. При разности давлений управляющих сигналов $p_1 - p_2 > 0$ основной поток отклоняется вправо, ввиду чего давление $p_4$ повышается, а $p_3$ — понижается. Если $p_2 > p_1$, то на выходе усилителя происходит увеличение давления $p_3$ и уменьшение $p_4$. Расход рабочей жидкости через усилитель осуществляется непрерывно. Коэффициент усиления по мощности такого устройства равен от 5 до 20.

Струйные усилители такого типа успешно работают как на воде, так и на воздухе. Давление питания обычно составляет сотые или десятые доли атмосферы. Однако эти устройства могут успешно работать в большом диапазоне давлений (верхний предел составляет десятки атмосфер).

Существует много модификаций аналоговых и дискретных струйных элементов, каждый из которых реализует определенную функциональную зависимость. Не имея подвижных частей, такие элементы обладают малой инерционностью и высокой надежностью. В них отсутствуют силы сухого трения. Надежность их работы, как правило, выше, чем у любых других элементов. Вероятный

выход из строя возможен лишь при засорении отверстий для прохода рабочего агента. Наиболее эффективно данные элементы могут быть использованы в случае, когда внешние сигналы не являются механическими перемещениями. В связи с этим они удобны для набора многофункциональных счетно-решающих устройств. В этой области они конкурируют с электронными схемами, уступая последним по быстродействию, причем чаще в качестве рабочего агента в них используется воздух (см. гл. III).

**Гидравлические двигатели.** *Гидравлические двигатели — сервомоторы* — преобразуют перепад давления жидкости в перемещение выходного штока или вала.

Наиболее распространенным типом гидравлического сервомотора является поршневой двигатель. Он может быть с двусторонним (рис. 14.5, *а*) или односторонним (рис. 14.5, *б*) подводом рабочей жидкости. В последнем случае поршень с одной стороны нагружен пружиной.

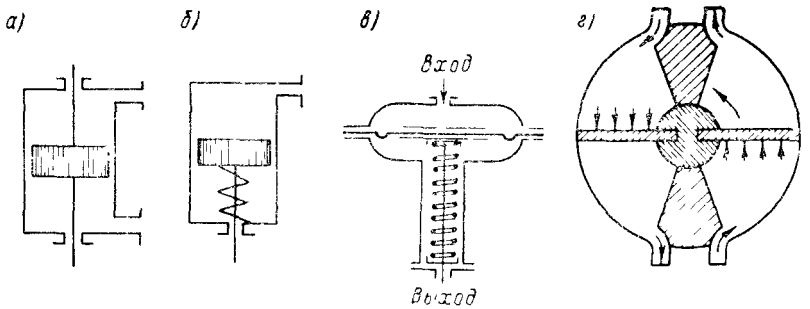



Рис. 14.5. Схемы гидравлических сервомоторов: *а* — поршневого с двусторонним подводом рабочей жидкости; *б* — поршневого с односторонним подводом рабочей жидкости; *в* — мембранного; *г* — с вращательным движением рабочего органа.

У поршневых сервомоторов, работающих на масле, устранение протечек *рабочей жидкости между поршнем и корпусом* достигается притиркой поршня к цилиндру с зазором по диаметру 0,02 –0,03 мм.

Поршневые сервомоторы относятся к сервомоторам с поступательным движением рабочего органа. К этому же типу относятся и мембранные сервомоторы, у которых вместо поршня перепад давлений жидкости воспринимает мембрана (рис. 14.5, *в*). Мембранные сервомоторы проще поршневых в изготовлении, кроме того, у них совершенно исключается протечка рабочей жидкости из одной полости в другую; однако они могут быть применены лишь при малом ходе штока сервомотора (до 30 мм).

Существуют также гидравлические сервомоторы с вращательным движением рабочего органа — лопастные (рис. 14.5, *г*). Такие сервомоторы целесообразны, когда на выходе системы требуется получить вращательное движение.

Силы трения между поршнем и корпусом сервомотора, а также в регулирующем органе и в передаточном механизме от штока сервомотора к регулирующему органу вызывают нечувствительность сервомотора, характеризуемую его страгивающим перепадом давлений. *Страгивающий перепад* — это тот перепад давлений в полостях сервомотора, при достижении которого поршень сервомотора (соответственно мембрана или лопасти) страгивается с места.

Отрезок времени, за который поршень (или мембрана) сервомотора переходит из одного крайнего положения в другое при максимальной величине воздействия со стороны усилительного элемента, называется *временем сервомотора.*

Страгивающий перепад для гидравлических сервомоторов имеет порядок десятых долей кгс/см$^2$, а время сервомотора обычно составляет несколько секунд.

# § 15. СИСТЕМА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ВОДЕ

*Для автоматизации главных и вспомогательных пароэнергетических* установок морских судов отечественной постройки преимущественное распространение получили гидравлические системы автоматического регулирования, работающие на питательной воде котлов. Применение одной и той же рабочей среды — питательной воды — для объекта автоматизации и обслуживающих его автоматических устройств позволяет обойтись без специального источника вспомогательной энергии, обеспечивающей работу автоматики. Кроме того, исключаются случаи выхода из строя энергетической установки из-за отсутствия энергии для работы автоматики, так как если нет давления питательной воды, то не нужна уже и работа автоматики.

Гидравлические автоматические регуляторы и системы дистанционного управления собираются из стандартных элементов и узлов, к которым относятся:

— измерительные органы;

— усилительные реле, преобразующие сигнал по перемещению измерительного органа в перепад давления рабочей жидкости;

— гидравлические сервомоторы, служащие исполнительными элементами;

— регулирующие органы (топливные золотники, питательные клапаны котлов, паровые регулирующие клапаны и т. п.);

— пружины дополнительных жестких обратных связей с роликовыми толкателями, призматическими подвесками, рычажными сочленениями и т. п.;

— кулачки измеряемого профиля, служащие для преобразования вращательного движения вала, приводимого в движение сервомотором, в программное поступательное перемещение и используемые для воздействия на пружину жесткой обратной связи данного регулятора или на измерительные органы соседних автоматических регуляторов и устройств;

— гидравлические изодромные механизмы, представляющие собой дополнительные гибкие обратные связи, служащие для возвращения регулирующей заслонки усилительного реле в среднее положение и используемые в случае, когда требуется работа регулятора с нулевой неравномерностью регулирования;

— дроссельные клапаны для настройки времени сервомоторов и изодромов;

— *обходные краны, позволяющие перепускать воду помимо полостей* сервомотора при переходе на ручное управление;

— различная вспомогательная арматура: уравнительные сосуды, позволяющие измерять уровень жидкости в каком-либо объекте с помощью мембранных чувствительных элементов, возвратно-дроссельные клапаны, сдвоенные клапанные блоки, блокирующие золотники и др.

Кроме того, в состав систем автоматического регулирования входят импульсные трубопроводы, трубопроводы рабочей воды, распределительные и сборные коллекторы рабочей воды и фильтры для ее очистки.

Несколько автоматических регуляторов могут монтироваться совместно в составе пультов управления, имеющих как подвижные детали (валы, маховики, рукоятки управления и т. п.), так и неподвижные (каркас, поддоны, листы обшивки, измерительные приборы).

*Многие элементы* рассматриваемых гидравлических систем автоматизации унифицированы в соответствии с отраслевой нормалью.

В качестве примера на рис. 15.1 изображены схемы гидравлических регуляторов давления.

При повышении по какой-либо причине регулируемого давления $p_0$ в *регуляторе без обратной связи* (рис. 15.1, *а*) усилие, развиваемое сильфоном, превышает натяжение установочной пружины, весовой рычаг поворачивается по часовой стрелке, ввиду чего регулирующая заслонка отклоняется влево. В результате возрастает давление в правой полости сервомотора, и поршень его прикрывает регулирующий орган, восстанавливая регулируемое давление.

При понижении давления $p_0$ поршень сервомотора, наоборот, открывает регулирующий орган. Равновесие системы возможно при среднем положении регулирующей заслонки, т. е. при горизонтальном положении весового рычага. При этом

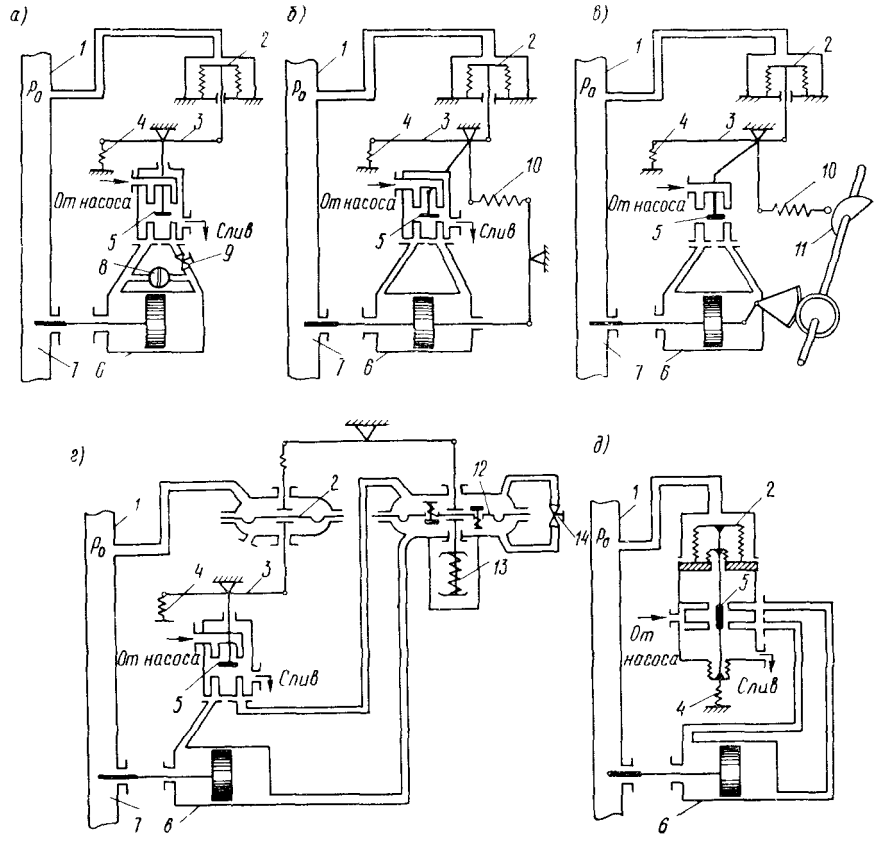



Рис. 15.1. Принципиальные схемы гидравлических регуляторов давления: *а*—без обратной связи; *б*—с жесткой обратной связью типа рычаг—пружина; *в*—с жесткой обратной связью типа кулачок—пружина; *г*—с гибкой (изодромной) обратной связью; *д*—без весового рычага.

*1* — объект регулирования (трубопровод под давлением); *2* — чувствительный элемент (сильфон или мембрана); *3* — весовой рычаг; *4* — установочная пружина; *5* — регулирующая заслонка, *6* — исполнительный элемент (сервомотор), *7* — регулирующий орган; *8* — обходной кран; *9* — дроссельный клапан для настройки времени сервомотора; *10* — пружина обратной связи; *11* — кулачок изменяемого профиля, *12* — мембрана изодрома, *13* — пружина изодрома; *14* — дроссельный клапан изодрома

неизменное натяжение установочной пружины уравновешивается неизменным усилием сильфона, соответствующим постоянному значению регулируемого давления на всех статических режимах.

*В регуляторе с жесткой обратной связью* (рис. 15.1, *б*, *в*) пружина обратной связи передает на регулирующую заслонку воздействие *поршня сервомотора, противоположное по направлению воздействию измерительного органа.* Если измерительный орган ввиду изменения давления отклоняет регулирующую

заслонку, то поршень сервомотора, перемещаясь, через пружину обратной связи возвращает ее в среднее положение, способствуя тем самым восстановлению равновесия в системе. Благодаря этому динамические свойства системы с регулятором, имеющим обратную связь, улучшаются в сравнении с системой, содержащей регулятор без обратной связи.

В состоянии равновесия *при горизонтальном положении* весового рычага регулятора постоянный момент установочной пружины уравновешивается суммой моментов сильфона и пружины обратной связи. При этом чем больше открыт регулирующий орган, тем сильнее сжата пружина обратной связи и больше ее момент, а поэтому меньше момент сильфона. В связи с этим в системе поддерживается неодинаковое значение регулируемой величины на различных статических режимах — оно уменьшается при увеличении расхода регулируемой среды, т. е. статические свойства этой системы *ухудшаются по сравнению с системой*, имеющей регулятор без обратной связи.

В регуляторе с *гибкой (изодромной) обратной связью* (рис. 15.1, *г*) при возрастании регулируемого давления $p_0$ усилие на мембране возрастает, и весовой рычаг, преодолевая сопротивление установочной пружины, поворачивается по часовой стрелке, ввиду чего регулирующая заслонка отклоняется влево. В результате возрастает давление в правом приемном сопле усилительного реле и в верхней полости корпуса изодрома. *Мембрана изодрома прогибается вниз*, сжимая пружину изодрома и вытесняя воду из нижней полости изодрома в корпус сервомотора *. Поршень сервомотора прикрывает регулирующий орган, восстанавливая давление $p_0$. При движении мембраны изодрома рычаг изодрома поворачивается по часовой стрелке, возвращая мембрану чувствительного элемента и регулирующую заслонку в исходное положение. В конце процесса пружина изодрома, разжимаясь, возвращает мембрану изодрома в среднее положение (при этом вода из одной полости изодрома перетекает в другую через дроссельный клапан изодрома). В состоянии равновесия, при любом открытии регулирующего органа, мембрана изодрома находится в среднем положении.

Таким образом, гибкая обратная связь осуществляет воздействие на регулирующую заслонку лишь во время переходных процессов, в состоянии равновесия она не воздействует на заслонку. Поэтому, улучшая динамические качества регулятора без обратной связи, изодромная обратная связь не приводит к ухудшению его статических свойств — регулируемая величина в системе с изодромным регулятором одинакова на всех статических режимах.

В схеме регулятора, показанной на рис. 15.1, *д*, устраняется опора весового рычага и, следовательно, сухое трение в этой опоре, благодаря чему уменьшается нечувствительность измерительного органа и улучшаются динамические свойства системы.

**Измерительные органы.** В гидравлических системах автоматического регулирования рассматриваемого типа для *измерения давлений, уровней жидкости*, расходов и температур различных сред применяют упругие чувствительные элементы — плоские мембраны и сильфоны, а также термоманометрические чувствительные элементы, преобразующие перепад давления в перемещение (см. § 5—8).

Основным параметром упругого чувствительного элемента является его активная площадь, под которой понимается площадь поверхности, воспринимающей измеряемый перепад давлений. Активная площадь сильфона $F_a$, см$^2$, определяется формулой

$$F_a = \frac{\pi}{4}\left(\frac{D+d}{2}\right)^2, \qquad (15.1)$$

где $D$—*наибольший диаметр гофров сильфона*; $d$—наименьший диаметр гофров сильфона.

---

* Когда мембрана изодрома отклоняется в крайнее положение, открывается невозвратный клапан в мембране, пропускающий через нее воду.

Активная площадь плоской мембраны с жестким центром определяется формулой

$$F_a = \frac{\pi}{12}(D^2 + Dd + d^2), \qquad (15\ 2)$$

где $D$ — диаметр мембраны; $d$ — диаметр жесткого центра мембраны (стальной тарелки).

Сильфоны и мембраны выбирают по стандартам в зависимости от измеряемого давления.

Усилие, развиваемое чувствительным элементом и пропорциональное текущему значению регулируемой величины, сравнивается на элементе сравнения (весовом рычаге) с эталонной величиной — натяжением установочной пружины, пропорциональным требуемому значению регулируемой величины.

Для регулятора без обратной связи (см. рис. 15.1, *а*) уравнение равновесия весового рычага при его горизонтальном положении имеет вид

$$p_0 F_a l_1 = l_2 F_y, \qquad (15.3)$$

где $p_0$ — давление на чувствительный элемент; $F_a$ — активная площадь чувствительного элемента; $F_y$ — сила натяжения установочной пружины; $l_1$, $l_2$ — длины правого и левого плеч весового рычага (см. на рис. 15.1, *а*).

Длина плеча $l_1$ не должна быть слишком малой, так как при малом плече нужно иметь слишком большое усилие $p_0 F_a$ на чувствительном элементе для преодоления момента сопротивления при стрягивании с места весового рычага. Однако величина $l_1$ не должна быть и слишком большой, чтобы не был большим максимальный ход сильфона (или мембраны). Для сильфонов рекомендуется максимальный ход 0,1—0,2 мм. Величина $l_1$ обычно составляет 5 мм.

Сила натяжения установочной пружины $F_y$, кгс, определяется зависимостью

$$F_y = c_y s_{пр}, \qquad (15.4)$$

где $c_y$ — жесткость установочной пружины, кгс мм; $s_{пр}$ — предварительный натяг установочной пружины, мм.

Для изменения заданного значения регулируемой величины $p_0$ у действующего регулятора следует изменить натяг установочной пружины $s_{пр}$.

Выбор установочной пружины выполняется следующим образом. Задаваясь значениями $s_{пр}$ и $l_2$, по выражениям (15.3), (15.4) определим жесткость установочной пружины:

$$s_y = \frac{1}{s_{пр} l_2} p_0 F_a l_1. \qquad (15\ 5)$$

После того как определена жесткость пружины, можно подсчитать число ее витков $n$ по формуле

$$n = \frac{E d^4}{8 D_{ср}^3 c_y}, \qquad (15\ 6)$$

где $E = 8000$—$8200$ кгс/мм$^2$ — модуль упругости для стальной пружины; $d$ — диаметр проволоки, мм; $D_{ср}$ — средний диаметр витка, мм.

Величины $d$ и $D_{ср}$ выбираются по конструктивным соображениям.

Определив число витков по формуле (15.6) и выбрав диаметры проволоки и витка, следует проверить прочность пружины. Для этого определяется суммарное напряжение от кручения и изгиба по формуле

$$\sigma_{пр} = \frac{2{,}55 D_{ср} k_1}{d^3} F_{max}, \qquad (15\ 7)$$

где

$$k_1 = \frac{4\frac{D_{ср}}{d} + 3}{4\frac{D_{ср}}{d} - 2}; \quad F_{max} = c_y s; \qquad (15\ 8)$$

$s$ — максимальное сжатие или растяжение, мм.

При определении величины $s$ следует учитывать как предварительный натяг пружины, так и ее возможные деформации во время движения регулирующих устройств, т. е. $s = s_{пр} + \Delta s$.

Величина $\sigma_{пр}$, определенная согласно (15.7), должна удовлетворять неравенству

$$\sigma_{пр} \leqslant 70 \text{ кгс/мм}^2.$$

Для регуляторов с обратной связью (рис. 15.1, *б*, *в*) в левую часть уравнения (15.3) добавляется еще одно слагаемое, пропорциональное усилию обратной связи (см. ниже); в остальном выбор параметров установочной пружины выполняется так же.

При нарушении уравнения равновесия (15.3) ввиду изменения $p_0$ весовой рычаг отклоняется, деформируя установочную пружину.

Характеристика измерительного органа с упругим или термоманометрическим чувствительным элементом, представляющая собой зависимость положения его выходного рычага $s$ от давления на мембрану или сильфон $p_0$, имеет вид, показанный на рис. 15.2, где $\Delta p_{\varepsilon 1}$ — нечувствительность измерительного органа.

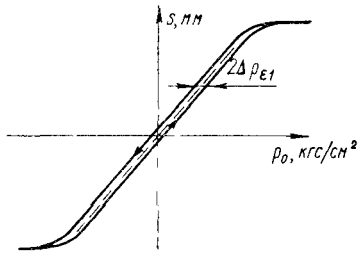



Рис. 15.2. Характеристика измерительного органа.

Материалы, применяемые для изготовления различных деталей измерительных органов, приведены в табл. 15.1.

Условные проходы импульсных трубопроводов, подводящих регулируемую среду к измерительному органу, рекомендуется выбирать в соответствии с табл. 15.2. При температуре среды $t < 250°$ С они изготовляются из меди, при $t > 250°$ С — из стали.

**Усилительные реле.** В рассматриваемой системе элементов применяются струйные усилители с подвижными частями — усилители со струйной трубкой (однопроточные реле) и с регулирующей заслонкой (двухпроточные реле), принцип действия которых рассмотрен в § 14.

Двухпроточные реле имеют большии коэффициент усиления по мощности, нежели однопроточные, но требуют большего расхода рабочей воды, и, следовательно, большего расхода энергии.

Нормальная работа реле обеспечивается при давлении рабочей воды на входе в реле 8—10 кгс см$^2$ и давлении на сливе 1—2 кгс/см$^2$.

Внешний вид и габаритные размеры унифицированных моделей усилительных реле показаны на рис. 15.3.

Масса усилительного реле — не более 3 кг.

Усилительные реле различаются индексом сопл, указывающим диаметр сопл в миллиметрах. Индекс сопл усилительного реле рекомендуется выбирать в зависимости от требуемого расхода рабочей воды (см. табл. 15.3). В свою очередь, расход рабочей воды определяется требуемой мощностью сервомотора при приемлемом его габарите.

На рис. 15.4 представлены экспериментальные характеристики двухпроточного усилительного реле, представляющие зависимость $(p_{в1} - p_{в2})/(p_{вн} - p_{вс}) = f(s)$, где $p_{в1}$, $p_{в2}$ — давления в приемных соплах реле; $p_{вн}$ — давление воды, подводимой к реле; $p_{вс}$ — давление воды на сливе от реле, кгс/см$^2$; $s$ — смещение регулирующей заслонки, мм.

Корпус усилительного реле изготовляют из бронзы АМц9-2 либо из латуни ЛК80-3Л. Сопла, регулирующие заслонку, струйную трубку и приемную шайбу, изготовляют из стали 2Х13.

**Сервомоторы.** С однопроточными и двухпроточными усилительными реле применяют поршневые или мембранные сервомоторы, имеющие двусторонний подвод рабочей жидкости (см. § 14). Поршневые сервомоторы изготовляют с ли-

*Таблица 15.1*

**Материалы, рекомендуемые для изготовления измерительных органов**

| Наименование деталей | Материал |
|---|---|
| Корпус измерительного органа регуляторов давления, перепада давлений и температуры | Ст.3 или сталь 25Л |
| Корпус регуляторов уровня для объектов с давлением до 5 кгс/см² | Бр АМц9-2 или латунь ЛК80-3т |
| Корпус регуляторов уровня для объектов с давлением до 28 кгс/см² | Сталь 25Л |
| Корпус регуляторов уровня для объектов с давлением до 65 кгс/см² | Ст 5 или сталь 35 |
| Сильфон для давления до 15 кгс/см² | Полутомпак Л80 |
| Сильфоны для давления свыше 15 кгс/см² | Бр ЛНТ1,9 |
| Передаточная игла сильфона | Сталь 9Х18 |
| Призматический валик | Сталь 9Х18 |
| Пружины | Проволока 1 или сталь Х18Н10Т |
| Уплотнительная муфта для регуляторов обычного исполнения | Теплостойкая и маслостойкая резина 8190 гр. V-б |
| Уплотнительная муфта для регуляторов тропического исполнения | Теплостоикая и маслостойкая резина 8190 гр V б, (для тропиков) |
| Ампула регуляторов температуры пара РТПГ | Сталь Х18Н10Т |
| Ампула регуляторов температуры РТ-40-ТМ | Медь М3 |
| Капилляр регуляторов температуры пара РТПГ | Медь М3 или латунь Л96 |
| Капилляр регуляторов температуры РТ-40-ТМ | Медь М3 |
| Мембрана регуляторов уровня | Аэростатная ткань М500 |

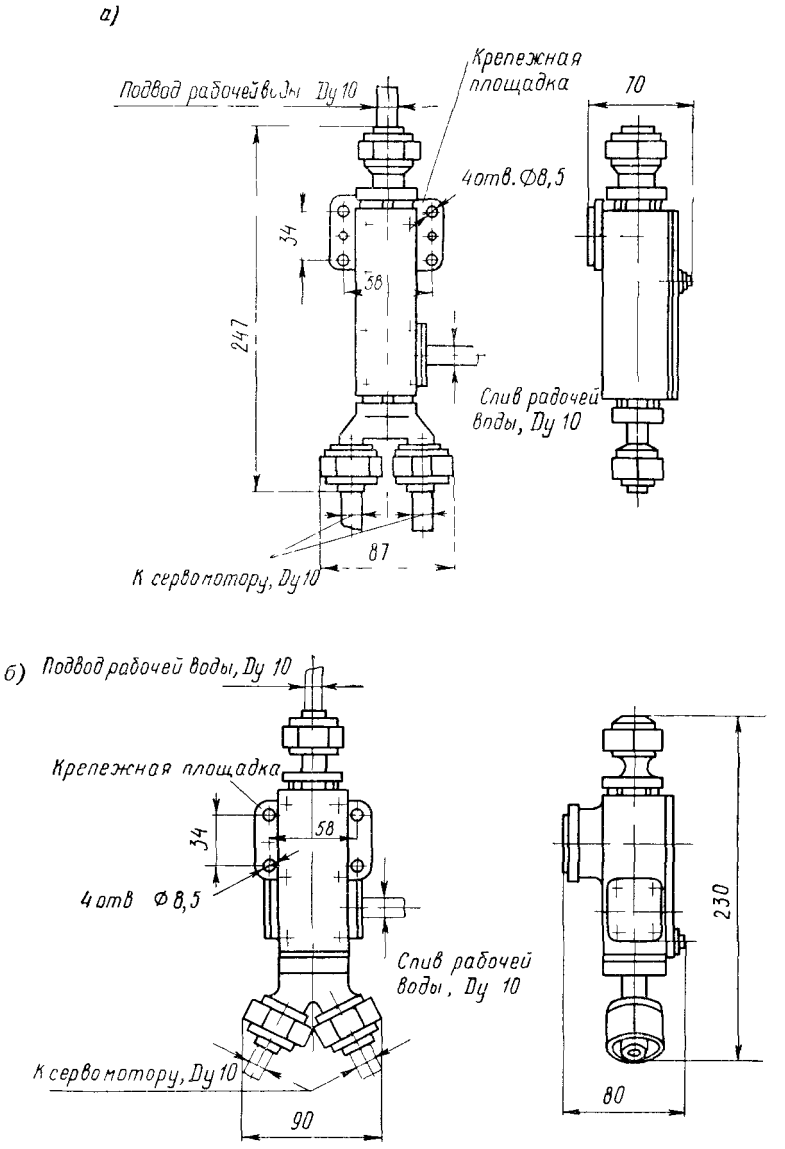



Рис. 15.3. Внешний вид усилительного реле: *а* — двухпроточная модель; *б* — однопроточная модель.

**Условные проходы импульсных трубопроводов**

| Тип регулятора | Условный проход |
|---|---|
| Регуляторы типа РД, ДРД | 6 |
| » » РУК, РУД | 15 |
| » » ОРП | 15 |
| » » ДРП | 15 |

нейным либо вращательным выходным перемещением; во втором случае сервомотор имеет кривошипно-шатунный механизм (рис. 15.5).

Устранение протечек рабочей жидкости из одной полости сервомотора в другую для поршневых сервомоторов, работающих на горячей воде, достигается

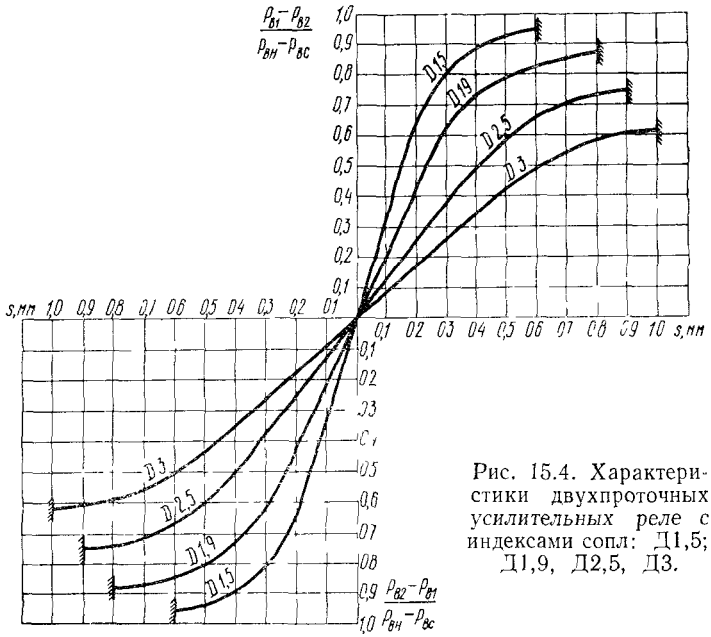



Рис. 15.4. Характеристики двухпроточных усилительных реле с индексами сопл: Д1,5; Д1,9, Д2,5, Д3.

применением кольцевых уплотнений из мягкой асбестографитовой набивки. Для уплотнения штока сервомотора в месте выхода его из цилиндра используются сальниковые набивки или резиновые манжеты.

Протечки воды между поршнем и корпусом сервомотора, собираемые в мензурку путем открытия штуцера на одной из его плоскостей, не должны превышать 50—60 см³/мин при давлении воды в другой полости не менее 5 кгс/см².

На корпусе сервомотора устанавливают винтовые пробки для возможности выпуска воздуха.

Для работающих на воде поршневых сервомоторов различных регуляторов судовых энергетических установок значение страгивающего перепада $\Delta p_{стр}$, вызываемого силами трения (см. § 14), лежит в интервале 0,1—0,5 кгс/см².

Время сервомотора $T_с$ (см. § 14) для поршневых сервомоторов, управляемых однопроточными и двухпроточными усилительными реле, составляет от 2 до 20 с.

*Для изменения и настройки времени сервомотора в одном из силовых трубопроводов*, соединяющих приемные каналы усилительного реле с полостями сервомотора, устанавливается дроссельный клапан; в паспортных данных всегда указывается время сервомотора при полностью открытом дроссельном клапане.

Пусть $F_{тр}$ — величина приведенной к штоку сервомотора силы трения во всем исполнительном механизме, равная нагрузке сервомотора, кгс; $D_с$ — диаметр поршня сервомотора, м. Соотношение

$$F_{тр} = \Delta p_{стр} \frac{\pi D_с^2}{4} \qquad (15\ 9)$$

позволяет, определив или оценив по прототипам $F_{тр}$ и $\Delta p_{стр}$, вычислить $D_с$.

Рабочий ход поршня сервомотора $\Delta m_{max}$ определяется *величиной максимального отклонения* регулирующего органа и передаточным отношением между перемещениями штока сервомотора и регулирующего органа.

По величинам $D_с$ и $\Delta m_{max}$ можно определить объем цилиндра сервомотора $V$, м³:

$$V = \frac{\pi D_с^2}{4} \Delta m_{max}. \qquad (15.10)$$

Время сервомотора $T_с$, с, определяется зависимостью

$$T_с = \frac{V}{W}, \qquad (15.11)$$

где $W$ — максимальный объемный расход рабочей воды из усилительного реле на сервомотор, зависящий от индекса сопл (табл. 15.3).

Определив $V$ и оценив по прототипам или выбрав по данным динамического расчета замкнутой системы $T_с$, по формуле (15 11) можно определить $W$, а затем по табл. 15.3 — необходимый индекс сопл.

Характеристика сервомотора, представляющая собой зависимость скорости перемещения его поршня $dm/dt$ от перепада давления на поршне $\Delta p_в = p_{в1} - p_{в2}$, имеет вид, показанный на рис. 15.6.

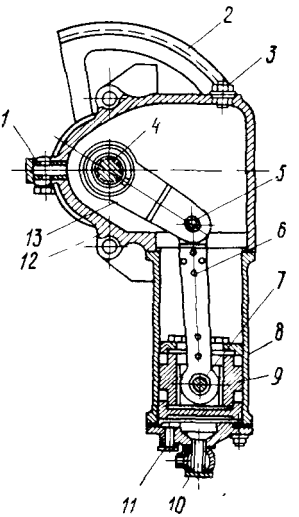



Рис. 15.5. Конструкция гидравлического сервомотора с кривошипно-шатунным механизмом.

*1* — подвод рабочей воды в верхнюю полость; *2* — зубчатый сектор, *3* — пробка для выпуска воздуха из верхней полости, *4* — выходной вал; *5* — палец; *6* — шатун; *7* — палец, *8* — цилиндр сервомотора, *9* — поршень; *10* — подвод рабочей воды в нижнюю полость; *11* — пробка для выпуска воздуха из нижней полости, *12* — корпус, *13* — кривошип

Корпус и поршень гидравлического сервомотора рекомендуется изготовлять из бронзы АМц9-2, корпус изготовляют также из латуни ЛК803Л. Уплотнительные манжеты изготовляют из теплостойкой и маслостойкой резины 8190 гр. V-б.

**Регулирующие органы.** Регулирующие органы (*клапаны, золотники*, задвижки и т. п.) преобразуют перемещение поршня сервомотора в регулирующее *воздействие на объект*. Они обычно разрабатываются одновременно с проектированием объекта автоматизации.

При значительной величине силы трения на регулирующем органе связь между регулирующим органом и штоком сервомотора делается рычажной с достаточно большим передаточным отношением (от 2 до 5). Это позволяет уменьшить величину силы трения $F_{тр}$, приведенной к штоку сервомотора, и, следовательно, уменьшить диаметр сервомотора $D_с$.

*Таблица 15.3*

**Расход рабочей среды через усилительные реле с различными индексами сопл при перепаде давлений на соплах 5 кгс/см²**

| Индекс сопл | Расход рабочей воды на реле, кг/ч | | Расход рабочей воды на сервомотор, кг/ч | |
|---|---|---|---|---|
| | Однопроточное реле | Двухпроточное реле | Однопроточное реле | Двухпроточное реле |
| Д1,5 | 200 | 350 | 130 | 245 |
| Д1,9 | 350 | 600 | 235 | 395 |
| Д2,5 | 550 | 400 | 390 | 560 |
| Д3 | 700 | 1200 | 445 | 665 |

Для обеспечения надежного управления работой объекта на специальных режимах (при пуске, выходе из строя автоматики и т. п.) необходимо предусматривать устройства ручного управления регулирующим органом с местного поста управления.

Для перехода на ручное управление силовые трубопроводы, соединяющие усилительное реле с полостями сервомотора, сообщаются между собой поворотом обходного крана (см. рис. 15.1, *а*), что приводит к выравниванию давления в обеих полостях сервомотора при любом отклонении регулирующей заслонки или струйной трубки усилительного реле. Затем привод ручного управления регулирующим клапаном вводят в соединение со штоком клапана.

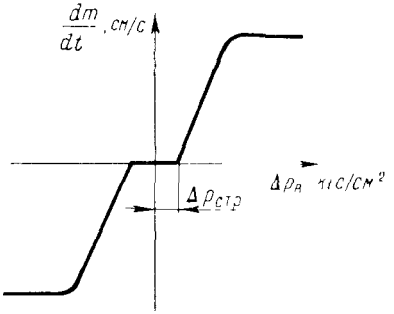



Рис. 15.6. Характеристика гидравлического сервомотора.

*Материалы, применяемые для изготовления регулирующих органов, приведены в табл. 15.4.*

**Корректирующие устройства.** Основными типами корректирующих устройств, служащих для увеличения запаса устойчивости системы, являются дополнительные жесткие и гибкие обратные связи.

Введение в регулятор жесткой обратной связи, улучшая устойчивость, приводит к неодинаковости значений регулируемой величины на различных статических режимах. Уравнение равновесия весового рычага регулятора с жесткой обратной связью (см. рис. 15.1, *б,в*) при его горизонтальном положении имеет вид

$$p_0 F_a l_1 + F_{о.с} l_3 = F_y l_2, \qquad (15.12)$$

где $F_{о.с}$ — сила натяжения пружины обратной связи; $l_3$ — длина рычага обратной связи; остальные обозначения — те же, что и в уравнении (15.3).

Сила натяжения $F_{о.с}$ равна

$$F_{о.с} = c_{о.с} \bar{k} m, \qquad (15.13)$$

где $c_{о.с}$ — жесткость пружины обратной связи; $\bar{m} = \bar{k}m$ — натяг пружины; $m$ — перемещение поршня сервомотора; $\bar{k}$ — передаточный коэффициент.

Из выражений (15.12), (15.13) имеем

$$p_0 F_a l_1 + c_{о.с} \bar{k} m l_3 = F_0 l_2. \qquad (15.14)$$

*Таблица 15.4*

**Материалы, рекомендуемые для изготовления регулирующих органов**

| Наименование дегалей | Материал |
|---|---|
| Корпус клапана регуляторов температуры пара РТПГ — $\frac{500}{20.5}$ ТМ | Сталь 15ХМ |
| Корпус клапана регуляторов температуры пара РТПГ — $\frac{300}{20.5}$ ТМ | Ст.3 |
| Корпус золотника регуляторов температуры РТ-40-ТМ | Сталь 25Л |
| Корпус клапана регуляторов уровня для объектов с давлением до 5 кгс/см$^2$ | Латунь ЛК80-3л |
| Корпус клапана регуляторов уровня для объектов с давлением до 28 кгс/см$^2$ | Ст.3 |
| Корпус клапана регуляторов уровня для объектов с давлением до 65 кгс/см$^2$ | Ст.5 или сталь 35 |

График зависимости $p_0$ от $m$ согласно (15.14) изображен на рис. 15.7 и называется *статической характеристикой регулятора*. Реальная статическая характеристика будет отличаться от полученной наличием зоны неоднозначности, вызываемой силами сухого трения в измерительно-усилительном органе, сервомоторе и регулирующем клапане. Наибольшая разница между ординатами прямого или обратного ходов статической характеристики $\Delta p_{0\max}$ называется *неравномерностью регулятора*, а половина ширины зоны неоднозначности по вертикали $\Delta p_\varepsilon$ — *нечувствительностью регулятора*.

Запишем уравнение (15.14) для крайних точек характеристики (рис. 15.7, *а*)

$$p_{0\,\max} F_a l_1 + c_{\text{о.с}} \bar{k} m_{\min} l_3 = F_y l_2;$$

$$p_{0\,\min} F_a l_1 + c_{\text{о.с}} \bar{k} m_{\max} l_3 = F_y l_2.$$

Вычитая последнее уравнение из предыдущего, получаем

$$\Delta p_{0\,\max} F_a l_1 = \Delta m_{0\,\max} c_{\text{о.с}} \bar{k} l_3,$$

откуда

$$c_{\text{о.с}} = \frac{F_a l_1 \Delta p_{0\,\max}}{\bar{k} l_3 \Delta m_{\max}}, \qquad (15.15)$$

где $\Delta p_{0\max} = p_{0\max} - p_{0\,\min}$ — неравномерность регулятора; $\Delta m_{\max}$ — ход поршня сервомотора.

Величина $\Delta p_{0max}$ определяется из динамического расчета системы регулирования либо оценивается по прототипам. Она должна быть достаточной для обеспечения устойчивости системы.

Величина $\overline{k}\Delta m_{max}$, стоящая в знаменателе формулы (15.15), представляет собой ход скользящего по кулачку ролика обратной связи (для схемы, показанной

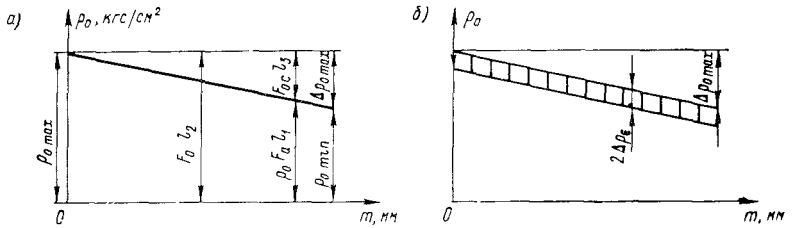



Рис. 15.7. Статическая характеристика регулятора с жесткой обратной связью: *а* — идеализированная; *б* — реальная.

на рис. 15.1, *в*) или максимальное перемещение связанного с рычагом обратной связи конца пружины обратной связи (для схемы, показанной на рис. 15.1, *б*). Эта величина выбирается по конструктивным соображениям.

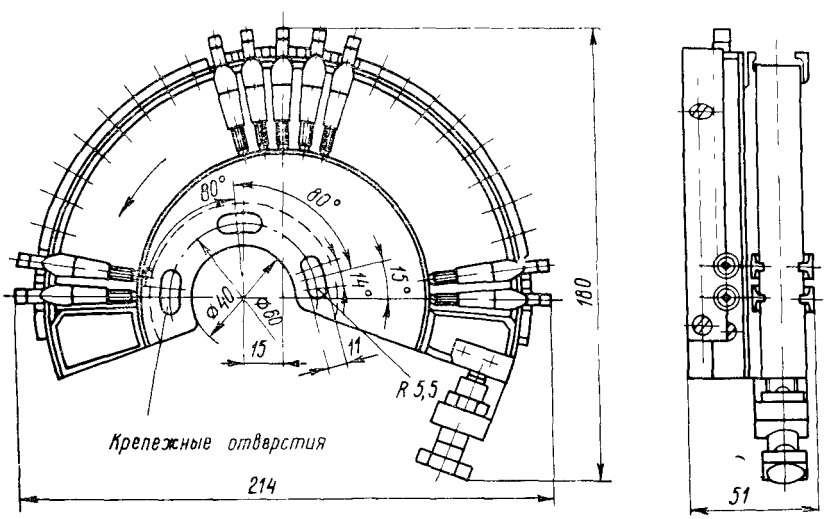



Рис. 15.8. Кулачок изменяемого профиля.

Величина $c_{o.c}$, определяемая по формуле (15.15), подбирается приемлемой с конструктивной точки зрения за счет передаточного числа обратной связи $\overline{k}$, поскольку требуемая неравномерность регулирования $\Delta p_{0max}$ не меняется, если изменять $c_{o.c}$ и $\overline{k}$ так, чтобы их произведение $c_{o.c}\overline{k}$ оставалось постоянным.

Число витков, диаметры проволоки и витка пружины обратной связи определяются так же, как для установочной пружины (см. выше).

Пружины обратных связей изготовляют из проволоки 1 или из стали Х18Н10Т.

Жесткая обратная связь типа кулачок—пружина (см. рис. 15.1, *в*) содержит *кулачок изменяемого профиля*, надетый на выходной вал, вращаемый сервомотором. Кулачок (рис. 15.8) имеет клавиши, крепящиеся в его теле винтами. На клавиши натянута гибкая стальная лента, по которой скользит ролик, воздействующий на пружину обратной связи (см. рис. 15.1, *в*). Поворачивая торцевым ключом винт данного клавиша, можно изменить профиль кулачка в требуемой точке; соответственно в этой точке изменяется воздействие обратной связи и профиль статической характеристики регулятора.

Максимальный угол поворота унифицированного кулачка составляет 180°, диапазон настройки подъема клавиша — 16 мм. Масса кулачка — не более 3,2 кг.

Гибкая обратная связь в качестве основного элемента содержит изодром. Принцип действия *гидравлического изодрома* ясен из описания его схемы (см. рис. 15.1, *г*). Конструкция изодромного механизма показана на рис. 15.9.

Важнейший параметр гидравлического изодрома — *время изодрома*, под которым понимают время свободного движения мембраны изодрома от одного из крайних положений к среднему. Время изодрома возрастает при прикрытии его дроссельного клапана.

**Арматура.** Дроссельный клапан для настройки времени сервомотора (см. рис. 15.1) имеет различные модификации. При установке этого клапана в отдельном корпусе он имеет вид, показанный на рис. 15.10, и характеристики, указанные в табл. 15.5.

*Таблица 15.5*

**Характеристики дроссельных клапанов**

| Условный проход *Dy* | Габаритные размеры, мм | | | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|
| | *L* | *B* | *H* | |
| 6 | 86 | 30 | 68 | 0,44 |
| 10 | 96 | 36 | 86 | 0,7 |

Корпус дроссельного клапана можно изготовлять из латуни ЛК80-3л или бронзы АМц9-2, дроссель изготовляется из стали 2Х13 по ГОСТ 5632-61.

*Обходной кран*, служащий для перехода на ручное управление путем сообщения между собой полостей сервомотора, изображен на рис. 15.11. Он имеет массу 1,5 кг. Корпус обходного крана изготовляют из латуни ЛК80-3л, пробку крана — из бронзы АМц9-2, пружину — из бронзы КМц3-1.

Выпускается стандартная модификация, в которой дроссельный клапан и обходной кран размещены в одном корпусе.

*Уравнительные сосуды* служат для создания в них постоянного уровня; разница между постоянным уровнем в сосуде и переменным уровнем в объекте воспринимается мембранным чувствительным элементом (см. § 8) регулятора уровня.

Схема включения, внешний вид и габаритные размеры уравнительного сосуда для объектов с давлением 0,03—1,0 кгс/см$^2$ изображены на рис. 15.12.

Уравнительные сосуды различных модификаций для объектов с давлением до 65 кгс/см$^2$ выполняются согласно отраслевой нормали.

Для уменьшения влияния качки судна на волнении на работу автоматики уравнительный сосуд должен быть установлен в осевой плоскости объекта параллельно диаметральной плоскости судна.

*Фильтр* для очистки рабочей воды устанавливается перед напорным коллектором, распределяющим воду на усилительные реле регуляторов. Для возмож-

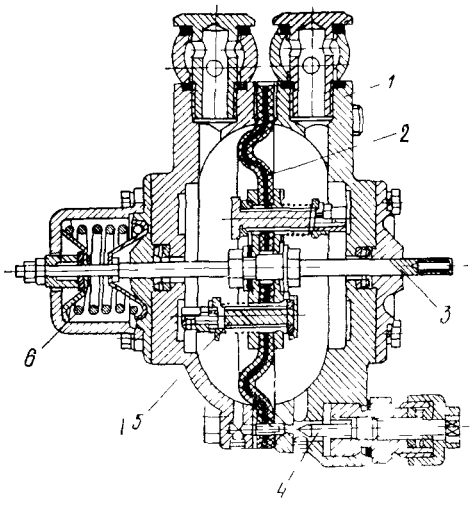



Рис. 15.9. Конструкция гидравлического изодромного механизма.

*1* — корпус; *2* — мембрана изодрома; *3* — шток; *4* — дроссельный клапан; *5* — перепускной клапан; *6* — пружина изодрома.

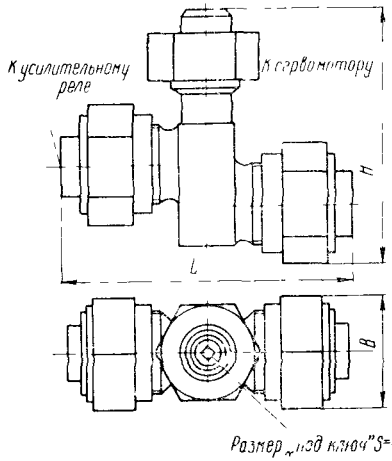



Рис. 15.10. Дроссельный клапан для настройки времени сервомотора (габаритные размеры клапана указаны в табл. 15.5).

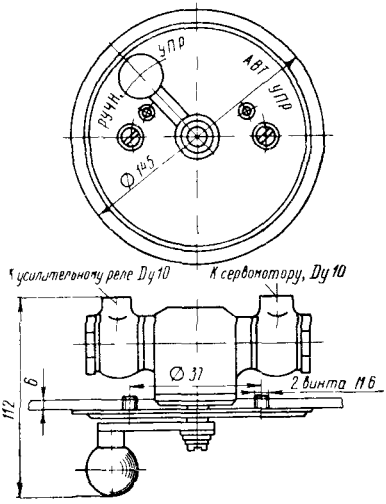



Рис. 15.11. Обходной кран для перехода на ручное управление.

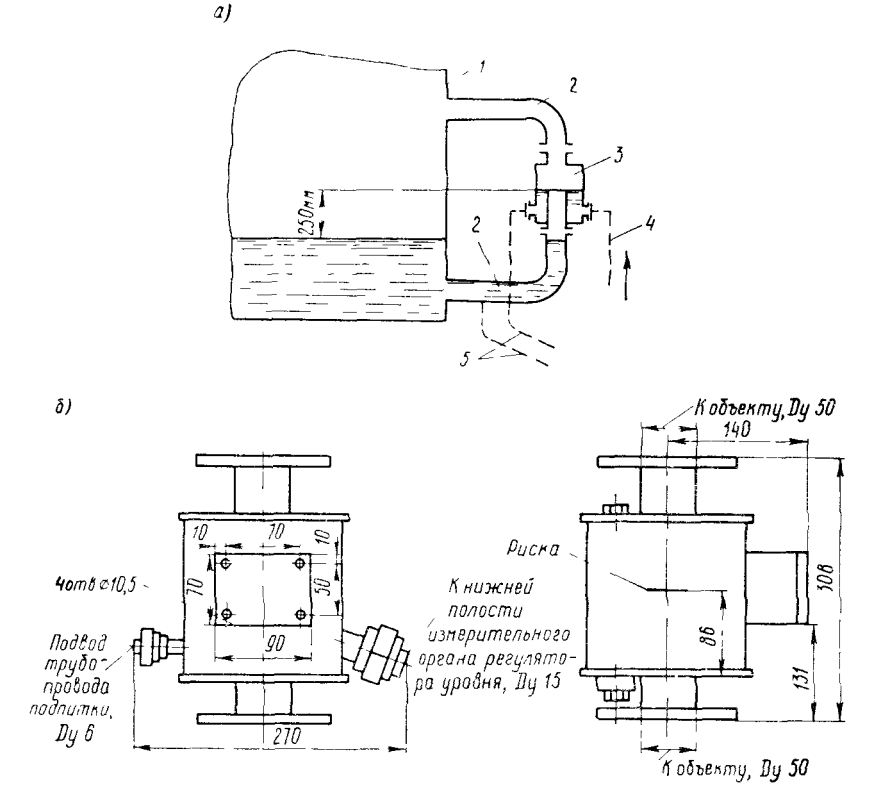



Рис. 15.12. Уравнительный сосуд для измерения уровня в объектах с давлением 0,03—1,0 кгс/см²: *а* — схема включения; *б* — внешний вид.

*1* — объект регулирования уровня, *2* — уравнительные трубопроводы, связывающие сосуд с объектом, *3* — уравнительный сосуд *4* — подпитка уравнительного сосуда (слив рабочей воды от усилительного реле регулятора уровня); *5* — импульсные трубопроводы к корпусу мембранного чувствительного элемента регулятора уровня.

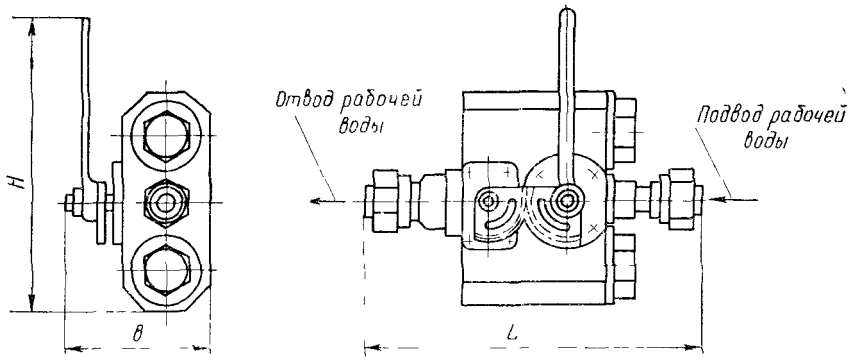



Рис. 15.13. Сдвоенный фильтр для очистки рабочей воды (габаритные размеры указаны в табл. 15.6).

*Таблица 15.6*

**Основные данные сдвоенных фильтров**

| Условный проход *Dy* | Габаритные размеры, мм | | | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|
| | *L* | *B* | *H* | |
| 10 | 225 | 100 | 195 | 7,0 |
| 25 | 280 | 208 | 285 | 32,0 |

ности очистки фильтр делается сдвоенным, так что в работе находится лишь одна его половина. Внешний вид сдвоенного фильтра показан на рис. 15.13, а его характеристики приведены в табл. 15.6. Сетка фильтра изготовляется из латуни ЛК80.

*Трубопроводы рабочей воды*, входящие в состав регуляторов, изготовляются из меди и имеют условный проход *Dy* 10.

## § 16. ТИПОВЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Типовые гидравлические регуляторы служат для регулирования давлений, перепадов давлений, уровней и температур пара, масла, топлива и конденсата в судовых паросиловых установках; они состоят из элементов, описанных в предыдущем параграфе. Унифицированные и выпускаемые отечественной промышленностью по заявкам заказчиков гидравлические регуляторы указаны в табл. 16.1.

**Регуляторы давления.** Регуляторы давления типа РД имеют принципиальную схему, показанную на рис. 15.1, *а, б*. Основные характеристики регуляторов давления приведены в табл. 16.2, примеры их применения указаны в табл. 16.3.

**Регуляторы перепада давлений.** Принципиальные схемы регуляторов перепада давлений изображены на рис. 16.1. Оба регулятора измеряют разность давлений, которая является в данном случае регулируемой величиной и, поскольку регулятор не имеет обратной связи, поддерживается постоянной на всех статических режимах (в пределах зоны нечувствительности).

Регулятор ДРД-1-II-ТМ поддерживает постоянный перепад давлений на регулирующем клапане. Давление в магистрали до клапана поддерживается постоянным с помощью другого автоматического устройства. Поддерживая постоянный перепад давлений на клапане, регулятор тем самым обеспечивает сохранение постоянного давления в магистрали или резервуаре за клапаном при различных расходах регулируемой среды.

Регулятор ДРД-5 поддерживает постоянный перепад давлений на некотором золотнике. Тем самым предоставляется возможность регулировать расход жидкости через этот золотник только путем изменения его проходного сечения, что является функцией другого автоматического устройства. Для поддержания регулируемого перепада давлений на заданном уровне регулятор воздействует на свой регулирующий орган (дроссельный золотник).

Основные характеристики регуляторов перепада давлений приведены в табл. 16.4.

**Регуляторы температуры.** Принципиальные схемы регуляторов температуры изображены на рис. 16.2.

В случае повышения регулируемой температуры пара в магистрали сильфон термоманометрического чувствительного элемента регулятора РТПГ-300/20.5-ТМ

*Таблица 16.1*

**Унифицированные гидравлические регуляторы**

| Индекс регулятора | Наименование | Регулируемая среда |
|---|---|---|
| РД-1-II-ТМ<br>РД-6-II-ТМ<br>РД-15-II-ТМ<br>РД-40-II-ТМ<br>РД-64-II-ТМ | Регуляторы давления | Конденсат, воздух, пар |
| ДРД-1-II-ТМ<br>ДРД-5 | Регуляторы перепада давлений | Топливо, масло |
| РТПГ $\frac{500}{20.5}$-ТМ<br>РТПГ $\frac{500}{20.8}$-ТМ | Регуляторы температуры пара с переключателем для пароохладителей впрыскивающего типа | Пар |
| РТПГ — $\frac{300}{20.5}$-ТМ<br>РТПГ — $\frac{300}{20.8}$-ТМ | Регуляторы температуры пара без переключателя для пароохладителей впрыскивающего типа | |
| РТ-40-ТМ | Регуляторы температуры для паровых подогревателей поверхностного типа | Масло, топливо, вода |
| РУД 32/32-II-ТМ<br>РУД 50/50-II-ТМ<br>РУД 100/100-II-ТМ<br>РУК 125/50-II-ТМ | Регуляторы уровня одноимпульсные для объектов регулирования с давлением 0,03—5,0 кгс/см$^2$, действующие на подвод воды к объекту и отвод воды от него | Конденсат |
| РУД 32-II-II-ТМ<br>РУД 60-II-II-ТМ<br>РУД 125-II-II-ТМ | Регуляторы уровня одноимпульсные для объектов регулирования с давлением 0,03—5,0 кгс/см$^2$, действующие на подвод воды к объекту | |
| РУК-60-0-II-ТМ<br>РУД-60-0-II-ТМ | Регуляторы уровня одноимпульсные для объектов регулирования с давлением 0,03—5,0 кгс/см$^2$, действующие на отвод воды от объекта | |
| ОРП-20-II-М<br>ОРП-32-II-М | Регуляторы уровня одноимпульсные для объектов регулирования с давлением до 28 кгс/см$^2$, действующие на подвод воды или пара к объекту | |
| ДРП-80-III-М/А-пр.<br>ДРП-80-III-М/А-лев.<br>ДРП-80-III-М/Б-пр.<br>ДРП-80-III-М/Б-лев. | Регуляторы уровня двухимпульсные для объектов регулирования с давлением до 65 кгс/см$^2$, действующие на подвод воды к объекту | |

*Таблица 16.2*

**Основные характеристики регуляторов давления типа РД**

| Индекс регулятора | Регулируемое давление, кгс/см² | Эффективная площадь сильфона, см² | Ширина зоны нечувствительности измерительно-усилительного органа, кгс/см² | Тип усилительного реле | Габариты регулятора без сервомотора и регулирующего клапана, мм | | | Масса (без сервомотора и регулирующего клапана), кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Длина | Ширина | Высота | |
| РД-1-II-ТМ | 0,1—1,4 | 60,7 | 0,01 | Двухпроточные | 176 | 175 | 407 | 13 |
| РД-6-II-ТМ | 1,5—6,0 | 8,2 | 0,03 | | 169 | 165 | 391 | 11 |
| РД-15-II-ТМ | 6,1—15,0 | 8,8 | 0,06 | | 169 | 165 | 391 | 11 |
| РД-40-II-ТМ | 15,1—40,0 | 3,36 | 0,10 | | 169 | 165 | 380 | 11 |
| РД-64-II-ТМ | 40,1—64,0 | 2,34 | 0,10 | | 169 | 165 | 380 | 11 |

*Таблица 16.3*

**Применение регуляторов давления типа РД**

| Индекс регулятора | Пример применения | *Точность поддержания* регулируемой величины, кгс/см² |
|---|---|---|
| РД-1-II-ТМ | Для поддержания давления в деаэраторе, в магистралях отработавшего пара, греющего пара испарителя котельной воды *, в уплотнении главных турбин * | ±0,05 |
| РД-6-II-ТМ | Для поддержания давления в деаэраторе, в магистралях отработавшего пара, греющего пара магистрали бытовых нужд, испарителе грязных конденсатов * | ±0,1 |
| РД-15-II-ТМ | Для поддержания давления в магистрали отбора от ГТЗА, в магистрали рабочего пара эжекторов, рабочей воды для гидравлической автоматики, испарителе грязных конденсатов * | ±0,3 |
| РД-40-II-ТМ<br>РД-64-II-ТМ | Для поддержания давления в паровых магистралях | ±0,5 |

* В случаях, помеченных звездочкой, регулятор снабжается жесткой обратной связью типа рычаг—пружина, в остальных случаях он не имеет обратной связи

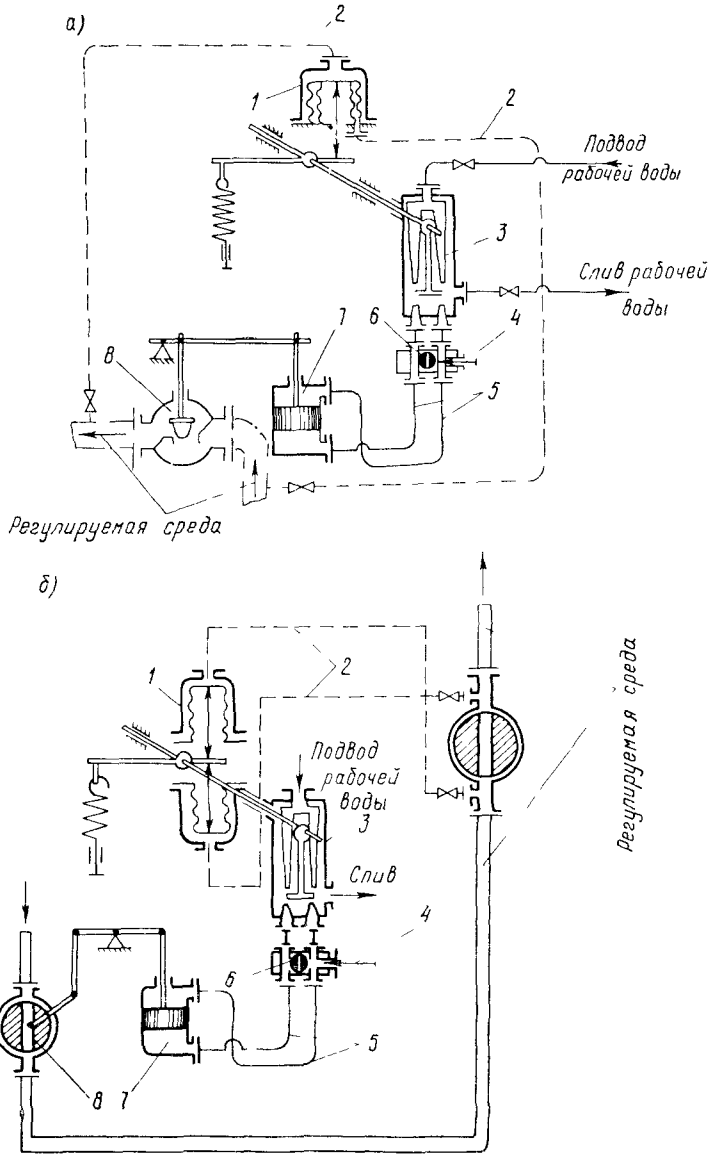



Рис. 16.1. Принципиальные схемы регуляторов перепада давлений: *а* — регулятора ДРД-1-II-ТМ; *б* — регулятора ДРД-5.

*1* — чувствительные элементы (сильфоны); *2* — импульсные трубопроводы, *3* — усилительное реле; *4* — дроссельный клапан; *5* — силовые трубопроводы, *6* — обходной кран, *7* — сервомотор; *8* — регулирующий орган.

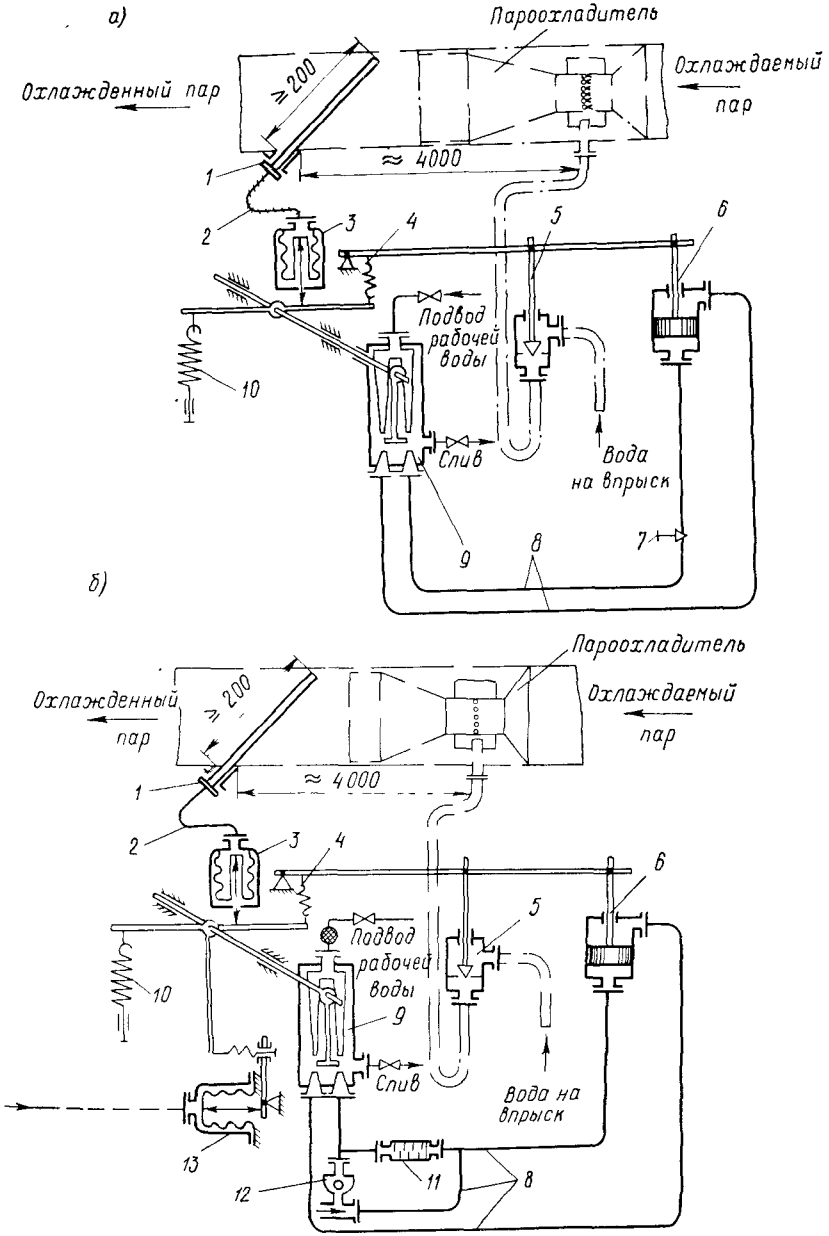


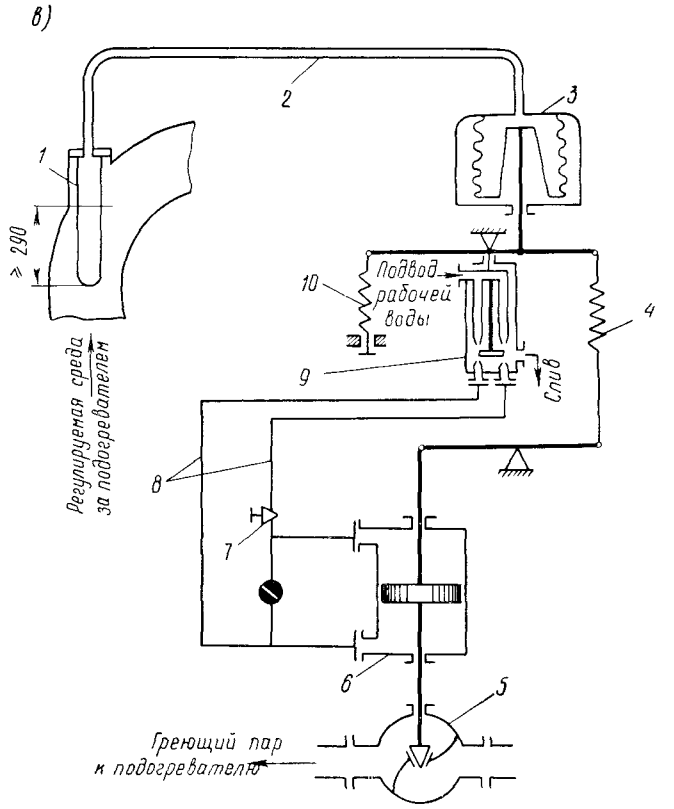

Рис. 16.2. Принципиальные схемы регуляторов температуры: *а* — регулятора

*1* — ампула, *2* — капилляр; *3* — сильфон, *4* — пружина обратной связи; *5* — регули
*9* — усилительное реле, *10* — установочная пружина; *11* — многошайбовый

(рис. 16.2, *а*) поворачивает весовой рычаг по часовой стрелке, регулирующая заслонка усилительного реле отклоняется влево, и сервомотор открывает клапан впрыска воды в пароохладитель. Регулятор РТПГ-300/20.8-ТМ имеет такую же принципиальную схему. Эти регуляторы применяются для поддержания температуры пара в магистрали производственных нужд и в магистрали греющего пара испарительной установки с точностью около ±2° С. Основные характеристики их указаны в табл. 16.5.

Регуляторы температуры РТПГ-500/20.5-ТМ и РТПГ-500/20.8-ТМ для пароохладителей впрыскивающего типа с переключателем (рис. 16.2, *б*) применяются для регулирования температуры перегретого пара за котлом, в том числе для таких случаев, когда требуется автоматическое снижение температуры пара при работе установки на задний ход.

Автоматическая перестройка регулятора на поддержание более низкой температуры пара достигается подводом давления пара от трубопровода за маневровым клапаном турбины заднего хода к сильфону переключателя; это оказывает воздействие на весовой рычаг регулятора, равносильное ослаблению натяжения установочной пружины.




РТПГ-300/20.5-ТМ; *б*— регулятора РТПГ-500/20.5-ТМ; *в*—регулятора РТ-40-ТМ.

рующий клапан, *6* — сервомотор, *7* — дроссельный клапан, *8* — силовые трубопроводы; дроссель, *12* — дроссельный клапан с шариком, *13* — переключатель

*Таблица 16.4*

**Основные характеристики регуляторов перепада давлений**

| Наименование характеристики | Индекс регулятора | |
|---|---|---|
| | ДРД-1-II-ТМ | ДРД 5 |
| Регулируемый перепад давлений, кгс/см² | 0,1—1,4 | 3,0—5,0 |
| Ширина зоны нечувствительности измерительно-усилительного органа, кгс/см² | 0,01 | 0,1 |
| Тип усилительного реле | Двухпроточное | |
| Индекс сопл | Согласно табл. 15.3 | Д1,9 |
| Максимально допустимое давление на сильфон, кгс/см² | 1,4 | 32 |
| Масса регулятора без сервомотора и регулирующего клапана, кг | 13,5 | 11,5 |

В силовом трубопроводе, соединяющем усилительное реле с одной из полостей сервомотора, включены параллельно *дроссельный клапан с шариком* и многошайбовый дроссель. При движении воды по этому трубопроводу от реле к сервомотору шарик прижимается к гнезду и вода проходит в основном через многошайбовый дроссель с большим сопротивлением, ввиду чего скорость движения поршня сервомотора замедляется, т. е. время сервомотора возрастает. При движении воды по названному трубопроводу в обратном направлении шарик отжимается от гнезда, открывая проход для воды, сопротивление падает и время сервомотора уменьшается. Это позволяет быстро прекращать впрыск охлаждающей воды при падении температуры пара.

Основные характеристики регуляторов температуры с переключателем для пароохладителей впрыскивающего типа приведены в табл. 16.6.

Регулятор РТ-40-ТМ (рис. 16.2, *в*) измеряет температуру подогреваемой среды за подогревателем поверхностного типа и воздействует на клапан впуска греющего пара в подогреватель. Этот регулятор применяется для регулирования температуры подогрева топлива, масла или воды в пределах 30—130° С с точностью ±1° С. Основные характеристики регулятора даны в табл. 16.7.

**Регуляторы уровня.** *Принципиальная схема гидравлического мембранного* регулятора уровня типа РУД или РУК, применяемого для регулирования уровня в объектах с давлением 0,03—5,0 кгс/см², изображена на рис. 16.3. Мембрана чувствительного элемента этого регулятора воспринимает давление столба воды $H$ между постоянным уровнем в уравнительной трубе и переменным уровнем в объекте, измеряя тем самым уровень в объекте. *При желании уравнительная труба* может быть заменена уравнительным сосудом (см. § 15).

При изменении уровня в объекте изменяется высота столба воды $H$, равновесие регулятора нарушается, регулирующая заслонка отклоняется, и поршень сервомотора воздействует на регулирующий клапан, изменяя расход регулируемой среды из объекта и восстанавливая тем самым регулируемый уровень.

*Таблица 16.5*

**Характеристики регуляторов температуры пара без переключателя для пароохладителей впрыскивающего типа**

| Наименование характеристики | Индекс регулятора | |
|---|---|---|
| | РТПГ $\frac{300}{20\,5}$ ТМ | РТПГ $\frac{00}{-0\,8}$ ТМ |
| Регулируемая температура, °С | 100—300 | 100—300 |
| Диаметр седла регулирующего органа, мм | 5 | 8 |
| Максимальная площадь проходного сечения регулирующего органа, мм² | 10 | 30 |
| Минимальная площадь проходного сечения регулирующего органа, мм² | 0 (клапан запорный) | 0 (клапан запорный) |
| Вид конструктивной характеристики регулирующего органа | Параболический | |
| Коэффициент расхода регулирующего органа при полностью открытом клапане | 0,9 | 0,9 |
| Нечувствительность регулятора, °С | 1,5 | 1,5 |
| Неравномерность регулятора, °С | 10± 1 | 10± 1 |
| Тип усилительного реле | Двухпроточное | |
| Индекс сопл | Д1,5 | Д1,5 |
| Время сервомотора (минимальное), с | 2,0 | 2,0 |
| Условное давление охлаждающей воды, кгс/см² | 25 | 25 |
| Условное давление пара в пароохладителе, кгс/см² | 25 | 25 |
| Масса, кг | 45 | 45 |
| Наполнитель ампулы | А от | |

Регулятор имеет жесткую обратную связь типа рычаг—пружина.

При крене судна на угол $\alpha$ высота столба воды $H$ уменьшится и станет равной $H\cos\alpha$. Ввиду этого при качке судна на волнении возникло бы периодическое внешнее воздействие, вызывающее колебания в системе регулирования

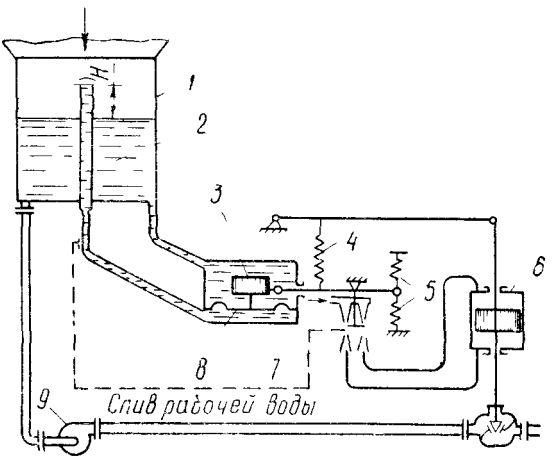



Рис. 16.3 Принципиальная схема мембранного регулятора уровня.

*1* — объект регулирования, *2* — уравнительная (фиксирующая) труба, *3* — груз, *4* — пружина обратной связи, *5* — установочные пружины, *6* — сервомотор, *7* — усилительное реле; *8* — мембрана чувствительного элемента, *9* — насос

*Таблица 16.6*

**Характеристики регуляторов температуры пара с переключателем для пароохладителей вспрыскивающего типа**

| Наименование характеристики | Индекс регулятора | |
|---|---|---|
| | РТПГ $\frac{500}{20.5}$-ТМ | РТПГ $\frac{500}{20\,8}$-ТМ |
| Регулируемая температура, °С | 200—500 | 200—500 |
| Диаметр седла регулирующего органа, мм | 5 | 8 |
| Максимальная площадь проходного сечения регулирующего органа, мм² | 10 | 30 |
| Минимальная площадь проходного сечения регулирующего органа, мм² | 0 (клапан запорный) | 0 (клапан запорный) |
| Вид конструктивной характеристики регулирующего органа | Параболический | |
| Коэффициент расхода регулирующего органа при полностью открытом клапане | 0,9 | 0,9 |
| Нечувствительность регулятора, °С | 3 | 3 |
| Неравномерность регулятора, °С | 25±2 | 25±2 |
| Тип усилительного реле | Двухпроточное | |
| Индекс сопл | Д1,5 | Д1 5 |
| Время сервомотора на открытие регулирующего органа, с | 30—40 | 30—40 |
| Время сервомотора на закрытие регулирующего органа, с | 10—20 | 10—20 |
| Величина автоматической перестройки регулятора, °С | 0—100 | 0—100 |
| Давление на сильфон переключателя, обеспечивающее максимальную перестройку регулятора, кгс/см² | 6—9 | 6—9 |
| Давление охлаждающей воды, кгс/см² | 100 | 100 |
| Максимально допустимое давление на сильфон переключателя, кгс/см² | 40 | 40 |
| Давление пара в пароохладителе, кгс/см² | 64 | 64 |
| Масса, кг | 50 | 50 |
| Наполнитель ампулы | Азот | |

Для исключения этого явления выше мембраны уровня закреплен груз, воспринимающий бо́льшую часть усилия, развиваемого мембраной под действием перепада давлений $H$. При качке судна составляющая веса груза, направленная вниз и действующая на весовой рычаг, меняется по тому же закону, что и высота столба жидкости $H$, и равновесие системы не нарушается.

Различные схемы включения регуляторов уровня типа РУК и РУД изображены на рис. 16.4. Возможны и другие схемы включения.

Назначение различных регуляторов типа РУК и РУД поясняет табл. 16.8, их основные характеристики сведены в табл. 16.11.

Одноимпульсные регуляторы уровня (регуляторы питания) типа ОРП применяются чаще всего для регулирования уровня в барабане вспомогательного парового котла. Мембрана этого регулятора, принципиальная схема которого изображена на рис. 16.5, измеряет высоту столба воды $H$ между постоянным уровнем в конденсационном сосуде и переменным — в объекте. При изменении уровня

в объекте величина $H$ изменяется, равновесие нарушается, что вызывает отклонение регулирующей заслонки и перестановку поршня сервомотора. Поршень сервомотора воздействует либо на клапан впуска свежего пара к поршневому насосу, подающему воду в объект (рис. 16.5, *а*), либо на регулирующий питательный клапан, установленный на напорной магистрали питательного насоса (рис. 16.5, *б*). В последнем случае центробежный или поршневой питательный насос снабжается дополнительным регулятором, измеряющим давление нагнетания насоса и воздействующим на клапан впуска пара в привод насоса. Груз, подвешенный под мембраной, как и у регуляторов типа РУД и РУК, служит для компенсации влияния качки.

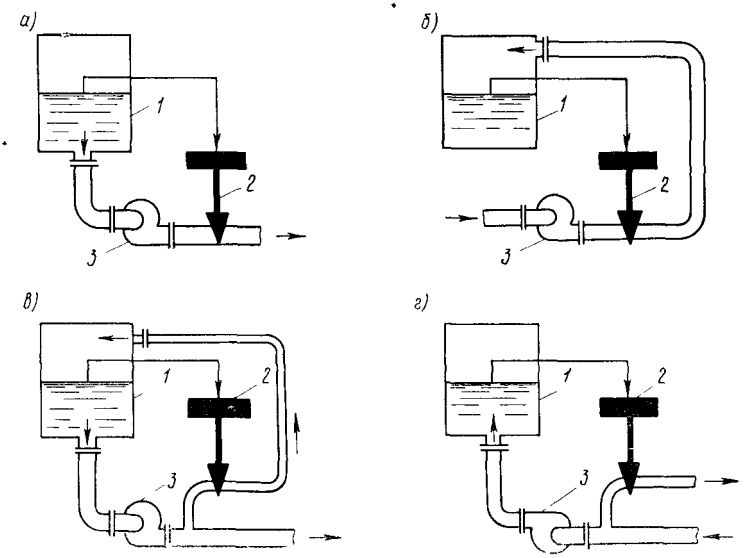



Рис. 16.4. Схемы включения гидравлических мембранных регуляторов уровня: *а* — на расходе; *б* — на притоке; *в* — на обратном сливе от расхода; *г* — на обратном сливе от притока.

*1* — объект; *2* — регулятор уровня; *3* — насос.

Рекомендации по выбору регуляторов уровня типа ОРП приведены в табл. 16.9, а их основные характеристики — в табл. 16.10.

Двухимпульсные регуляторы уровня типа ДРП обычно применяются для поддержания уровня в главных котлах. Принципиальная схема регулятора изображена на рис. 16.6. Мембрана уровня измерительного органа этого регулятора воспринимает направленную вверх силу, пропорциональную высоте столба $H$ между постоянным уровнем в уравнительном (конденсационном) сосуде и переменным — в паровом коллекторе котла. Мембрана расхода пара воспринимает перепад давлений на участке от парового коллектора до точки отбора импульса за пароперегревателем, пропорциональный расходу пара из котла. Между весовым рычагом регулятора и мембраной расхода установлена импульсная пружина, которая всегда сжата. С увеличением паровой нагрузки котла давление в верхней полости измерительного органа уменьшается, и мембрана расхода, перемещаясь вверх, частично разгружает импульсную пружину. Оба воздействия — по уровню и по расходу пара — суммируются на весовом рычаге и трансформируются в перемещение регулирующей заслонки усилительного реле. Отклонение регулирующей заслонки вызывает перемещение поршня сервомотора и связанного с ним питательного клапана. Обратное выключение заслонки осуществляется через пружину обратной связи.

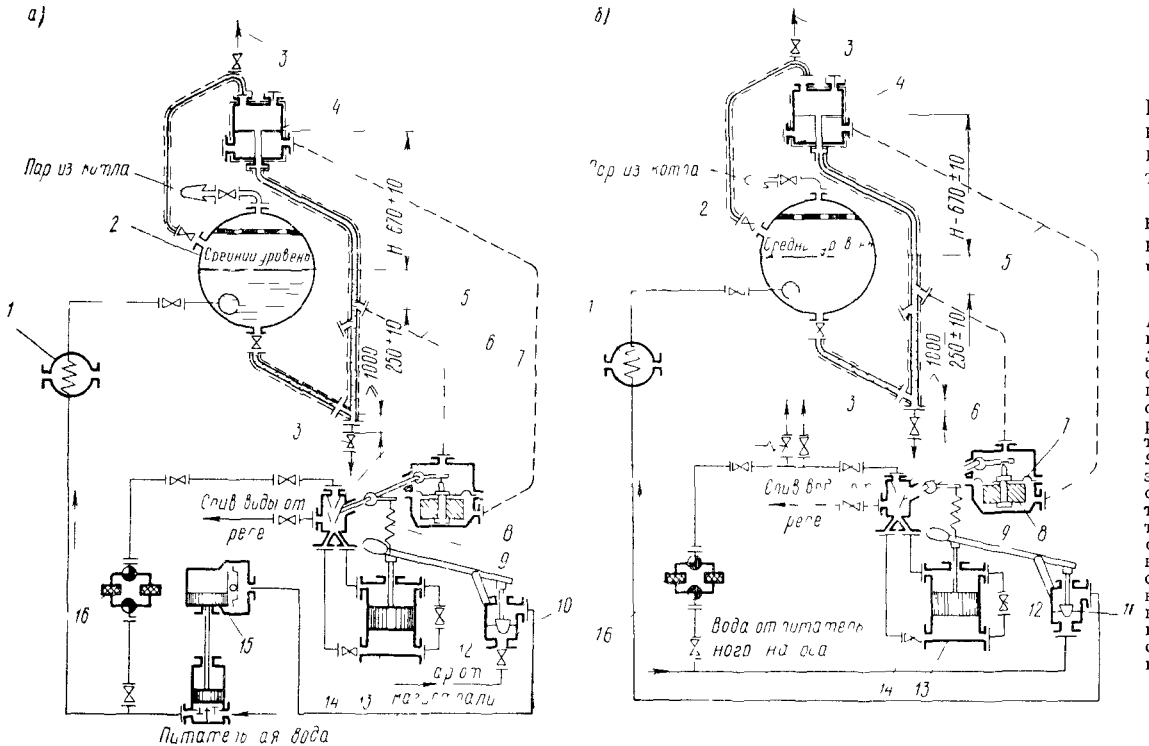



Рис 16 5. Принципиальные схемы одноимпульсных регуляторов уровня типа ОРП *а* — в случае управления клапаном впуска свежего пара в привод насоса; *б* — в случае управления питательным клапаном котла.

*1* — водоподогреватель, *2* — паровой коллектор котла, *3* — продувание, *4* — конденсационный сосуд, *5* — импульсные трубопроводы, *6* — однопроточное усилительное реле, *7* — мембрана измерительного органа, *8* — груз *9* — пружина обратной связи, *10* — клапан подвода свежего пара к приводу питательного насоса; *11* — питательный клапан котла, *12* — обходной кран для перехода на ручное управление, *13* — сервомотор, *14* — дроссельный клапан для настройки времени сервомотора, *15* — поршневой питательный насос с паровой машинкой в качестве привода, *16* — сдвоенный фильтр

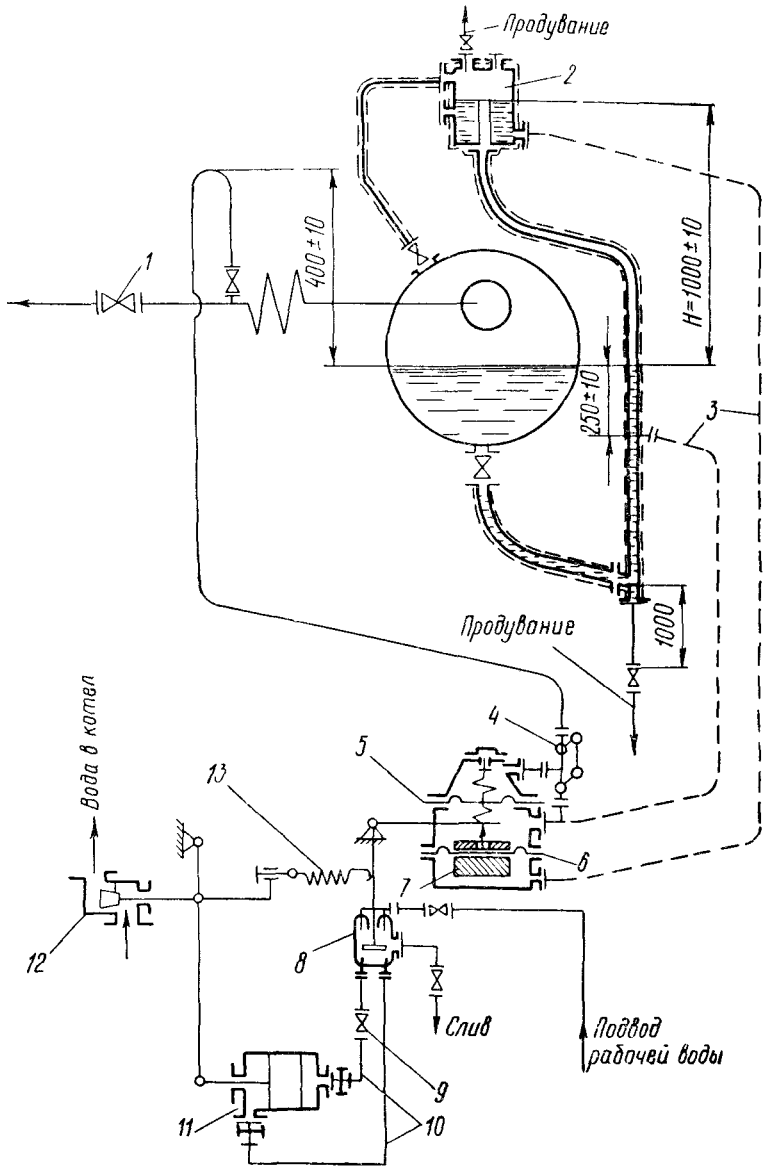



Рис. 16.6. Принципиальная схема двухимпульсного регулятора уровня типа ДРП.

*1* — стопорный клапан котла, *2* — уравнительный (конденсационный) сосуд, *3* — импульсные рубопроводы, *4* — сдвоенный клапанный блок, сообщающий верхнюю полость измерительного органа либо с магистралью за пароперегревателем (нормальное включение), либо с паровым коллектором (резервное включение), *5* — мембрана расхода, *6* — мембрана уровня *7* — груз *8* — усилительное реле *9* — дроссельный клапан, *10* — силовые трубопроводы *11* — сервомотор *12* — питательный клапан котла *13* — пружина обратной связи

*Таблица 16.7*

**Характеристики регулятора температуры для паровых подогревателей поверхностного типа**

| Наименование характеристики | Значение |
|---|---|
| Индекс регулятора | РТ40-ТМ |
| Регулируемая температура, °С | 30—130 |
| Максимальная площадь проходного сечения регулирующего органа, мм² | 290 |
| Минимальная площадь проходного сечения регулирующего органа, мм² | 4 |
| Вид конструктивной характеристики регулирующего органа | Параболический |
| Коэффициент расхода регулирующего органа при полностью открытом золотнике | 0,3 |
| Нечувствительность регулятора, °С | 1 |
| Неравномерность регулятора, °С | 10±2 |
| Тип усилительного реле | Двухпроточное |
| Индекс сопл | Д1,5 |
| Время сервомотора, с | 2 |
| Наполнитель ампулы | Азот |
| Масса, кг | 57 |
| Регулируемая среда | Масло, топливо, вода |
| Давление регулируемой среды, кгс/см² | 40 |
| Давление греющего пара, кгс/см² | 40 |

*Таблица 16.8*

**Применение регуляторов уровня типа РУК и РУД**

| Индекс регулятора | Примеры применения |
|---|---|
| РУК 125/50-II-ТМ | Для поддержания уровня в главном конденсаторе паротурбинной установки |
| РУД 32/32-II-ТМ<br>РУД 50/50-II-ТМ<br>РУД 100/100-II-ТМ | Для поддержания уровня в деаэраторе паротурбинной установки |
| РУД 32-II-II-ТМ<br>РУД 60-II-II-ТМ<br>РУД 125-II-II-ТМ | Для поддержания уровня в деаэраторе, в цистерне и т. п. |
| РУД 60-0-II-ТМ | Для поддержания уровня в сборнике горячих конденсатов, цистерне, испарителе и т. п. |
| РУК 60-0-II-ТМ | Для поддержания уровня во вспомогательном конденсаторе |

Основные характеристики регуляторов типа ДРП указаны в табл. 16.12.

**Основные требования к монтажу регуляторов.** Регулирующая аппаратура на судне должна быть размещена так, чтобы к ней обеспечивался свободный доступ для обслуживания, производства ремонтов и осмотров.

Измерительные органы регуляторов уровня должны быть размещены ниже измеряемых уровней при всех возможных углах крена и дифферента судна.

*Таблица 16.9*

**Рекомендации по выбору регуляторов типа ОРП**

| Паропроизводительность котла $D$, т/ч | $D < 5$ | $D > 5$ | $D > 5$ | |
|---|---|---|---|---|
| Давление пара в котле $p_к$, кгс/см$^2$ | $p_к < 10$ | $p_к < 10$ | $p_к > 10$ | |
| Схема включения регулятора | Согласно рис. 16.5, *а* или рис. 16.5, *б* | Согласно рис. 16.5, *а* или рис. 16.5, *б* | Согласно рис. 16.5, *а* | Согласно рис. 16.5, *б* |
| Рекомендуемый индекс регулятора | ОРП-20-II-М | ОРП-32-II-М | ОРП-20-II-М или ОРП-32-II-М (для $D > 7$) | ОРП-32-II-М |

*Таблица 16.10*

**Характеристики одноимпульсных регуляторов уровня типа ОРП**

| Наименование характеристики | Индекс регулятора | |
|---|---|---|
| | ОРП-20-II-М | ОРП-32-II-М |
| Условный проход регулирующего органа, мм | 20 | 32 |
| Максимальная площадь проходного сечения регулирующего органа, см$^2$ | 0,8 | 2,3 |
| Минимальная площадь проходного сечения регулирующего органа, см$^2$ | 0,01 | 0,2 |
| Вид конструктивной характеристики регулирующего органа | Линейный | |
| Коэффициент расхода регулирующего органа (пар/вода) при полностью открытом клапане | 0,7/0,9 | 0,7/0,9 |
| Ширина зоны нечувствительности регулятора, мм вод. ст. | 6 | 6 |
| Неравномерность регулятора, мм вод. ст. | 40±5 | 40±5 |
| Тип усилительного реле | Однопроточное | |
| Индекс сопл | Д1,5 | Д1,5 |
| Время сервомотора, с | 6 | 6 |
| Масса регулятора, кг | 52 | 52 |

*Таблица 16 11*

## Основные характеристики регуляторов типа РУК и РУД

| Индекс регулятора | Тип усилительного реле | Индекс сопл | Условный проход регулирующего органа $D_y$ мм | Площадь проходного сечения регулирующего органа, см² | | | | Время сервомотора с | Ширина зоны нечувствительности регулятора, мм вод ст | Неравномерность регулятора мм вод ст | Вид конструктивной характеристики регулирующего органа | Масса, кг | Место установки регулирующего клапана | Габаритные размеры регулятора в сборе мм | | | Коэффициент расхода регулирующего органа |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | на отводе | | на подводе | | | | | | | | | | | |
| | | | | максимальная | минимальная | максимальная | минимальная | | | | | | | $L$ | $H$ | $B$ | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| РУД 32/32-II ТМ | точное | | 32 — 32 | 0,79 | Не более 0,021 | 1,52 | Не более 0,026 | 1,0 | 5 | 40 ±5 | ческий | 40 | На притоке / На расходе | 431 | 130 | 380 | 0,95 — 0,85 |
| РУД 50/50-II-ТМ | | | 50 — 50 | 2,46 | Не более 0,04 | 4,28 | Не более 0,053 | 3,0 | 5 | 140 ± ±10 | | 52 | На притоке / На расходе | 456 | 450 | 380 | 0,85 — 0,85 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| РУД 100/100-II-ТМ | Двухпро | Д1,5 | 100<br>100 | 16,5 | — | 20,5 | — | 4,5 | 5 | 125 ±10 | Параболи | 185 | На притоке<br>На расходе | 525 | 950 | 475 | 0 9 |
| РУК 125/50-II-ТМ | | | 125<br>50 | 15,5 | 32 | 4,91 | 0,037 | 8,0 | 5 | 120 ± ±10 | | 215 | На расходе<br>На притоке | 400 | 1055 | 595 | 0,9<br>0,88 |
| РУД 32-II-II-ТМ | | | 32 | — | — | 2,39 | Не более 0 22 | 1,0 | 5 | 40 ±5 | | 35 | На притоке | 395 | 430 | 380 | 0,95 |
| РУД 60 II-II-ТМ | | | 60 | — | — | 5 73 | ок 0 | 2,5 | 5 | 40 ±5 | | 57 | На притоке | 450 | 410 | 350 | 0,85 |
| РУД 125-II-II-ТМ | | | 125 | — | — | 16,25 | — | 3,0 | 5 | 140 ± ±10 | | 122 | На притоке | 430 | 880 | 490 | 0,6 |
| РУК 60 0-II-ТМ | | | 60 | 2,3 | ок 0 | — | — | 2,5 | 5 | 40 ±5 | | 56 | На расходе | 435 | 410 | 350 | 0,72 |
| РУД 60 0-II-ТМ | | | 60 | 8 9 | Не более 0,027 | — | — | 2,5 | 5 | 40 ±5 | | 50 | На расходе | 410 | 450 | 350 | 0,85 |

*Таблица 16.12*

**Характеристики двухимпульсных регуляторов уровня ДРП-80-III-М/А и ДРП-80-III-М/Б**

| Наименование характеристики | Значение |
|---|---|
| Максимальная площадь проходного сечения регулирующего органа, $см^2$ | 10 |
| Минимальная площадь проходного сечения регулирующего органа, $см^2$ | 0,2 |
| Вид конструктивной характеристики регулирующего органа | Линейный |
| Коэффициент расхода регулирующего органа при полностью открытом клапане | 0,9 |
| Ширина зоны нечувствительности регулятора, мм вод. ст. | 6 |
| Неравномерность регулятора, мм вод. ст. | 0—(±20) |
| Тип усилительного реле | Двухпроточное |
| Индекс сопл | Д1,9 |
| Время сервомотора, с | 12 |
| Регулируемая среда | Конденсат |
| Давление регулируемой среды, $кгс/см^2$ | 64 |
| Условный проход регулируемого органа, мм | 80 |
| Масса регулятора в сборе, кг | 96 |

Импульсные трубопроводы регуляторов уровня должны иметь уклон в сторону регулятора не менее 1 : 10. Горизонтальные участки и «воздушные мешки» на этих трубопроводах не допускаются.

На импульсных трубопроводах регуляторов, предназначенных для поддержания уровня в объектах с давлением ниже атмосферного, не разрешается устанавливать запорную арматуру и пугевые штуцерные соединения.

Установка регулирующих клапанов с сервомоторами допускается только при вертикальном положении штоков, в непосредственной близости от контрольно-измерительных приборов, по которым должно осуществляться аварийное ручное управление.

В случае наличия «воздушных мешков» на трубопроводах рабочей воды, идущих от усилительного реле к сервомотору, необходимо предусмотреть на них пробки для выпуска воздуха.

# ГЛАВА IV

# ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

## § 17. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ

*К пневматическим элементам относятся* элементы, использующие в качестве носителя энергии воздух или другие газы. Пневматические элементы на судах применяются в системах управления главными двигателями, в пневматических системах вспомогательных механизмов, в системах автоматизации судовых энергетических установок и т. д.

По принципу действия различают пневмомеханические и струйные элементы.

Пневмомеханические элементы характеризуются наличием движущихся механических частей (*мембраны, заслонки, краны, клапаны* и т. д.).

Струйные элементы не имеют движущихся механических частей. В отличие от пневмомеханических элементов, где используются в основном законы движения газов по трубопроводам, струйные элементы основаны на использовании аэродинамических эффектов, наблюдающихся при взаимодействии струй или при обтекании стенок струями.

*Пневмомеханика* изучает законы и явления, имеющие место при работе пневмомеханических элементов.

Область науки и техники, изучающая и разрабатывающая струйные элементы, называется *пневмоникой*. Пневмомеханика и пневмоника — основные разделы пневмоавтоматики. *Часто проводят аналогии между пневмомеханикой* и электротехникой, пневмоникой и электроникой.

По характеру входных и выходных сигналов пневмоэлементы подразделяются на следующие классы: непрерывные, дискретные и комбинированные.

К непрерывным элементам относятся пневмоэлементы, у которых входной и выходной сигналы являются непрерывными функциями времени.

Дискретные пневмоэлементы имеют входные и выходные сигналы в дискретной форме, т. е.

в форме дискретных временных последовательностей импульсов. Обычно дискретные пневмоэлементы выполняют те или иные логические функции. Их называют логическими (см. § 3).

Следует отметить, что в настоящее время имеются достаточно полные в функциональном отношении наборы непрерывных и дискретных пневмомеханических и струйных элементов, позволяющие реализовать произвольно заданный закон управления любой сложности.

Наша отечественная промышленность выпускает следующие наборы типовых пневматических элементов.

1. АУС — агрегатная унифицированная система приборов пневмоавтоматики.

2. УСЭППА — универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики.

3. «Старт» — система приборов пневмоавтоматики, построенная из элементов системы УСЭППА.

4. «СМСТ-2» — система модулей струйной техники.

5. «ПЭРА» — пневматические элементы релейной автоматики — система пневматических унифицированных модулей релейной автоматики.

6. «Волга» — система элементов струйной техники.

Характеристика этих систем дана в § 20.

По функциональному назначению пневмоэлементы объединяются в следующие классы.

1. Операционные непрерывные элементы (пневмосопротивления, пневмоемкости, мембраны, пружины, поршни и т. д.).

2. Операционные дискретные элементы (пневмореле, пневмокнопки, пневмоячейки памяти, логические элементы и т. п.).

3. Измерительные и чувствительные элементы (манометры, датчики, индикаторы, регистраторы и т. д.).

4. Преобразующие элементы. К ним относятся элементы, предназначенные для преобразования пневмосигналов в механические, электрические, магнитные, оптические и другие сигналы.

5. Элементы питания пневмолиний (генераторы давления, импульсаторы, фильтры и т. д.).

В табл. 17.1 приведены основные обозначения, используемые при изображении пневмоэлементов.

Основные преимущества пневмоэлементов по сравнению с электромеханическими и электронными элементами при их использовании в судовой автоматике следующие.

1. *Возможность эксплуатации без существенного снижения функциональных характеристик* в условиях радиации, вибрации, ударных нагрузок, в пожаро- и взрывоопасных условиях, что крайне важно в системах автоматики танкеров. Носителем энергии при работе пневматических систем служит воздух или другие газы, в частности, инертные. Это обеспечивает указанное выше существенное преимущество пневмоэлементов и специфическую сферу их применения.

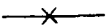
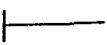
2. Более высокая приемистость пневмопривода по сравнению с электроприводом (напряженность магнитных полей, используемых в технике, обычно не превышает 4—6 кгс/см$^2$, напряженность пневматического поля может достигать 100 кгс/см$^2$). Поэтому при разгоне привода пневмоцилиндра от золотника требуется меньшее время по сравнению с электроприводом.

3. Наличие функционально-полных систем приборов и элементов, выпускаемых серийно отечественной промышленностью (АУС, УСЭППА, «Старт», «Волга», «ПЭРА», «СМСТ-2»). *Эти системы позволяют осуществлять проектирование* многих систем судовой автоматики в основном при использовании типовых пневмоэлементов, что существенно снижает их стоимость и сокращает время сдачи в эксплуатацию.

4. Малые агрессивность и коррозионное влияние на работу других приборов и устройств, устанавливаемых на судах. В отличие от электромагнитного поля пневматическое поле не влияет на конструктивные стали, цветные металлы и их сплавы с различными покрытиями и на анодированный алюминий.

*Таблица 17.1*

**Схемные обозначения пневмоэлементов**

| Обозначение | Наименование |
|---|---|
| | Пневмолиния питания |
| | Пневмолиния, соединенная с атмосферой |
| | Мембрана с жестким центром |
|  | Нерегулируемое сопротивление |
| | Регулируемое сопротивление |
| | Емкость |
|  | Сопло-заслонка |
| | Индикатор давления |
| | Регистратор давления |
| | Генератор давления |
| | Импульсатор |
| | Устройство, выполняющее логическую операцию «повторение» |
| | Устройство, выполняющее логическую операцию «отрицание» |
| | Устройство, выполняющее логическую операцию «умножение» |
| | Устройство, выполняющее логическую операцию «сложение» |

5. Малое использование или полное отсутствие (струйные элементы) движущихся механических частей.

6. Малые массы пневматических устройств — всего лишь 15—20% по сравнению с аналогичными электромеханическими устройствами.

7. Наличие систем сжатого воздуха на большинстве судов позволяет устанавливать пневмосистемы автоматики на судах без применения специальных систем сжатого воздуха.

Основные недостатки пневмоэлементов следующие.

1. Необходимость поддержания герметичности пневмоэлементов и всей системы в целом и очистки воздуха от пыли, масла и воды.

2. Длинные линии пневмосвязи.

3. Малая стабильность технических характеристик пневмоэлементов.

4. Низкая точность и недостаточная надежность (особенно у непрерывных элементов), являющиеся следствием как малой стабильности технических характеристик элементов, так и ряда других причин (невозможность дешевого высокоточного исполнения элементов, влияние пыли и других примесей и т. д.).

5. Низкое быстродействие, высокий расход рабочей энергии, высокая металлоемкость. Быстродействие логических систем, построенных на струйных элементах, выше быстродействия пневмомеханических и электромеханических устройств, но значительно ниже электронных устройств (рабочие частоты струйных элементов не превышают 1 кГц).

Перечисленные достоинства и недостатки пневмоэлементов показывают, что пневмоэлементы имеют свою специфическую сферу применения в области судовой автоматики. Они дополняют и расширяют возможности электромеханических или электронных систем судовой автоматики.

При высоких требованиях к противопожарной безопасности специальных судов пневматические системы автоматики могут оказаться единственно приемлемыми.

## § 18. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Общепринятые обозначения пневмоавтоматики, наименование количественных характеристик, единицы и соотношение единиц в системах МКГСС и СИ приведены в табл. 18.1 и 18.2. Определения характеристик поясняются в тексте.

Основной количественной характеристикой, используемой при расчете пневмоэлементов и пневмолиний, служит давление $p$. Операционные непрерывные пневмоэлементы или приборы в общем случае характеризуются передаточной функцией или оператором функционирования. Если элемент, прибор или пневмолиния имеет несколько входов и один выход, то ее оператор функционирования можно представить в виде соотношения

$$\Phi(p_{\text{вых}},\ p_{1\text{вх}},\ p_{2\text{вх}},\ \ldots,\ p_{n\text{ вх}}) \equiv 0, \qquad (18\ 1)$$

где $p_{\text{вых}}, p_{1\text{вх}}, p_{2\text{вх}}, \ldots, p_{n\text{ вх}}$ — давления в выходном и входных сечениях соответственно.

Оператор функционирования в ряде случаев можно представить в явной форме:

$$p_{\text{вых}} = \varphi(p_{1\text{ вх}},\ p_{2\text{ вх}},\ p_{3\text{ вх}},\ \ldots,\ p_{n\text{ вх}}). \qquad (18.2)$$

Операторы функционирования элементов, линий и узлов строятся на основе законов физики и включают в свою структуру другие показатели пневмоэлементов, характеризующие их геометрическую структуру, состояние газа и динамическое взаимодействие.

Геометрическая структура определяется площадью проходного сечения $F$, приведенным радиусом проходного сечения $r$ и длиной $l$ участка пневмоканала.

*Таблица 18.1*

**Основные параметры пневмоавтоматики**

| Параметр | Обозначение | Единицы | | Соотношение |
|---|---|---|---|---|
| | | МКГСС | СИ | |
| Сила (вес) | $G$ | кгс | Н (ньютон) | 1 кгс = 9,81 Н |
| Давление | $p$ | $\frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$ | *Па* (паскаль) | $1\ \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2} = 9{,}81$ Па |
| Работа (энергия) | $A$ | кгс·м | Дж (джоуль) | 1 кгс·м = 9,81 Дж |
| Масса | $m$ | $\frac{\text{кгс}\cdot\text{с}^2}{\text{м}}$ | кг | $1\ \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}^2}{\text{м}} = 9\ 81$ кг |
| Мощность | $\frac{dA}{dt} = W$ | $\frac{\text{кгс}\cdot\text{м}}{\text{с}}$ | Вт (ватт) | $1\ \frac{\text{кгс}\cdot\text{м}}{\text{с}} = 9{,}81$ Вт |
| *Плотность* | $\rho$ | $\frac{\text{кгс}\cdot\text{с}^2}{\text{м}^4}$ | $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | $1\ \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}^2}{\text{м}^4} = 9{,}81\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ |
| Удельный вес | $\gamma$ | $\frac{\text{кгс}}{\text{м}^3}$ | $\frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$ | $1\ \frac{\text{кгс}}{\text{м}^3} = 9{,}81\ \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$ |
| Удельный объем | $w$ | $\frac{\text{м}^4}{\text{кгс}\cdot\text{с}^2}$ | $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ | $1\ \frac{\text{м}^4}{\text{кгс}\cdot\text{с}^2} = \frac{1}{9{,}81}\ \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ |
| Скорость газа | $v$ | $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ | $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ | — |
| Секундный объемный расход | $Q_v$ | $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ | $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ | — |
| Секундный массовый расход | $Q_\rho$ | $\frac{\text{кгс}\cdot\text{с}}{\text{м}}$ | $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ | $1\ \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}}{\text{м}} = 9{,}81\ \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ |
| Секундный весовой расход | $Q_\gamma$ | $\frac{\text{кгс}}{\text{с}}$ | $\frac{\text{Н}}{\text{с}}$ | $1\ \frac{\text{кгс}}{\text{с}} = 9{,}81\ \frac{\text{Н}}{\text{с}}$ |

*Продолжение табл. 18.1*

| Параметр | Обозначение | Единицы | | Соотношение |
|---|---|---|---|---|
| | | МКГСС | СИ | |
| Коэффициент динамической вязкости | $\mu$ | $\frac{\text{кгс}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$ | $\frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$ | $1\ \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}}{\text{м}^2} = 9{,}81\ \frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$ |
| Коэффициент кинематической вязкости | $\nu$ | $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ | $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ | — |
| Коэффициент объемного сжатия | $E_v$ | $\frac{\text{м}^2}{\text{кгс}}$ | $\frac{\text{м}^2}{\text{Н}}$ | $1\ \frac{\text{м}^2}{\text{кгс}} = \frac{\text{м}^2}{9{,}81\ \text{Н}}$ |
| Модуль объемной упругости | $E_p$ | $\frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$ | $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ | $1\ \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2} = 9{,}81\ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ |
| Скоростной напор | $q = \rho\frac{v^2}{2}$ | $\frac{\text{кгс}}{\text{м}^2}$ | $\frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}^2}$ | $1\ \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2\cdot\text{с}} = 9{,}81\ \frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}^2}$ |
| Число Рейнольдса | Re | Безразмерный коэффициент | | |
| Тепловая энергия | $Q$ | кал | Дж | $1\ \text{кал} = \frac{1}{0{,}24}\ \text{Дж}$ |
| Электрическая энергия | $A = \int_{t_1}^{t_2} W dt$ | кгс·м | Дж | 1 кгс·м = 9,81 Дж |

*Таблица 18.2*

**Значения параметров для воздуха**

| Параметр | Значение | | Условия измерения, формулы пересчета |
|---|---|---|---|
| | МКГСС | СИ | |
| Ускорение свободного падения $g$ | $9{,}81\ \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ | $9{,}81\ \frac{\text{Н}}{\text{кг}}$ | У земной поверхности |
| Газовая постоянная R | $29{,}27\ \frac{\text{кгс}\cdot\text{м}}{(\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C})}$ | $287 = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ | При нормальных условиях: $T_c = 15^\circ$ C, $p = 1{,}0333\ \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ |

| Параметр | Значение | | Условия измерения, формулы пересчета |
|---|---|---|---|
| | МКГСС | СИ | |
| Плотность $\rho$ | $0{,}125\ \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}^2}{\text{м}^4}$ | $1{,}226\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ | При нормальных условиях; $\rho = \frac{\gamma}{g}$ — для любых условий |
| Коэффициент динамической вязкости $\mu$ | $1{,}82\times$ $\times 10^{-6}\ \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$ | $17{,}85\ \frac{\text{Н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$ | При нормальных условиях. Пересчет на отклонение температуры: $\mu = [1{,}745\cdot 10^{-6} + 5{,}03\cdot 10^{-9} t_c]$, где $t_c$ — температура, °С |
| Коэффициент кинематической вязкости $\nu$ | $1{,}45\cdot 10^{-5}\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$ | $1{,}45\cdot 10^{-5}\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$ | При нормальных условиях; $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ — для любых условий |
| Показатель изоэнтропы $k$ | 1,4 | 1,4 | При нормальных условиях; $k = \frac{c_p}{c_v}$, где $c_p$ — удельная теплоемкость при постоянном давлении; $c_v$ — удельная теплоемкость при постоянном объеме |
| Скорость звука $c$ | 341 м/с | 341 м/с | При нормальных условиях: $g = 9{,}81$ м/с$^2$, $k = 1{,}4$, $\rho = 0{,}125\ \frac{\text{кгс}\cdot\text{с}^2}{\text{м}}$. Пересчет на отклонение температуры: $c = 20{,}1\sqrt{T}$, где $T$ — температура, К. В общем случае $c = \sqrt{\frac{kp}{\rho}}$ |
| Удельный вес $\gamma$ | $1{,}22\ \frac{\text{кгс}}{\text{м}^3}$ | $11{,}97\ \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$ | Для нормальных условий; $\gamma = g\rho$ — для любых условий |

| Параметр | Значение | | Условия измерения, формулы пересчета |
|---|---|---|---|
| | МКГСС | СИ | |
| Критическое значение критерия Рейнольдса $Re^*$ | 2320 | 2320 | Для течения газа в круглой цилиндрической трубе $Re^* = \frac{vd}{\nu}$, где $d$ — диаметр трубы; $v$ — скорость газа |
| Критическое значение числа Рейнольдса при истечении струи в атмосферу $\overline{Re}^*$ | 40—50 | 40—50 | Для трубопровода произвольной формы и постоянного сечения $F$ рассчитывается приведенный диаметр: $d = 2\sqrt{\frac{F}{\pi}}$ |
| Механический эквивалент тепла $E_м$ | 427 $\frac{кгс \cdot м}{ккал}$ | 4 189 $\frac{Дж}{ккал}$ | 1 Дж 0,24 кал |
| Нормальное давление атмосферы $p_{атм}$ | 1 атм, 1033 $\frac{кгс}{м^2}$, 760 мм рт. ст., 1033 см вод. ст. | 10 134 $\frac{Н}{м^2}$ | У земной поверхности при $t = 15°$ С |

Приведенный радиус проходного сечения определяется по формуле

$$r = \sqrt{\frac{F}{\pi}}. \qquad (18\ 3)$$

Состояние газа в канале характеризуется давлением $p$, удельным объемом $\omega$ и абсолютной температурой $T$. Эти величины связаны уравнением Менделеева—Клайперона—Ван-дер-Вальса, называемым уравнением состояния газа:

$$p\omega = RT, \qquad (18.4)$$

где R — газовая постоянная.

В пневмоавтоматике это уравнение часто используют в форме

$$p = RT\rho, \qquad (18.5)$$

где $\rho$ — плотность газа — масса 1 м³ газа.

Так как

$$\omega = \frac{1}{\rho}, \qquad (18.6)$$

то для произвольного объема $V$ газа уравнение состояния записывается в следующем виде:

$$pV = mRT, \tag{18.7}$$

где $R = 287 \left[\frac{Дж}{кг \cdot К}\right]$ — для воздуха;

$R = 260 \left[\frac{Дж}{кг \cdot К}\right]$ — для кислорода.

В пневмоавтоматике рассматривают среднее абсолютное давление в проходном сечении.

При помощи манометра измеряют избыточное давление $p_{изб}$, равное разности между давлением, отсчитанным от нуля (т. е. от абсолютного вакуума), и давлением окружающего воздуха $p_{бар}$ (барометрическим давлением). Поэтому абсолютное давление равно

$$p = p_{изб} + p_{бар}. \tag{18.8}$$

В уравнения состояния входит абсолютное давление $p$. Измеренные манометром давления необходимо пересчитывать в абсолютные по формуле (18.8) и полученные таким образом значения абсолютных давлений использовать в уравнениях состояния.

Если температура газа измерена в градусах Цельсия, то необходимо произвести ее пересчет в градусы Кельвина по формуле

$$T\ [К] = \theta\ [°C] + 273°\ C. \tag{18.9}$$

Уравнение состояния (18.7) часто используют в дифференциальной форме:

$$p\,dV + V\,dp = R\,[m\,dT + T\,dm]. \tag{18.10}$$

Вес газа $G$, имеющего объем $V$, равен

$$G = \gamma V, \tag{18.11}$$

где $\gamma$ — удельный вес, измеряемый весом одного кубометра газа, Н/м³.

Масса газа $m$, имеющего объем $V$, равна

$$m = \rho V, \tag{18.12}$$

где $\rho$ — плотность газа.

Плотность и удельный вес связаны соотношением

$$\gamma = 9{,}81\rho. \tag{18.13}$$

Динамику пневмолиний характеризуют следующие величины: скорость течения газа $v$, секундный объемный расход газа $Q_v$, секундный массовый расход газа $Q_\rho$, секундный весовой расход газа $Q_\gamma$, коэффициент динамической вязкости $\mu$, коэффициент кинематической вязкости $\nu$, коэффициент относительного объемного сжатия $\beta_v$, модуль объемной упругости $E_v$, коэффициент пневматического сопротивления $\lambda$, коэффициент местного сопротивления $\zeta$, модуль упругости стенок пневмопровода $E_T$, коэффициент скорости $\varphi$, коэффициент сжатия $\alpha$, коэффициент расхода $\varepsilon$.

Скорость течения газа в сечении неравномерна. Поэтому часто используется средняя скорость, определяемая формулой вида

$$v = \frac{Q_v}{F}. \tag{18.14}$$

*Секундный объемный расход* $Q_v$ определяется предельным переходом:

$$Q_v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta V}{\Delta t}, \tag{18.15}$$

где $\Delta V$ — изменение объема участка пневмолинии за время $\Delta t$.

*Массовый секундный расход* равен

$$Q_\rho = \frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt}. \tag{18.16}$$

*Весовой секундный расход* определяется зависимостью

$$Q_\gamma = \frac{dG}{dt} = \frac{d(\gamma V)}{dt}. \tag{18.17}$$

Для стационарных условий $\rho = \text{const}$, $\gamma = \text{const}$

$$Q_\rho = \rho \frac{dV}{dt},$$

$$Q_\gamma = \gamma \frac{dV}{dt}.$$

Вязкость газа характеризует сопротивление различных слоев газа сдвигающим усилиям. По определению, *коэффициент динамической вязкости* газа $\mu$, Па·с, равен

$$\mu = \frac{\frac{P_к}{F}}{\frac{\Delta v}{\Delta y}}, \tag{18.18}$$

где $P_к$ — сила, действующая на площадь $F$ соприкосновения соседних слоев; $\Delta v/\Delta y$ — градиент скорости — величина, равная изменению скорости движения слоев, расположенных на расстоянии $\Delta y$ друг от друга.

*Коэффициент кинематической вязкости* $\nu$, м$^2$/с, определяется соотношением

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \tag{18.19}$$

Коэффициент вязкости зависит от температуры. Для потока воздуха при $\theta = 15^\circ C + 273$ имеем $\nu = 1{,}45 \cdot 10^{-5}$ м$^2$/с.

*Коэффициент объемного сжатия* $\beta_v$, м$^2$/Н, используется для выражения скорости изменения объема при изменении давления в виде зависимости

$$\frac{dV}{dp} = \beta_v T. \tag{18.20}$$

По определению, величина

$$\beta_v = \frac{\lim\limits_{\Delta p \to 0} \frac{\Delta V}{\Delta p}}{V} \tag{18.21}$$

представляет собой относительную скорость изменения объема при изменении давления.

Величина $E_v$, обратная $\beta_v$, называется модулем объемной упругости газа:

$$E_v = \frac{1}{\beta_v}. \tag{18.22}$$

Модуль объемной упругости характеризует изменение давления при изменении объема:

$$\Delta p = E_v \frac{dV}{V}. \tag{18.23}$$

*Коэффициент пневматического сопротивления* $\lambda$ характеризует потери давления при движении газа вследствие трения о стенки и ограждение пневмолинии, коэффициент местного сопротивления $\zeta$ характеризует потери давления в локализованных (местных) сопротивлениях.

*Модуль упругости* $E_T$ пневмолинии характеризует движение стенок при воздействии на них потока:

$$p = E_T y, \tag{18.24}$$

где $y$ — смещение стенки при воздействии давления.

*Коэффициент скорости* $\varphi$ определяется через коэффициент местного сопротивления:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}}. \tag{18.25}$$

*Коэффициент сжатия* $\alpha$ определяется в виде отношения

$$\alpha = \frac{F_{сж}}{F}, \tag{18.26}$$

где $F$ — площадь сечения выходного отверстия газа; $F_{сж}$ — площадь сжатого минимального сечения за выходным отверстием.

*Коэффициент расхода* $\varepsilon$ определяется по формуле

$$\varepsilon = \alpha\varphi. \tag{18.27}$$

Кроме указанных характеристик весьма важными в пневматике являются обобщенные характеристики: скоростной напор $q$ и число Рейнольдса Re.

*Скоростной напор* $q$ характеризует кинематическую энергию движущегося газа:

$$q = \rho\frac{v^2}{2}. \tag{18.28}$$

*Число Рейнольдса определяет характер течения газа. Если в рассматриваемом* сечении

$$\mathrm{Re} < 2320, \tag{18.29}$$

то характер движения газа будет ламинарным, т. е. без перемешивания соседних слоев; при $\mathrm{Re} \geqslant 2320$ движение газа будет турбулентным, т. е. будет иметь вихревые перемешивания.

Значение числа Рейнольдса зависит от скорости газа, радиуса проходного сечения, кинематической вязкости и определяется по формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{vr}{\nu}, \tag{18.30}$$

где $r$ — приведенный радиус.

Расчет пневмоэлементов производится по различным формулам в зависимости от характера течения газа.

При ламинарном течении скорость газа в точке поперечного сечения, находящейся на расстоянии $x$ от оси трубы, равна

$$v(x) = \frac{(p_1 - p_2)}{4\mu l}(r^2 - x^2), \tag{18.31}$$

где $p_1$ и $p_2$ — давления на концах трубы, отстоящих друг от друга на расстояние $l$; $r$ — радиус трубы.

В качестве упрощающего предположения принимается, что все процессы носят адиабатический характер, т. е. теплообмен через стенки пневмолиний *с окружающей средой пренебрежимо мал.*

# § 19. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Конструктивно различные по функциональному назначению пневматические приборы выполняются в основном при помощи различных типов пневмосопротивлений, пневмоемкостей и мембран.

*Пневмосопротивления* применяют для снижения расхода газа на данном участке пневмолинии.

*Пневмоемкости* используются для накопления газа.

*Мембраны и поршни* применяют для преобразования перепада давлений в механические усилия.

Основные пневмосопротивления приведены в табл. 19.1.

Снижение расхода газа при прохождении потока через пневмосопротивление характеризуется коэффициентом сопротивления (или просто сопротивлением)

$$R_{\text{с}} = \frac{1}{\alpha_{\text{п}}}, \qquad (19.1)$$

где $\alpha_{\text{п}}$ — коэффициент проводимости пневмосопротивления. Значение коэффициента сопротивления зависит от конструктивных параметров пневмосопротивления и параметров газа.

Уравнение состояний, т. е. закон, связывающий характеристики пневмосопротивления и проходящего через него потока газа, в ряде случаев можно выразить в форме пневматического закона Ома:

$$Q_{\gamma} = \frac{\Delta p}{R_{\text{с}}} = \frac{p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}}{R_{\text{с}}}, \qquad (19.2)$$

где $\Delta p$ — перепад давлений (разность между входным и выходным давлением пневмосопротивления) — величина, аналогичная падению напряжения на участке электрической цепи, содержащей сопротивление $R_{\text{с}}$; $Q_{\gamma}$ — весовой секундный расход газа — величина, аналогичная силе тока на данном участке электрической цепи.

Пневматический закон Ома выполняется для сопротивлений типа *капилляр* и *конус—конус*, т. е. для тех типов сопротивлений и условий их использования, при которых поток является ламинарным.

Пневмосопротивление типа капилляр (табл. 19.1) представляет собой круглую трубку длиной $l$ и внутренним диаметром $d$, причем $l \gg d$ (условие капиллярности).

Величина коэффициента сопротивления капилляра не регулируется. Пневмосопротивление типа конус—конус (см. табл. 19.1), т. е. щелевой дроссель, состоит из втулки и конической иглы, которую можно перемещать вдоль конического отверстия во втулке и закреплять иглу в требуемом положении. При перемещении иглы внутрь втулки зазор $\delta$ между иглой и втулкой уменьшается, при обратном движении иглы зазор увеличивается. Величина сопротивления в первом случае увеличивается, во втором — уменьшается. Фиксируя определенное положение иглы по отношению к втулке, можно установить требуемую величину коэффициента сопротивления, т. е. сопротивления типа конус—конус являются регулируемыми.

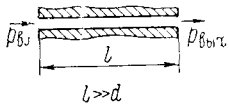
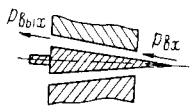
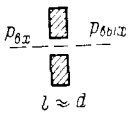
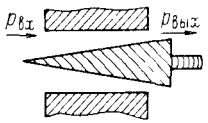
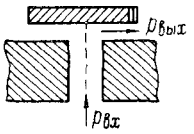
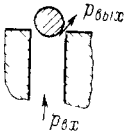
Пневмосопротивления типа *жиклер*, *конус—цилиндр*, *шарик—цилиндр*, *сопло—заслонка* (см. табл. 19.1) обычно функционируют в условиях турбулентного движения газа.

Сопротивление типа жиклер представляет собой пластину с круговым цилиндрическим отверстием малой длины.

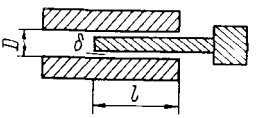
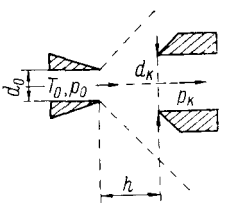
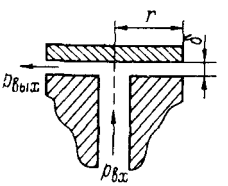
Сопротивление типа конус—цилиндр представляет собой втулку с круговым цилиндрическим каналом, в котором перемещается коническая игла, изменяя площадь $F$ выходного сечения.

*Таблица 19.1*

**Типы пневматических сопротивлений**

| Тип сопротивления | Устройство | Формула, отражающая принцип действия | Характер потока и регулируемость |
|---|---|---|---|
| Капилляр |  | $Q_\gamma = \frac{\Delta p}{R_c}$,<br>$R_c = 128 \frac{\mu}{\gamma} \times$<br>$\times \frac{l}{\pi \delta^4}$ | Ламинарный, нерегулируемое |
| Конус—конус |  | $Q_\gamma = \frac{\Delta p}{R_c}$,<br>$R_c = 12 \frac{\mu}{\gamma} \times$<br>$\times \frac{l}{\pi D \delta^3}$ | Ламинарный, регулируемое |
| Жиклер |  | См. формулу (19.9) | Турбулентный, нерегулируемое |
| Конус—цилиндр |  | То же | Турбулентный, регулируемое |
| Сопло—заслонка |  | См. формулу (19.9) | Турбулентный, переменное |
| Шарик—цилиндр |  | То же | Турбулентный, переменное |

*Продолжение табл. 19.1*

| Тип сопротивлений | Устройство | Формула, отражающая принцип действия | Характер потока и регулируемость |
|---|---|---|---|
| Цилиндр—цилиндр |  | $Q_\gamma = \frac{\Delta p}{R_c}$, $R_c = 12\,\frac{\mu}{\gamma} \times \times \frac{l}{\pi D \delta^3}$ | Ламинарный, регулируемое |
| Сопло—приемный канал |  | $d_0$ — диаметр питающего сопла, $d_к$ — диаметр приемного канала, $h$ — расстояние между соплом и приемным каналом, $p_к$ — давление в приемном канале | Ламинарный, нерегулируемое |
| Цилиндр—плоскость |  | $Q_\gamma = 2\pi r \int_0^\delta w_2\, d\delta$ при $\frac{\delta}{r} \ll 1$ | Ламинарный, нерегулируемое |

Сопротивление типа сопло—заслонка представляет собой втулку с круговым цилиндрическим каналом, выход которого прикрывается пластиной (заслонкой). При перемещении заслонки меняется площадь $F$ выходного сечения, и, следовательно, величина коэффициента сопротивления. Если вместо заслонки используется шарик, то сопротивление относят к типу шарик—цилиндр.

Площадь выходного сечения сопротивлений типов капилляр и жиклер является постоянной, т. е. эти сопротивления есть нерегулируемые. Площадь выходного сечения $F$ сопротивлений типов конус—конус и конус—цилиндр не меняется в процессе функционирования, но ее можно настраивать на определенную величину при подготовке к работе. Эти сопротивления являются регулируемыми.

Площадь выходного сечения $F$ сопротивлений типа сопло—заслонка и шарик—цилиндр изменяется в процессе работы. Такие сопротивления называются переменными.

Принцип действия пневмосопротивления можно выяснить, изучив уравнение его состояний, т. е. уравнение, связывающее основные конструктивные параметры пневмосопротивления с параметрами потока газа. Уравнение состояния проще всего получить, определив весовой секундный расход $Q_\gamma$.

Рассмотрим величину $\Delta S$ — элементарную площадку выходного сечения пневмосопротивления. Тогда $\Delta Q_\gamma = \gamma v \Delta S$ есть вес газа, проходящего через площадку $\Delta S$ за 1 с, $v$ — скорость движения газа через площадку $\Delta S$. Величина $Q_\gamma$

определяется суммированием $\Delta Q_\gamma$ по всему выходному сечению. Сумма всех $\Delta Q_\gamma$ при неограниченном уменьшении $\Delta S$ выражается в виде интеграла:

$$Q_\gamma = \int_F \int \gamma v \, dS. \tag{19.3}$$

Формула (19.3) определяет секундный весовой расход газа через пневмосопротивление при ламинарном и при турбулентном потоке.

Для сопротивления типа капилляр имеем

$$v(r) = \frac{\Delta p}{4\mu l}\left[\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 - r^2\right], \tag{19.4}$$

где $r$ — расстояние от оси капиллярной трубки до рассматриваемой точки; $l$ — длина капиллярной трубки; $\delta$ — внутренний диаметр капиллярной трубки.

Из формул (19.3) и (19.4) следует, что секундный весовой расход газа для капилляра

$$Q_\gamma = \int_0^{2\pi} \int_0^{\delta/2} \gamma \frac{\Delta p}{4\mu l}\left[\left(\frac{\delta}{2}\right)^2 - r^2\right] r \, dr \, d\varphi = \frac{p_{вх} - p_{вых}}{R_c}, \tag{19.5}$$

где $R_c$ — коэффициент сопротивления капилляра

$$R_c = 128 \frac{\mu}{\gamma}\left(\frac{l}{\pi d^4}\right). \tag{19.6}$$

Для пневмосопротивления типа конус—конус аналогично можно получить

$$Q_\gamma = \frac{p_{вх} - p_{вых}}{R_c}, \tag{19.7}$$

где $R_c$ — коэффициент сопротивления типа конус—конус

$$R_c = 12 \frac{\mu}{\gamma}\left(\frac{l}{\pi D \delta^3}\right); \tag{19.8}$$

$D$ — внутренний наибольший диаметр конического отверстия втулки; $\delta$ — расстояние между иглой и стенкой втулки; $l$ — длина образующей конического отверстия втулки (длина канала).

Коэффициент сопротивления типа конус—конус имеет большую чувствительность к перемещению иглы. Это следует из того, что $\delta$ входит в третьей степени в формулу (19.8).

Секундный весовой расход $Q_\gamma$ турбулентных сопротивлений (жиклер, конус—цилиндр, сопло—заслонка, шарик—цилиндр) приближенно определяется по формуле

$$Q_\gamma = \varepsilon p_{вх} F \varkappa(z), \tag{19.9}$$

где $\varkappa(z) = \begin{cases} 0{,}825, & 0 \leqslant z \leqslant 0{,}75, \\ 0{,}825 - 3{,}3\,(z - 0{,}75), & 1 \geqslant z > 0{,}75, \end{cases}$

$z = \frac{p_{вых}}{p_{вх}}$; $\varepsilon$ — коэффициент расхода.

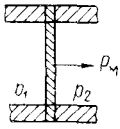
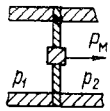
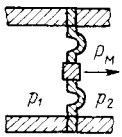
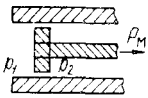
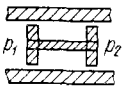
Основные типы мембран и поршней приведены в табл. 19.2.

Равнодействующая $P_м$ механических сил, приложенная к центру мембраны и возникающая за счет разности давлений в полостях, разделенных мембраной, по величине пропорциональна разности давлений (при малых $\Delta p = p_1 - p_2$):

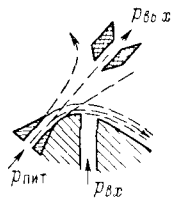
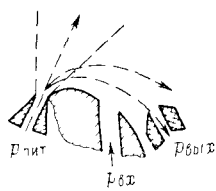
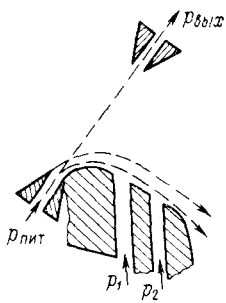
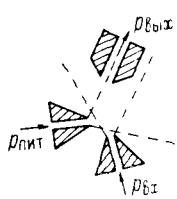
$$P_м = c_м \Delta p,$$

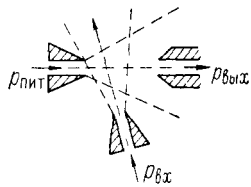
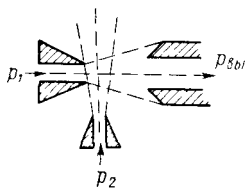
*Таблица 19.2*

**Типы мембран и поршней**

| Тип мембран и поршней | Устройство | Описание | Формула, отражающая принцип действия |
|---|---|---|---|
| Плоская без жесткого центра |   | *Пластина диаметром d* из капронового, прорезиненного или шелкового полотна, края которого заделаны перпендикулярно в стенку круглого пневмопровода | $P_м = c_м \Delta p$, $c_м = \text{const}$, $\Delta p = p_1 - p_2$ |
| Плоская с жестким центром |   | Круговой жесткий центр диаметром *d* расположен симметрично относительно центра мембраны | $P_м = c_м \Delta p$. $c_м = \text{const}$, $\Delta p = p_1 - p_2$ |
| Гофрированная с жестким центром |   | Два гофра (радиус каждого из которых равен *r*, а размер равен *a*) расположены симметрично по обеим сторонам от жесткого центра | $P_м = c_м \Delta p$, $c_м = \text{const}$, $\Delta p = p_1 - p_2$ |
| Подвижная жесткая мембрана (поршень) |   | Металлическая пластина имеет возможность перемещаться в круглом трубопроводе, полностью закрывая поперечное сечение. Механическое усилие передается посредством *штока*, жестко скрепленного с пластиной | $m \frac{d^2x}{dt^2} = F \Delta p + P_\Sigma$, *m* — масса поршня и движущихся с ним частей; *F* — площадь поршня; $P_\Sigma$ — силы, действующие на поршень |
| Двойной поршень |   | Две жесткие мембраны соединены штоком и имеют перемещения в полости | То же |
| Мембранный пакет | Соединение нескольких мембран в единую конструкцию | | — |

**Струйные элементы пневмоники**

| Типы струйных элементов | Устройство | Описание |
|---|---|---|
| Струйное реле ДА |  | Струя отрывается от стенки и попадает в приемный канал, создавая давление $p_{вых} = \begin{cases} 0, & p_{вх} < p^*, \\ \alpha p_{вх}, & p_{вх} \geqslant p^* \end{cases}$ Элемент ДА выполняет логическую операцию «повторение» |
| Струйное реле НЕ |  | Логическая операция НЕ выполняется, если приемное сопло поместить на профиле после щели для подачи командных давлений |
| Струйный элемент И-ИЛИ |  | В струйном элементе И-ИЛИ профиль имеет две щели для подачи сигналов $p_1$ и $p_2$. Если отрыв струи происходит при одновременной подаче сигналов, реализуется операция И (логическое умножение). Если отрыв струи происходит при подаче хотя бы одного из двух сигналов $p_1$ или $p_2$, то реализуется логическая операция ИЛИ: $p_{вых} = p_1 \vee p_2$ |
| Усилитель непрерывного действия с несмещенным нулем |  | Мощная струя подается с давлением $p_{пит}$. При $p_{вх} \approx 0$ струя не попадает в приемный канал, $p_{вых} = 0$. При увеличении $p_{вх}$ струя из командного сопла отклоняет основную струю так, что часть ее попадает в приемный канал. При этом приближенно $p_{вых} \approx k p_{вх}$ при малых $p_{вх}$ |

| Типы струйных элементов | Устройство | Описание |
|---|---|---|
| Усилитель непрерывного действия со смещением нуля |  | Если ось приемного канала совпадает с осью питающего сопла, то при $p_{вх} = 0$ будет $p_{вых} = p_{max}$. При увеличении $p_{вх}$ питающая струя отклоняется, $p_{вых}$ уменьшается приближенно по линейному закону $p_{вых} = p_{max} - \alpha p_{вх}$ |
| Элемент сравнения |  | Расположение сопл и приемного канала, а также величины $p_1$ и $p_2$ выбирают так, чтобы выходной сигнал приближенно был равен $p_{вых} \approx k\,(p_1 - p_2)$, где $k = \text{const}$ |

где $c_м$ — коэффициент упругости мембраны, зависящий от материала и размеров мембраны.

При расчете движения поршня необходимо учитывать его массу и массу движущихся вместе с ним частей.

В качестве пневмоемкостей (камер) используются полости внутри прибора или специальные элементы. Камера, имеющая одно отверстие, называется глухой. Если в камере два и более отверстий, то она называется проточной. Глухая камера может иметь соединение с другими камерами через мембраны. Вес воздуха $G$ в камере определяется уравнением

$$\frac{dG}{dt} = \sum_{i=1}^{n+m} (\pm 1)\, Q_{\gamma i}, \tag{19.10}$$

где $n$ — число входов; $m$ — число выходов.

Это уравнение выражает закон сохранения массы. Закон сохранения энергии для камеры имеет следующий вид:

$$\frac{dA}{dt} = E_м \frac{dQ}{dt} + \sum_{s=1}^{n} \frac{dA_s}{dt} + \sum_{i=1}^{n+m} (\pm 1)\, Q_{\gamma i} \eta_i, \tag{19.11}$$

где $A$ — общая энергия газа в камере; $E_м$ — механический эквивалент тепла; $dQ/dt$ — изменение тепловой энергии камеры в единицу времени; $n$ — число входов; $m$ — число выходов; $\eta_i$ — энергия единицы веса газа; $A_s$ — работа расширения или сжатия $s$-го поршня.

Принципы действия и устройства элементов пневмоники ясны из табл. 19.3.

## § 20. УНИФИЦИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ПРИБОРОВ

**Агрегатированная унифицированная система** (АУС). Блоки и приборы используются в системах автоматической стабилизации.

Приборы АУС долгое время выпускались серийно в СССР, но в настоящее время сняты с производства в связи с разработкой, производством и освоением новой системы (УСЭППА), более полной, содержащей наряду с аналоговыми и необходимые дискретные элементы. Однако блоки и приборы этой системы еще находятся в промышленной эксплуатации.

Система АУС включает 13 номенклатур, представленных в табл. 20.1.

***Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики*** (УСЭППА). Номенклатура элементов УСЭППА составлена Институтом автоматики и телемеханики АН СССР совместно с Всесоюзным центральным научно-исследовательским институтом комплексной автоматизации (ЦНИИКА). Серийное производство элементов УСЭППА освоено в 1963 г.

Универсальность системы заключается в том, что из ее элементов можно составлять схемы автоматики *любой сложности*, в частности, все типы приборов и блоков, реализуемые с помощью системы АУС. Благодаря организации массового выпуска элементов УСЭППА, тщательной конструктивной и технологической проработке достигнуто более высокое качество элементов и снижение стоимости на 20—30% по сравнению с элементами системы АУС.

Система УСЭППА позволяет полностью реализовать модульный принцип построения приборов автоматики, при котором любой новый прибор создается не как новая конструкция, а собирается из типовых элементов (модулей) системы. В табл. 20.2 приведен перечень модулей УСЭППА.

Все модули имеют простое устройство, легко настраиваются и имеют сравнительно малые габариты. Монтаж модулей в заданную схему ведется на специальных выпускаемых заводом платах, внутри которых проходят все каналы, необходимые для соединения элементов в схему. Каждый модуль имеет специальные коммутационные ножки для крепления к плате и подключения контрольных приборов.

Применение модулей УСЭППА позволило воспользоваться в пневмоавтоматике разработанными ранее методами электроавтоматики.

Кроме непрерывных элементов УСЭППА имеет также модули, выполняющие основные логические операции, что позволяет реализовать дискретные схемы автоматики. Диапазон изменения дискретных сигналов, кгс/см$^2$, составляет

$$p = 0 \div 1{,}4 \pm 0{,}14.$$

Диапазон изменения непрерывных сигналов равен

$$p = 0{,}2 — 1.$$

Нормальное функционирование элементов УСЭППА обеспечивается при изменении температуры в помещении в пределах 5—50° С при относительной влажности до 80%. Подача воздуха в пневматическую систему автоматики должна осуществляться с предварительной очисткой его от пыли, масла и влаги. Давление питания равно

$$p_{\text{пит}} = 1{,}4 \pm 0{,}14.$$

Все приборы выпускаются в двух модификациях:

— с резьбовыми отверстиями, имеющими диаметр проходного сечения не менее 2 мм; в эти отверстия вворачиваются соединительные трубки;

— с гладкими отверстиями, также имеющими диаметр проходного сечения 2 мм; в эти отверстия вставляются соединительные штуцеры без резьбы.

Аналоговые элементы УСЭППА представлены набором из 13 типов модулей: три типа дросселей, два типа делителей, четыре типа повторителей, два задатчика и два элемента сравнения (см. табл. 13.2).

*Таблица 20.1*

**Перечень приборов системы АУС**

| Марка | Наименование | Формула, отражающая принцип действия |
|---|---|---|
| ПС-37А | Регулятор двухпозиционный | $p_{\text{вых}} = \begin{cases} 0, & p_1 - p_2 \leqslant 0, \\ p_{\text{пит}}, & p_1 - p_2 > 0 \end{cases}$ |
| 3РБ-1 | Регулятор пропорциональный | $p_{\text{вых}} = k\,(p_1 - p_2) + p_3;$ $T_u \dfrac{dp_3}{dt} = p_1 - p_2$ |
| 4РБ-32А | Регулятор пропорционально-интегральный | |
| 4РБ-57А | То же | |
| 4РБ-32Б | Регулятор пропорционально-интегральный с местным задатчиком | |
| РБС-1М | Регулятор соотношения | $p_{\text{вых}} = k\left(p_1^* - p_2^*\right) - p_3;$ $T_u \dfrac{dp_3}{dt} = p_1^* - p_2^*;$ $p_1^* = (p_1 - 0{,}2)\,m_1;$ $p_2^* = (p_2 - 0{,}2)\,m_2$ |
| РБС-11М | Регулятор с коррекцией | |
| БП-28А | Прибор предварения прямого действия | $p_{\text{вых}} = p_1 + T_{\text{пр}} \dfrac{dp_1}{dt}$ |
| БС-34А | Прибор простейших алгоритмических операций | $p_{\text{вых}} = p_1 - p_2 + p_3 - p_4$ |
| ПР-14М | Усилитель мощности | $p_{\text{вых}} = k p_{\text{вх}}$ |
| 1РЛ-29А | Прибор для записи и показания одного параметра | — |
| 2РЛ-29Б | Прибор для записи и показания двух параметров | — |
| 3РЛ-29В | Запись регулируемого параметра и его показание, показание задания от ручного или программного задатчика и показание давления на исполнительный механизм | — |

*Таблица 20.2*

**Перечень модулей системы УСЭППА**

| Класс | Наименование прибора | Индекс |
|---|---|---|
| Аналоговые элементы | Дроссель постоянный | П-1127 |
| | » регулируемый | П2Д.2 (ДП) |
| | » регулируемый со шкалой | П2Д.1 (П-1016) |
| | Делитель (вариант I) | П2С.1 (Д/ДП) |
| | » (вариант II) | П2С.2 (П-1087) |
| | Повторитель | П2П.1 (П-1) |
| | » со сдвигом | П2П.2 (П-1С) |
| | Повторитель-усилитель мощности | П2П.7 (ПУ) |
| | Повторитель с мощным выходом | I.2П.3 (П-1100) |
| | Задатчик маломощный | П23Д3 (З) |
| | Задатчик | П23Д4 (ЗУ) |
| | Элемент сравнения (вариант I) | П2ЭС.3 (ЭС-3) |
| | Элемент сравнения (вариант II) | П2ЭС.3 (ЭС-5) |
| Дискретные элементы | Реле универсальное (вариант I) | П1Р.1 (Р-3Н) |
| | Реле универсальное (вариант II) | П1Р.3 (Р-3Ф) |
| | *Клапан (вариант I)* | П3К.1 (К-2) |
| | » (вариант II) | П3К.5 (К или С) |
| | Электропневмопреобразователь | П1ПР.5 (ЭП) |
| | Пневмоэлектропреобразователь | П1ПР.4 (ПЭ) |
| | Пневмотумблер | П1Т.2 (ПТ) |
| | Пневмокнопка | П1КН.3 (ПК) |
| | Пневматическая емкость | ПОЕ.50 (ПЕ) |
| | Фильтр | ПОФ.2 (Ф) |
| | Вентиль | *ПОВ.1 (В)* |

В табл. 20.3 представлены основные сведения и технические характеристики аналоговых модулей УСЭППА.

В табл. 20.4 приведены характеристики дискретных модулей УСЭППА. Кроме функциональных модулей, указанных в табл. 20.4, имеются еще два вспомогательных модуля:

ПОФ-2 (Ф) — фильтр, предназначенный для местной очистки воздуха от воды, масла и пыли. Габарит 46×20×20 мм, масса не более 40 г;

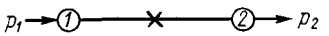
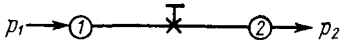
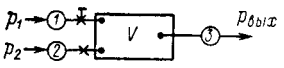
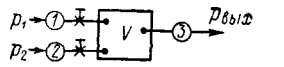
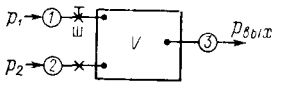
ПОВ-1 (В) — вентиль, предназначенный для ручного замыкания и размыкания мощной пневматической линии.

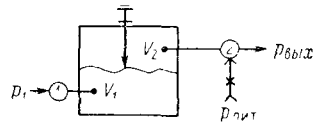
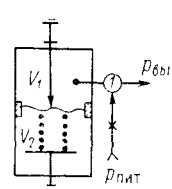
**Система «Старт».** «Старт» — наименование системы приборов пневмоавтоматики, построенных на базе модулей УСЭППА. Приборы «Старт» выпускаются серийно с 1965 г. и включены в государственную систему приборов.

Перечень приборов этой системы содержит более 30 наименований. В табл. 20.5 приведены некоторые характеристики таких приборов и указаны соответствующие по назначению приборы АУС.

*Таблица 20.3*

**Аналоговые модули системы УСЭППА**

| Марка, шифр, тип | Схема, характеристики | Описание |
|---|---|---|
| | Дроссели | |
| П1127 (Д), дроссель нерегулируемый |  Габарит: 35×22×15 мм Масса — не более 25 г Длина канала и его диаметр, мм: $l = 11$, $d = 0{,}18$ $l = 20$, $d = 0{,}32$ | Входное давление $p_1$ через штуцер *1* передается через пневмосопротивление Д — капилляр. Сопротивления ДП и ДПШ являются регулируемыми типа конус—конус. Сопротивление ДПШ имеет шкалу для установки величины сопротивления в процентах или минутах. Пределы регулирования сопротивлений обоих типов одинаковы: $R_c = 1 - \infty$. Перед началом работы необходимая величина сопротивления ДП устанавливается с помощью регулировочного винта |
| П2Д.2 (ДП), дроссель регулируемый |  Габарит: 46×24×24 мм Масса — не более 60 кг Угол конусности $\beta = 2°$ | |
| П2Д.1 (П-1 016) (ДПШ), дроссель регулируемый со шкалой | Габарит: 50×36×24 мм Масса — не более 208 г | |
| | Делители | |
| П2С.1 (Д/ДП) |  Габарит: 46,5×30×30 мм Масса — не более 120 г | Делители осуществляют суммирование входных сигналов или деление входного сигнала на постоянный коэффициент. Входные давления через штуцеры *1*, *2* и дроссели передаются в камеру *V*, имеющую выход через штуцер *3*. Делитель типа Д/ДП имеет одно сопротивление типа Д (нерегулируемое — типа капилляр), а другое регулируемое типа конус—конус. Делитель типа Д/ДПШ имеет нерегулируемое сопротивление и регулируемое со шкалой. Формула, отражающая принцип действия делителей, следующая: $p_{вых} = \frac{\alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$, где $\alpha = \frac{1}{R}$ — проводимость сопротивления |
| П2С.2 (П-1 087) (ДП/ДП) |  Габарит: 46,5×40×40 мм Масса — не более 170 г | |
| Д/ДПШ |  Габарит: 47,5×36×36 мм Масса — не более 255 г | |

| Марка, шифр, тип | Схема, характеристики | Описание |
|---|---|---|
| | Повторители | |
| П2П.1 (П-1) |  Габарит: 21×30×30 мм<br>Масса — не более 34 г<br>Погрешность — не более 25 мм вод. ст. | Повторители осуществляют усиление пневматического сигнала по мощности. Выходное давление равно по величине входному давлению или отличается от него на постоянную величину. Входное давление через штуцер *1* передается в камеру $V_1$, соединенную гибкой мембраной с жестким центром с камерой $V_2$. Центр мембраны соединен штоком с заслонкой, открывающей вход атмосферному давлению в камеру $V_2$ Значение $p_{вых}$ снимается на штуцере *2*, куда подводится через сопротивление типа капилляр давление питания. Повторитель П-1С, кроме того, имеет две пружины, действие которых на мембрану можно регулировать винтами, добиваясь сдвига $p_{вых}$ на требуемую постоянную величину |
| П2П.2 (П-1С) | Схема аналогична П-1. Мембрана соединена двумя пружинами, регулируемыми винтами.<br>Габарит: 50×30×30 мм<br>Масса — не более 70 г<br>Погрешность — не более 20% | |
| П2П.7 (ПУ) | Габарит: 33,5×40×40 мм<br>Масса — не более 140 г<br>Погрешность — не более 50 мм вод. ст. | |
| П2П.3 (П-1100) (ПГ-У) | Габарит: 25×40×40 мм<br>Масса — не более 102 г<br>Погрешность — не более 0,05 кгс/см²; ПУ состоит из семи камер и трех мембран; ПГ-У состоит из четырех камер и двух мембран | |
| | Задатчики | |
| П23.Д.3 (З) |  Габарит: 50×30×30 мм<br>Масса — не более 65 г | Две секции разделены гибкой мембраной с жестким центром. Натяжение мембраны регулируется винтом. Шток мембраны управляет соплом-заслонкой с выходом в атмосферу. Давление питания $p_{пит}$ передается через капилляр на штуцер *1* |

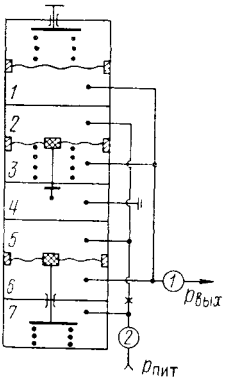
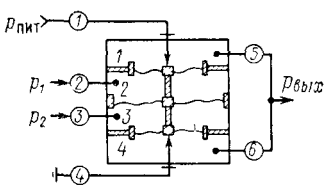
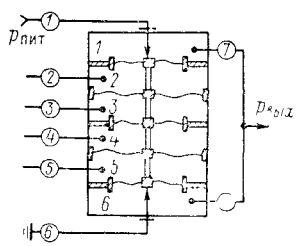
| Марка, шифр, тип | Схема характеристики | Описание |
|---|---|---|
| П23Д.4 (ЗУ) |  Габарит: 102×40×40 мм<br>Масса — не более 207 г | Прибор имеет семь секций и три регулируемых пружинами мембраны. Давление $p_{пит}$ передается через штуцер *2* в камеру *7* и через капилляр — в камеры *5* и *2*. Выходное давление снимается со штуцера, соединяющего камеры *1*, *3* и *6*. Атмосферное давление передается в камеру *4*. При открытом клапане камеры *7* давление $p_{пит}$ передается в камеру *6* и из нее — на выход. Задание других номиналов $p_{вых}$ осуществляется натяжением или сжатием пружины, связанной с мембраной в камере *1* |
| | Элементы сравнения | |
| П2ЭС.1 (ЭС-3) |  Габарит: 74×40×40 мм<br>Масса — не более 300 г<br>Порог срабатывания 0,005 кгс/м² | Блок из трех жестко связанных мембран образует четыре камеры. В камеру *1* через сопло-заслонку передается $p_{пит}$. Сравниваемые давления передаются в камеры *2* и *3*. Давление $p_{атм}$ через сопло-заслонку передается в камеру *4*. Выходное давление передается через дроссели *5* и *6* |
| П2ЭС.3 (ЭС-5) |  Габарит: 80×40×40 мм<br>Масса — не более 330 г<br>Порог срабатывания 0,01 кгс/м² | Блок из пяти жестко связанных мембран образует шесть камер. Давление $p_{пит}$ передается через сопло-заслонку (СЗ) в камеру *1*, а $p_{атм}$ — через СЗ в камеру *6*. Давление $p_{вых}$ снимается из камеры *1* или *6*. Сравниваемые давления передаются через штуцеры *2*, *3*, *4* и *5*. Если алгебраическая сумма сравниваемых сигналов не равна нулю, то $p_{вых} = p_{пит}$, когда сумма положительна, и $p_{вых} = p_{атм}$, когда сумма отрицательна |

*Таблица 20.4*

**Характеристики дискретных модулей системы УСЭППА**

| Марка, шифр | Наименование | Габарит, мм | Масса, г | Оператор функционирования (логическая функция) |
|---|---|---|---|---|
| П1Р.1 (Р-3Н) | Реле универсальное с неопределенным нулем | 35×30×30 | 74 | $y = x$, $y = \neg x$; $y = x_1 \vee x_2$, $y = x_1 \wedge x_2$ (в зависимости от схемы включения) |
| П1Р.3 (Р-3Ф) | Реле универсальное с фиксированным нулем | 39×30×30 | 80 | $y = x$, $y = \neg x$; $y = x_1 \vee x_2$, $y = x_1 \wedge x_2$ (в зависимости от схемы включения) |
| П3К.1 (К-2) | Клапан однотактный | 24,5×30×3 | 52 | $y = x$, $y = \neg x$ (в зависимости от схемы включения) |
| П3К.5 (К *или* С) | Клапан ИЛИ | 17,5×17×20 | 20 | $y = x_1 \vee x_2$ |
| П1ПР.5 (ЭП) | Электропневмопреобразователь | 76×46×40 | 50 | Электрический дискретный сигнал преобразуется в дискретный пневматический сигнал |
| П1ПР.4 (ПЭ) | Пневмоэлектропреобразователь | 30×30×37 | 50 | Пневматический дискретный сигнал преобразуется в дискретный электрический сигнал |
| П1Т.2 (ПТ) | Пневмотумблер | 51×20×20 | 35 | Ручное включение питания, $y = x$ |
| П1КН.3 (ПК) | Пневмокнопка | 41×20×20 | 36 | Ручная кратковременная подача питания |
| **ПОЕ.50 (ПЕ)** | Пневмоемкость | 53,5×40×40 | 140 | Емкость $V = 50 \pm 2$ см$^3$ |

*Таблица 20 5*

**Пневматическая ветвь государственной системы приборов системы «Старт»**

| Индекс прибора | Наименование прибора | Оператор функционирования | Пределы настройки | Масса, кг | Стоимость, руб | Точность, % | Соответствие АУС |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ПР1.5 | Позиционный регулятор | $p_{вых}$ $\begin{cases} 0, & p_1 - p_2 < 0, \\ p_{пит}, & p_1 - p_2 > 0 \end{cases}$ | $\Delta p \geqslant 0{,}01$ кгс/м² | 2,3 | 60 | ±1 | ПС-37А |
| ПР2.5 | Пропорциональный регулятор | $p_{вых} = k(p_1 - p_2) + p_3$ | $0{,}03 \leqslant k \leqslant 20$ | 4,5 | 65 | ±1 | 3РБ-1 |
| ПР3.21 | Пропорционально-интегральный регулятор | $T_и \frac{dp_3}{dt} = p_1 - p_2$ | 3 с $\leqslant T_и \leqslant$ 100 мин | 5,2 | 70 | ±1 | 4РБ-32А 4РБ-57А |
| ПР3.22 | То же, с местным задатчиком | $T_и \frac{dp_3}{dt} = p_1 - p_2$ | 3 с $\leqslant T_и \leqslant$ 100 мин | 5,5 | 75 | ±1 | 4РБ-32Б |
| ПР3.23 | То же, соотношения | $p_{вых} = k(p_1^* - p_2) + p_3$; $T_и \frac{dp_3}{dt} = p_1^* - p_2^*$ | $0{,}03 \leqslant k \leqslant 20$; 3 с $\leqslant T_и \leqslant$ 100 мин | 6,5 | 80 | ±1 | РБС-1М |
| ПР3.24 | То же, соотношения с коррекцией | $p_1^* = (p_1 - 0{,}2) m_1$; $p_2^* = (p_2 - 0{,}2) m_2$ | $0{,}1 \leqslant \frac{m_2}{m_1} \leqslant 10$ | 7,0 | 90 | ±1 | РБС-11М |
| ПР3.25 | Пропорционально-интегродифференциальный регулятор | $p_{вых} = k(p^* - p_2) + p_3$; $T_и \frac{dp_3}{dt} = p_1 - p_2$; $p^* = p_1 + T_{пр} \frac{dp_1}{dt}$ | 3 с $\leqslant T_и \leqslant$ 100 мин; 3с $\leqslant T_{пр} \leqslant$ 10 мин | 6,7 | 150 | ±1 | — |
| ПФ1.1 | Прибор простейших алгебраических операций | $p_{вых} = p_1 - p_2 + p_3 - p_4$ | | 2,7 | 75 | ±1 | БС-34А |
| ПФ1.17 | Прибор для извлечения квадратного корня | $p_{вых} = \sqrt{0{,}8(p_1 - 0{,}2)} + 0{,}2$ | $(3 \cdot 10^4 \leqslant p_1 \leqslant 10^5)$ Н/м² | 4,3 | 90 | ±10 | — |
| ПФ2.1 | Прибор для прямого предварения | $p_{вых} = p_1 + T_{пр} \frac{dp_1}{dt}$ | 3с $\leqslant T_{пр} \leqslant$ 10 мин | 3,3 | 65 | ±1 | БП-28А |
| ПФ3.1 | Прибор для обратного предварения | $p_{вых} = p_1 - T_{пр} \frac{dp_1}{dt}$ | 3с $\leqslant T_{пр} \leqslant$ 10 мин | 2,7 | 60 | ±1 | — |
| ПФ4/5.1 | Прибор для селекции большего или меньшего из двух сигналов | $p_{вых} = \begin{cases} p_1, & p_1 > p_2, \\ p_2, & p_1 < p_2 \end{cases}$ | $(5 \cdot 10^4 \leqslant p_2 \leqslant 10^5)$ Н/м² | 3,5 | 70 | ±1 | — |
| | | $p_{вых} = \begin{cases} p_1, & p_1 < p_2, \\ p_2, & p_1 > p_2 \end{cases}$ | $(2 \cdot 10^4 \leqslant p_2 \leqslant 7 \cdot 10^4)$ Н/м² | | | | |
| ПП1.5 | Усилитель мощности | $p_{вых} = p_{вх}$ | — | 1,6 | 30 | ±0,5 | ПР-14М |
| ПП11.1 | Ограничитель сигналов | $p_{min} \leqslant p_{вых} \leqslant p_{max}$; $p_{min} = (0{,}2—0{,}7)$ кгс/м²; $p_{max} = (0{,}5—1{,}0)$ кгс/м² | — | 3,6 | 70 | ±1 | — |
| АРС-2-О | Самонастраивающийся регулятор | — | | 27,5 | 1120 | ±1 | АРС-1-О |
| АРС-2-ОЧ | Самонастраивающийся шаговый регулятор | — | $(0{,}015 \leqslant \Delta p \leqslant 0{,}06)$ кгс/м² | 27,0 | 1120 | ±1 | — |
| АРС-1-ОН | Самонастраивающийся регулятор с недоходом до максимума | — | | 31,0 | 1245 | ±1 | — |
| УМО-8 | Устройство многоточечное обегающее | — | До 8 каналов | 35,0 | 1838 | ±1 | — |
| УМО-16 | То же | | До 16 каналов | 37,0 | 2500 | ±1 | — |

*Продолжение табл. 20.5*

| Индекс прибора | Наименование прибора | Оператор функционирования | Пределы настройки | Масса, кг | Стоимость, руб. | Точность, % | Соответствие АУС |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| УВХ-8 | Устройство вычислительное к хромотографу | — | До 8 компонент | 38,0 | 1214 | ±1,5 | — |
| ПВ4.2Э | Самопишущий прибор одного параметра | — | — | 7,0 | 90 | ±1 | 1РА-29А |
| ПВ4.3Э | То же двух параметров | — | — | 7,5 | 130 | ±1 | 2РЛ-29Б |
| ПВ10.1Э | То же со станцией управления | — | — | 10 | 225 | ±1 | 3РЛ-29В |
| ДМ-ПК100 | Дифманометр мембранный пневматический компенсационный | — | Номиналы: 630, 1000, 1600, 2500 кгс/м² | 16,5 | 330 | ±1 | — |
| ДМ-ПК100А | Дифманометр мембранный пневматический компенсационный | — | Номиналы: 630, 1000, 1600, 2500 кгс/м² | 17,0 | 485 | ±1 | |
| ДМ-ПК4 | То же | — | Номиналы: 630, 1000, 1600, 2500 кгс/м² | 20,0 | 330 | ±1 | |
| ДМП-1 | Датчик мощности пневматический | $p_{вых} = p_{вх}$ | — | 6,0 | 341 | ±1,5 | |
| ПИК-1 | Интегратор пневматический компенсационный | $G = \int_0^t Q_v\, dt$ | — | 9,0 | 356 | ±1 | |
| ПИК-1СК | То же с сигнализацией | — | — | 16,0 | 500 | ±1 | |
| БФ-2 | Блок функциональный | $p_{вых} = p_1 p_2$ | — | 5,3 | 140 | ±1 | |

Система «Старт» включает в себя большой набор приборов, реализующих различные законы регулирования: позиционный, пропорциональный, пропорционально-интегральный, интегродифференциальный, самонастраивающийся, селекторный.

Для компенсации запаздывания сигналов в трубопроводах имеются приборы предварения, для развязки пневмосхем — усилители мощности различных типов. Ряд приборов выполняет функции измерения, записи, производства математических операций *.

**Система пневматических унифицированных модулей релейной автоматики («ПЭРА»).** Элементы этой системы могут выполнять все основные логические функции, используемые в судовой автоматике.

Элементы изготовлены в виде унифицированных коммуникационных плат (модулей) в двух габаритных вариантах: 44×35×33 мм; 107×35×33 мм. Масса каждого модуля не превышает 150 г.

Нормальная работа модулей возможна при перегрузках не более 2,5 кгс/см², относительной влажности окружающей среды от 30 до 95% и температуре от +5 до +50° С. Давление питания $p_{пит}$ = 1,4 кгс/см². Допустимое отклонение давления питания $|\Delta p_{пит}| = 0{,}14$ кгс/см².

Логический «0» соответствует давлению $p = 0$—0,1 кгс/см², логическая «1» соответствует давлению 1,1—1,4 кгс/см². Время срабатывания элементов — не более $50 \cdot 10^{-6}$ с.

Модули системы выпускаются серийно. В табл. 20.6 приведены перечень и характеристики модулей системы «ПЭРА».

**Струйные логические элементы системы «Волга».** Струйные элементы системы «Волга» выпускаются серийно с 1972 г. Принцип действия элементов основан на взаимодействии струй и эффекте прилипания или отрыва струи от стенки (эффект Коанда)

Частота переключения элементов — до 1 кГц. Диапазон давления питания 0,03—0,05 кгс/см². Наибольшее применение получили дискретные струйные логические элементы типа СТ41, СТ42, СТ43 и СТ44. Непрерывные струйные элементы являются менее точными.

Элемент СТ41 выполняет логическую функцию ИЛИ-НЕ-ИЛИ, имеет два командных входа $x_1$ и $x_2$, два выхода $y_1$ и $y_2$, питающее сопло и два выхода в атмосферу. При отсутствии управляющих сигналов ($x_1 = 0$, $x_2 = 0$) питающая струя прижимается к левой стенке и создает сигнал $y_1 = 1$ (при этом $y_2 = 0$). При наличии хотя бы одного управляющего сигнала струя перебрасывается к правой стенке и создает сигнал $y_2 = 1$ (при этом $y_1 = 0$).

Элемент СТ42 является триггером с раздельными входами, имеет 3 канала управления и 2 выходных канала. Один канал управления служит для установки струи в исходное положение перед запуском. Переброс струи к противоположной стенке производится при подаче командной струи со стороны стенки, к которой прилипает струя. При снятии командного сигнала питающая струя сохраняет свое положение.

Элемент СТ43 выполняет логическую функцию И-НЕ, имеет 2 канала управления ($x_1$, $x_2$), 2 выходных канала ($y_1$, $y_2$), питающий канал и канал выхода в атмосферу; его работа описывается высказываниями: $y_1 = 0$ в том и только в том случае, если $x_1 = 0$, $x_2 = 0$; $y_2 = 1$ в том и только в том случае, если $x_1 = 1$, $x_2 = 1$.

Элемент СТ44 ИЛИ-НЕ-ИЛИ имеет 3 канала управления ($x_1$, $x_2$, $x_3$), 2 выходных канала ($y_1$, $y_2$) и 2 выхода в атмосферу; он реализует высказывания: $y_1 = 0$ в том и только в том случае, если одновременно $x_1 = 0$, $x_2 = 0$, $x_3 = 0$; $y_2 = \neg y_1$.

Размер сечения питающего сопла 0,75×1,2 мм. Допустимое содержание примесей в воздухе: масла — до 12 мг/м³, воды в жидком состоянии — до 160 мг/м³, механических примесей — до 5 мг/м³ (диаметр частиц не более 5 мкм).

**Система модулей струйной техники СМСТ-2.** В 1971 г. была изготовлена опытная партия модулей струйной техники.

---

* Более подробное описание характеристик и схем приборов системы «Старт» содержится в каталоге «Пневматические приборы системы «Старт». М., 1973.

*Таблица 20.6*

**Система модулей релейной автоматики «ПЭРА»**

| Марка | Наименование модуля | Выполняемые логические функции |
|---|---|---|
| П1Л.1 | ИЛИ | $y = x_1 \vee x_2$ |
| П1Л.2 | И | $y = x_1 \vee x_2$ |
| П1Л.3 | НЕ—ЗАПРЕТ | $y = \neg x$, $y = (\neg x_1) \wedge x_2$ |
| П1Л.4 | ДА—И | $y = x$, $y = (\neg x_1) \wedge x_2$ |
| П1М.1 | Триггер со счетным входом | $y_3 = \neg y_1$, $y_4 = \neg y_2$ |
| П1М2.1 | Триггер с раздельными входами | $y_1 = [x_1 \vee (\neg x_2)] \wedge y_1$, $y_2 = (x_1 \vee y_2) \wedge (\neg x_2)$ |
| П1М2.2 | Триггер с раздельными входами | $x_1$ $x_2$ $y_1$ $y_2$<br>1 0 1 0<br>0 1 0 1<br>1 1 1 1 |
| П1М3.1 | Многовходовое ИЛИ | $y = x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee x_4$ |
| П1М3.2 | Многовходовое И | $y = x_1 \wedge x_2 \wedge x_3 \wedge x_4$ |
| П1М3.3 | Равнозначность | $y = [(\neg x_1) \wedge (\neg x_2)] \vee (x_1 \wedge x_2)$ |
| П1М3.4 | Неравнозначность | $y = [(\neg x_1) \vee x_2] \vee [x_1 (\neg x_2)]$ |
| П1М3.5 | Ячейка памяти | $y = (x_1 \wedge x_2) \vee [(\neg x_4) \wedge y]$ |
| П1М3.6 | » » | $y = [(\neg x_1) \wedge x_2] \vee [(\neg x_4) \wedge y]$ |
| П1М4.1 | Дешифратор «сложение» | $y_1 = x_1 \vee x_2$, $y_2 = (\neg x_1) \vee x_2$, $y_3 = x_1 \vee (\neg x_2)$, $y_4 = (\neg x_1) \vee (\neg x_2)$ |
| П1М4.2 | Дешифратор «умножение» | $y_1 = x_1 \wedge x_2$, $y_2 = (\neg x_1) \wedge x_2$, $y_3 = x_1 \wedge (\neg x_2)$, $y_4 = (\neg x_1) \wedge (\neg x_2)$ |
| П1М5 НЕ | Группа НЕ (четыре элемента) | $y_1 = \neg x_1$, $y_2 = \neg x_2$, $y_3 = \neg x_3$, $y_4 = \neg x_4$ |
| П1М5 ДА | Группа ДА (четыре элемента) | $y_1 = x_1$, $y_2 = x_2$, $y_3 = x_3$, $y_4 = x_4$ |
| П1М5 ИЛИ | Группа ИЛИ (четыре элемента) | $y_1 = x_1 \vee x_2$, $y_2 = x_3 \vee x_4$, $y_3 = x_5 \vee x_6$, $y_4 = x_7 \vee x_8$ |

Все модули подразделяются на 5 групп:

1) входные устройства;
2) средства преобразования и дистанционной передачи;
3) модули переработки информации и выработки команд управления;
4) средства преобразования и дистанционной передачи команд управления;
5) выходные устройства.

Большинство модулей относятся к 3-й группе. Модули имеют стандартный ряд размеров $24\times32$ мм, $32\times48$ мм и т. д.

Сигналу «0» соответствуют давления в интервале $-5\div+4$ мм вод. ст.; сигналу «1» — в интервале 40—80 мм вод. ст.

Давление питания $p_{\text{пит}} = (200 \pm 20)$ мм вод. ст.

Система СМСТ-2 работает также и при других номиналах давления питания в диапазоне $p_{\text{пит}} = 0{,}02—1{,}0$ кгс/м$^2$ (изб.).

При этом должно быть

$$\text{«0»} \sim (-0{,}025p_{\text{пит}} \div 0{,}02p_{\text{пит}}); \quad \text{«1»} \sim (0{,}2p_{\text{пит}} - 0{,}4p_{\text{пит}}).$$

**Пневматическая агрегатно-модульная система средств циклической автоматики «Цикл».** В эту систему входят следующие элементы и блоки: струйный усилитель, усилители (4 типа), блок командно-циклический, блок обегания, блок «матрица», блок отсчета времени, блок «дешифратор», блок универсальной логики, блок усилителей функциональных, блок усилителей вспомогательного назначения.

ГЛАВА V

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

## § 21. ДАТЧИКИ

Датчики применяют для преобразования неэлектрического сигнала в электрический (см. § 1). В качестве чувствительных элементов следящих систем, предназначенных для управления положения, датчики служат для измерения рассогласования положений командной и исполнительной осей.

В следящих системах, как правило, используются чувствительные элементы следующих типов: контактные, индукционные, емкостные, фотоэлектрические и др.

**Контактные чувствительные элементы.** В качестве контактных датчиков — чувствительных элементов следящих систем используются потенциометрические устройства, тахогенераторы постоянного тока и др.

Потенциометрические чувствительные элементы служат для преобразования углового или линейного перемещения в электрический сигнал. Чувствительные элементы потенциометрического типа выполняются в виде проволочных сопротивлений с перемещающимся ползунком. Так как каждый виток проволочного сопротивления имеет конечное сопротивление, то выходное напряжение при перемещении ползунка изменяется ступенчато.

Для уменьшения ступенчатости увеличивают число витков обмотки потенциометра или уменьшают диаметр наматываемого провода. Иногда применяют потенциометры в виде реохорда, т. е. натянутой на каркас проволочной струны. В этом случае устраняется ступенчатость, но затрудняется получение нужного сопротивления реохорда.

Выпускаемые промышленностью потенциометрические чувствительные элементы имеют следующие основные параметры: угол поворота $\sim 330°$; момент на оси — порядка 20 гс·м; сопротивление — от сотен ом до десятков килоом; мощность 2 — 5 Вт. В отдельных случаях

применяют многооборотные потенциометры. Потенциометрические чувствительные элементы включаются по мостовой схеме, с диагонали которой снимается управляющий сигнал.

*Тахогенераторы постоянного тока представляют собой* электрические генераторы, обладающие линейной зависимостью между входной величиной—угловой скоростью и выходной величиной—напряжением (см. § 9). Основное назначение тахогенераторов состоит в измерении частоты вращения вала исполнительного механизма.

В следящих системах тахогенераторы используются в качестве дифференцирующих элементов в корректирующих цепях, вырабатывающих производные от углов задавания и отработки, для повышения устойчивости, быстродействия и точности системы.

Основные технические данные тахогенераторов постоянного тока приведены в табл. 21.1. *

*Таблица 21.1*

**Характеристики тахогенераторов**

| Параметр | Тип тахогенератора | | | |
|---|---|---|---|---|
| | СЛ-261 | ТД-101 | ТД-102 | ТД-103 |
| Напряжение возбуждения, В | 110 | 110 | 110 | 110 |
| Мощность возбуждения, Вт | 24 | 7—9 | 7—9 | 7 |
| Ток нагрузки (не более), А | 0,53 | 0,15 | 0,10 | 0,08 |
| Максимальная частота вращения, об/мин | 4600 | 1500 | 1500 | 1500 |
| Момент сопротивления на валу (не более), гс·см | 650 | 120 | 120 | 120 |
| Э. д. с. якоря при максимальной частоте вращения, В | — | 30—35 | 70—80 | 140—165 |
| Момент инерции якоря, гс·см/с$^2$ | — | 0,063 | 0,063 | 0,2 |

Недостатком контактных чувствительных элементов является малая надежность и необходимость тщательного ухода в процессе эксплуатации.

**Индукционные чувствительные элементы и датчики.** К индукционным чувствительным элементам относятся устройства типа вращающихся трансформаторов, контактных и бесконтактных сельсинов, асинхронных тахогенераторов, а также устройства специального назначения (гироскопические и др.).

Индукционные чувствительные элементы получили преимущественное распространение в следящих системах благодаря высокой стабильности параметров и характеристик, возможности создания бесконтактных систем, большой надежности и хорошим эксплуатационным качествам.

*Вращающиеся трансформаторы* применяются в следящих системах в качестве чувствительных элементов, вырабатывающих напряжение, пропорциональное синусу или косинусу угла поворота ротора или самому углу.

---

* *В табл. 21.1—21.8 приведены отдельные типы тахогенераторов, вращающихся* трансформаторов, сельсинов и датчиков угла, имеющих наиболее широкое применение.

Конструкция вращающегося трансформатора позволяет выполнять функциональный комплекс путем использования различных вариантов включения обмоток ротора и статора.

По характеру изменения выходного напряжения в зависимости от угла поворота различают вращающиеся трансформаторы синусно-косинусные ВТ (СКВТ, рис. 21.1) и линейные ВТ (ЛВТ, рис. 21.2).

У СКВТ выходное напряжение одной роторной обмотки пропорционально синусу угла поворота, а другой — косинусу. В качестве ЛВТ, у которого выход-

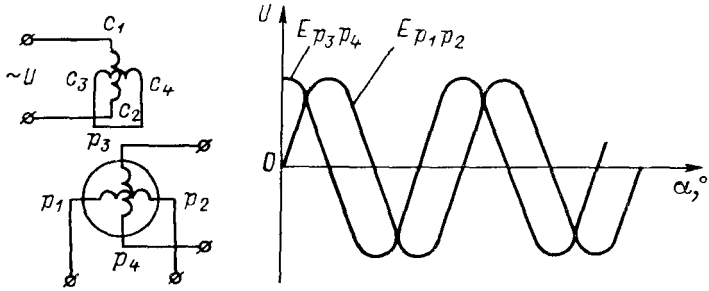



Рис. 21.1. Функциональная схема синусно-косинусного ВТ.

ное напряжение пропорционально углу поворота ротора $\alpha$, может быть использован СКВТ с коэффициентом трансформации $k = 0{,}565$, включенный по схеме, показанной на рис. 21.2. Основные параметры ВТ приведены в табл. 21.2.

Сельсины представляют собой своеобразные трансформаторы, у которых при вращении ротора происходит плавное изменение взаимной индуктивности между обмотками статора и ротора; они широко используются в следящих системах в качестве чувствительных элементов.

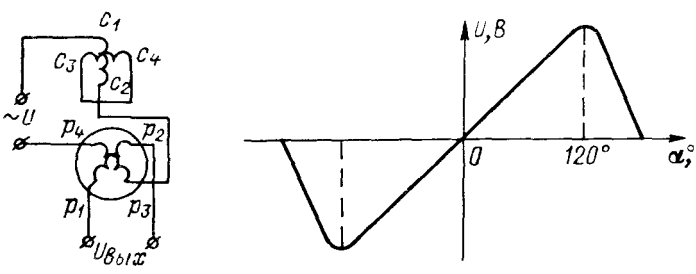



Рис. 21.2. Функциональная схема линейного ВТ.

В зависимости от включения обмоток возбуждения сельсины работают либо в индикаторном режиме, либо в трансформаторном. Для дистанционных систем управления используют сельсинные схемы, работающие в трансформаторном режиме. Такие схемы повышают надежность и точность работы следящей системы, так как позволяют использовать точный и грубый отсчеты. Для сельсинов, работающих в трансформаторном режиме, динамическая ошибка составляет примерно 2° при частоте источника 50 Гц (при переходе на повышенную частоту динамическая ошибка уменьшается). Технические данные контактных и бесконтактных сельсинов некоторых типов приведены в табл. 21.3—21.6.

Иногда в качестве чувствительного элемента на дистанционных следящих системах используют один сельсин, первичная однофазная обмотка которого

*Таблица 21.2*

**Характеристики вращающихся трансформаторов**

| Тип | Обозначение | Назначение | Частота, Гц | Номинальные данные | | | Поворот ротора | Материал магнитопровода |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Напряжение возбуждения, В | Сопротивление холостого хода при частоте 500 Гц, Ом | Коэффициент трансформации | | |
| ВТ-2А ($d = 80$ мм, $l = 145$ мм) | ЛШ3.010.033 | СКВТ | 400—500 | 110 | 1000 | 0,565 | Не ограничен | Сплав 79НМ |
| | ЛШ3.010.035 | СКВТ | 400—500 | 110 | 4100 | 0,960 | То же | Сплав 79НМ |
| | ЛШ3.010.048 | СКВТ | 400—500 | 110 | 4100 | 0,960 | Ограничен | Сплав 79НМ |
| | ЛШ3.010.036 | СКВТ | 400—500 | 110 | 950 | 0,102 | Не ограничен | Сталь Э42 |
| | ЛШ3.010.045 | ЛВТ | 400—500 | 110 | 950 | 0,554 | Ограничен | Сталь Э42 |
| | ЛШ3.010.050 | ЛВТ | 400—500 | 110 | 440 | 0,554 | » | Сталь Э42 |
| | ЛШ3.010.054 | МВТ | 400—500 | 110 | 950 | 0,590 | » | Сталь Э42 |
| | ЛШ3.010.058 | МВТ | 400—500 | 110 | 950 | 0,102 | » | Сталь Э42 |
| ВТ-3А ($d = 50$ мм, $l = 124$ мм) | ЛШ3.010.021 | СКВТ | 400—500 | 110 | 900 | 0,575 | Не ограничен | Сталь Э42 |
| | ЛШ3.010.019 | СКВТ | 400—500 | 60 | 1 000 | 0,575 | То же | Сплав 79НМ |
| | ЛШ3.010.026 | СКВТ | 400—500 | 110 | 900 | 0,575 | Ограничен | Сталь Э42 |
| | ЛШ3.010.029 | МВТ | 400—500 | 60 | 1 000 | 0,575 | » | Сплав 19НП |
| | ЛШ3.010.031 | МВТ | 400—500 | 200 | 15 000 | 0,366 | » | Сталь Э42 |
| 2,5ВТ ($d = 2,5$ мм, $l = 56$ мм) | ЛШ3.010.395 | СКВТ | 400—1000 | 27—40 | 400 | 1,0 | Не ограничен | Сплав 50Н |
| | ЛШ3.010.399 | СКВТ | 400—1000 | 27—40 | 1000 | 1,0 | То же | Сплав 79НМ |
| | ЛШ3.010.410 | МВТ | 400—1000 | 27—40 | 800 | 0,6 | Ограничен | Сплав 79НМ |
| | ЛШ3.010.412 | МВТ | 400—1000 | 27—40 | 1600 | 0,16 | » | Сплав 79НМ |
| 4ВТ ($d = 40$ мм, $l = 56$ мм) | ЛШ3.010.316 | СКВТ | 400—1000 | 27—60 | 200 | 1,0 | Не ограничен | Сплав 50Н |
| | ЛШ3.010.329 | СКВТ | 400—1000 | 40—60 | 1600 | 1,0 | То же | Сплав 79НМ |
| | ЛШ3.010.333 | СКВТ | 400—1000 | 40—60 | 3200 | 1,0 | Ограничен | Сплав 79НМ |
| | ЛШ3.010.341 | МВТ | 400—1000 | 40—60 | 400 | 0,16 | » | Сплав 50Н |
| | ЛШ3.010.344 | МВТ | 400—1000 | 40—60 | 800 | 0,16 | » | Сплав 79НМ |
| | ЛШ3.010.350 | МВТ | 400—1000 | 40—60 | 3200 | 0,16 | » | Сплав 79НМ |

*Продолжение табл. 21.2*

| Тип | Обозначение | Назначение | Частота, Гц | Номинальные данные | | | Поворот ротора | Материал магнитопровода |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Напряжение возбуждения, В | Сопротивление холостого хода при частоте 500 Гц, Ом | Коэффициент трансформации | | |
| ВТ-4С ($d$ = 50 мм, $l$ = 124 мм) | ЛШ3.010.170 | СКВТ | 400—1000 | 110 | 500 | 1,0 | Не ограничен | Сплав 50Н |
| | ЛШ3.010.171 | СКВТ; ЛВТ | 400—1000 | 110 | 500 | 0,57 | То же | Сплав 50Н |
| | ЛШ3.010.172 | СКВТ; ЛВТ | 400—1000 | 110 | 500 | 0,57 | Ограничен | Сплав 50Н |
| | ЛШ3.010.173 | СКВТ | 400—1000 | 110 | 500 | 1,0 | » | Сплав 50Н |
| | ЛШ3.010.174 | МВТ | 400—1000 | 110 | 500 | 1,0 | » | Сплав 50Н |
| | ЛШ3.010.175 | МВТ | 400—1000 | 110 | 500 | 0,16, | » | Сплав 50Н |
| ВТ-5 ($d$ = 50 мм, $l$ = 83 мм) | КФ3.031.049 | СКВТ | 400—500—1000 | 40 | 250 | 0,96 | Не ограничен | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.050 | СКВТ | 400—500—1000 | 60 | 500 | 0,53 | То же | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.051 | СКВТ | 400—500—1000 | 60 | 500 | 0,96 | » | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.052 | СКВТ | 400—500—1000 | 60 | 1000 | 0,53 | » | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.053 | СКВТ | 400—500—1000 | 60 | 1000 | 0,96 | » | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.054 | СКВТ | 400—500—1000 | 60 | 2000 | 0,53 | » | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.055 | СКВТ | 400—500—1000 | 60 | 2000 | 0,96 | » | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.064 | ЛВТ | 400—500—1000 | 40 | 250 | 0,37 | » | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.065 | ЛВТ | 400—500—1000 | 40 | 250 | 0,75 | » | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.066 | ЛВТ | 400—500—1000 | 60 | 500 | 0,37 | » | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.067 | ЛВТ | 400—500—1000 | 60 | 500 | 0,75 | » | Сплав 79НМ |
| | КФ3.031.106 | ЛВТ | 400—500—1000 | 127 | 500 | 0,37 | Ограничен | Сплав 79НМ |

Примечание. У вращающихся трансформаторов типа 2,5ВТ, 4ВТ и ВТ-4С сопротивление холостого хода измерялось при частоте 400 Гц.

*Таблица 21.3*

**Характеристики сельсинов**

| Параметр | Тип сельсинов-датчиков | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | НД-411НА | НД-501 | НД-521 | НД-1414 | НД-1511 | СГСМ-1А | СГ-2 |
| Номинальное напряжение, В | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 | 115 | 36 |
| Номинальная частота, Гц | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 400 | 400 |
| Ток возбуждения, А | 0,6 | 0,7 | 1,3 | 0,41 | 1,0 | 0,185 | 0,115 |
| Потребляемая мощность, Вт | 15,0 | 13,0 | 22,0 | 11,0 | 15,0 | 3,0 | — |
| Максимальное напряжение синхронизации, В | — | 57 | 54 | 54 | 58 | 58 | 41 |
| Разность линейного напряжения синхронизации (не более), В | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Масса, кг | 1,18 | 2,8 | 5,0 | 1,18 | 3,7 | 0,19 | — |

*Таблица 21.4*

**Характеристики сельсинов**

| Параметр | Тип сельсинов-датчиков | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | БД-160А | БД-404А | БД-401Б | БД-501НА | БД-501Б | БД-1404 | БД-1501 |
| Номинальное напряжение, В | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 | 110 |
| Номинальная частота, Гц | 400—500 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Ток возбуждения, А | 0,3—0,26 | 0,4 | 0,4 | 1,3 | 1,2 | 0,44 | 1,3 |
| Потребляемая мощность, Вт | 10—8,5 | 16 | 16 | 26 | 27 | 16,5 | 28 |
| Максимальное напряжение синхронизации, В | 100 | 52 | 152 | — | 152 | 48 | 55 |
| Разность линейного напряжения синхронизации (не более), В | — | 0,5 | 1,5 | 0,5 | 1,5 | 0,5 | — |
| Масса, кг | 0,42 | 1,25 | 1,25 | 3,85 | 3,75 | 1,25 | 3,85 |

*Таблица 21.5*

**Характеристики сельсинов**

| Параметр | Тип сельсинов-приемников | | | |
|---|---|---|---|---|
| | СМСМ-1А | НС-404 | НС-501 | СТ 2 |
| Номинальное напряжение, В | 115 | 100 | 110 | 40 |
| Номинальная частота, Гц | 400 | 50 | 50 | 400 |
| Максимальное вторичное напряжение, В | 58 | 50 | 55 | 31 |
| Ток возбуждения, А | 0,08 | 0,28 | 0,75 | 0,935 |
| Потребляемая мощность, Вт | 1,5 | 8,0 | 15,0 | — |
| Масса, кг | 0,14 | 0,8 | 2,9 | 0,145 |

*Таблица 21.6*

**Характеристики сельсинов**

| Параметр | Тип сельсинов-приемников | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | БС-151А | БС-155А | БС-405Б | БС 1404 | БС-1405 |
| Номинальное напряжение, В | 110 | 100 | 110 | 110 | 110 |
| Номинальная частота, Гц | 400 | 400—500 | 50 | 50 | 50 |
| Ток возбуждения, А | 0,3 | 0,15—0,12 | 0,09 | 0,44 | 0,09 |
| Потребляемая мощность, Вт | 7,5 | 4—3 | 2,5 | 16,5 | 2,5 |
| Максимальное напряжение синхронизации, В | 100 | 95 | 78 | 48 | 34 |
| Разность линейного напряжения синхронизации (не более), В | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,5 | — |
| Масса, кг | 0,47 | 0,33 | 1,25 | 1,3 | 1,25 |

подключается к источнику питания, а сигнал на усилитель поступает с двух зажимов трехфазной обмотки. В этом случае входной сигнал задается поворотом ротора, а отработка угла осуществляется поворотом статора. Если система должна отрабатывать угол, равный сумме или разности двух задаваемых углов, то в качестве одного из чувствительных элементов применяют дифференциальный сельсин.

Поворотный трансформатор состоит из Ш-образного сердечника, на среднем стержне которого имеется первичная обмотка, питаемая от сети. На крайних стержнях расположены две одинаковые вторичные обмотки, включенные встречно. Сигнал с вторичных обмоток поступает на усилитель следящей системы. При симметричном положении якоря относительно крайних стержней выходной сигнал трансформатора равен нулю. При отклонении якоря в какую-либо сторону на выходе трансформатора появляется сигнал, пропорциональный углу поворота якоря, но отличающийся по фазе на 180° в зависимости от направления поворота якоря. Крутизна напряжения сигнала поворотного трансформатора достигает 1 В/град.

Достоинствами поворотных трансформаторов являются надежность, простота конструкции и отсутствие трущихся контактов

Иногда, если надо управлять объектом, положение которого описывается двумя координатами, используют двухкоординатный трансформатор.

Асинхронный тахогенератор состоит из статора, в пазах которого расположена обмотка возбуждения, и тонкостенного полого ротора. В сердечнике, размещенном внутри ротора, укладывают рабочую обмотку, ось которой перпендикулярна оси обмотки возбуждения. Линейность характеристики тахогенератора выдерживается в пределах до 4000 об/мин с точностью 0,4—0,3%.

Выходное напряжение тахогенератора с изменением температуры изменяется по отношению к номинальному. Это вызывает дополнительную погрешность Для ее уменьшения применяют различные схемы температурной компенсации. Технические параметры ряда асинхронных тахогенераторов приведены в табл. 21.7

*Таблица 21.7*

**Характеристики асинхронных тахогенераторов**

| Параметр | Тип тахогенератора | | | |
|---|---|---|---|---|
| | АТ 161 | АТ-261 | АТ 231 | ТГ-4 |
| Напряжение возбуждения, В | 110 | 110 | 110 | 110 |
| Частота сети, Гц | 400 | 400 | 400—500 | 400 |
| Номинальная частота вращения, об/мин | 4000 | 4000 | 4000 | 6000 |
| Ток в обмотке возбуждения, А | 0,2 | 0,22 | 0,35 | 0,3 |
| Мощность возбуждения, Вт | 8,0 | 11,0 | 14,0 | 12,0 |
| Удельное напряжение, $\frac{\text{мВ}}{\text{об/мин}}$ | 4±0,4 | 5,3±0,5 | 5—6,5 | 10 |
| Величина остаточного напряжения (не более), мВ | 80 | 100 | 25; 50 | — |
| Приведенная амплитудная ошибка при измерении частоты вращения (не более), % | 0,15 | 0,15 | 0,15 | — |
| Относительная амплитудная ошибка при измерении температуры (не более), %/°С | 0,008 5 | 0,008 5 | 0,008 | — |
| Момент инерции ротора, гс·см·с$^2$ | 0,15 | 0,235 | 0,235 | — |
| Масса, кг | 0,9 | 1,8 | 2,1 | 1,5 |

Если от чувствительного элемента требуется малый собственный момент, то применяют такие чувствительные элементы, как фотоэлектрические, емкостного типа, с радиоактивными изотопами и индукционные специальной конструкции.

В электромеханических цифровых следящих системах непрерывно изменяющимися сигналами являются либо угол поворота выходной оси, либо угол поворота чувствительных элементов, с которых снимается информация. Рассмотрим преобразователи угла поворота в цифровой код.

Все многообразие преобразователей угла поворота в цифровой код можно подразделить на две большие группы. Первая группа охватывает элементы, которые непосредственно преобразуют угол поворота в тот или иной код, без промежуточных преобразований угла поворота в какую-либо другую непрерывную электрическую величину. Вторая группа включает преобразователи, в которых угол поворота вначале преобразуется в какую-либо промежуточную непрерывную электрическую величину (обычно в напряжение постоянного или переменного тока либо в фазу напряжения переменного тока), а затем эта промежуточная электрическая величина преобразуется в код.

Преобразователи, непосредственно преобразующие угол поворота в цифровой код, в свою очередь, можно подразделить на два типа: преобразователи, работающие по принципу счета (импульсные преобразователи) и преобразователи, работающие по принципу непосредственного представления (кодовые преобразователи).

У преобразователей, работающих по принципу счета, каждому приращению угла поворота ставится в соответствие единица цифрового кода. Затем эти единицы подсчитываются и тем самым создается цифровой эквивалент преобразуемого угла поворота. У преобразователей, работающих по принципу непосредственного представления, каждый квантованный уровень преобразуемого угла поворота кодируется независимо от других цифровых последовательностей в виде определенной кодовой комбинации.

Простейшим примером аналого-цифрового преобразователя с непосредственным преобразованием, работающего по принципу счета, является датчик, пока-

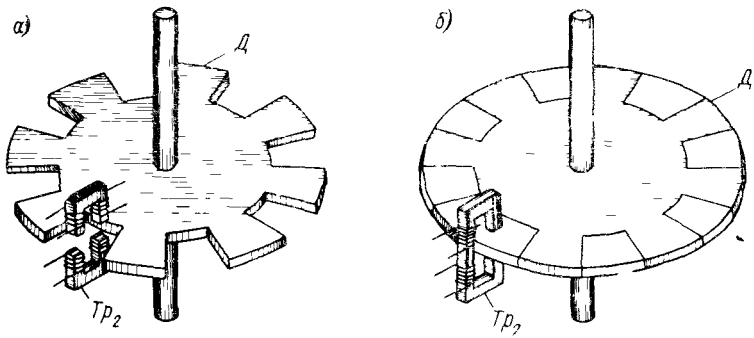



Рис. 21.3. Функциональные схемы аналого-цифрового преобразователя с трансформаторным съемом сигналов.

занный на рис. 21.3, *а*. Основной частью такого датчика является диск *Д* из немагнитного материала с прорезями и трансформатор $Тр_2$, состоящий из двух частей с обмотками. Одна из этих обмоток возбуждается переменным напряжением. Если между двумя частями магнитопровода трансформатора находится прорезь диска, то магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, не экранируется материалом диска, и на выходной обмотке будет индуктироваться некоторая э. д. с. (соответствующая коду «1»). В то время, когда диск, повернувшись, перекроет части магнитопровода трансформатора друг от друга, магнитный поток ослабится за счет экранирующего эффекта от поля вихревых токов в диске, и на выходной обмотке будет наводиться минимальная э. д. с. (соответствующая коду «0»).

Датчики с трансформаторным съемом сигналов иногда выполняют по другой конструктивной схеме (рис. 21.3, *б*). Она отличается от предыдущей тем, что прорези в диске заполнены ферромагнитным материалом. Естественно, что наибольшее напряжение в этом случае будет в тот момент, когда прорезь находится между частями магнитопровода трансформатора. Датчики с трансформаторным съемом сигналов имеют невысокую разрешающую способность (7—8 двоичных разрядов).

Преобразователи, работающие по принципу считывания (кодовые датчики), можно подразделить на два вида в зависимости от способа реализации кодирования квантованных уровней: шкальные и матричные. В первом случае преобразование осуществляется с помощью кодовых шкал, или кодовых масок. Такая шкала каждому квантованному уровню угла поворота ставит в соответствие вполне определенную кодовую последовательность. Подобные преобразователи состоят из задающего элемента кодовой шкалы (выполняемой в виде диска или

барабана) и воспринимающих (считывающих) элементов, в качестве которых могут быть использованы щетки, фотодиоды, индукционные элементы и др.

Для построения двоичной кодовой шкалы все ее поле разбивается на концентрические дорожки и на секторы. В случае использования контактных воспринимающих элементов (щеток) коду нуля должны соответствовать непроводящие участки кодовой шкалы, а коду единицы — токопроводящие участки. При перемещении шкалы воспринимающие элементы, располагающиеся по радиусу, фиксируют появляющиеся коды нулей и единиц и выдают их на выход. В этом случае каждому положению шкалы на выходе ставится в соответствие вполне определенное двоичное число.

При считывании кодов, нанесенных на шкалы кодового датчика, может возникнуть ошибка из-за неточного расположения воспринимающих элементов, причем в худшем случае эта ошибка может достигать значения, равного максимальному значению преобразуемой величины.

У кодовых датчиков второго вида, так называемых матричных преобразователей, не возникает большой ошибки при считывании, так как в них кодирование квантованных уровней производится с помощью специальных матриц. В этом случае вся окружность датчика разбита на участки, число которых определяет точность преобразования. Каждый из участков имеет выходной провод, соединяющийся с кодирующей матрицей, которая представляет собой какой-либо шифратор. При нахождении воспринимающего элемента на любом участке опрашивающий сигнал проходит на одну из входных шин шифратора и преобразуется в строго определенное двоичное число на его выходных шинах.

Датчики с фотоэлектрическим съемом кодовых сигналов состоят из прозрачного диска, на поверхности которого наносится кодовый рисунок в виде непрозрачного слоя, источника света (с одной стороны диска) и фотоприемников светового потока (с другой стороны диска). Когда между источником света и фотоприемником расположена прозрачная часть диска, на выходе фотоприемника формируется сигнал, соответствующий коду «1»; если же между лампой и съемным элементом находится непрозрачная часть, то с фотоприемника снимается сигнал, соответствующий коду «0». Для получения очень узкого пучка света применяются соответствующая оптика и диафрагмы. Элементами съема в фотодатчиках могут быть фотодиоды, фототриоды и фотосопротивления.

Кодовые датчики с фотооптическим съемом сигналов могут иметь 12—14 разрядов. Однако подобные датчики представляют собой весьма сложные устройства, требующие чрезвычайно точной настройки и регулировки. Ввиду наличия источников света их срок службы невелик и надежность работы мала.

**Датчик с емкостным съемом сигналов.** Основной частью такого датчика является диск из изоляционного материала, на котором нанесен медью кодовый рисунок. Металлические части одного и того же разряда соединяются между собой и выводятся одним (выходным) проводом. Против каждой разрядной дорожки имеются металлические пластины. Если на металлическую пластину подать импульс (в момент, когда она стоит напротив металлической части диска), то на выходном проводе также появится импульс, что соответствует коду «1».

Если металлическая пластина находится над неметаллической частью диска, то импульс на выходе отсутствует — это соответствует коду «0». Для обеспечения более резкого перехода от кода «0» к коду «1» участки диска между металлическими частями также металлизируют, изолируют от металлических частей кодового рисунка и заземляют. Емкостной датчик довольно прост по конструкции, но имеет низкую разрешающую способность, очень малое отношение сигнал/шум, а также подвержен сильному влиянию температуры и влажности.

У *преобразователей угла поворота в цифровой код с промежуточным преобразованием угла поворота в напряжение* первоначально необходимо выработать напряжение постоянного или переменного тока, пропорциональное углу поворота входного вала. Для этого можно использовать различные измерительные элементы непрерывных систем автоматического регулирования и управления, в частности, потенциометрические и индукционные датчики, часть из которых (СКВТ и ЛВТ) описана выше.

**Индукционные датчики угла.** Индукционные датчики угла (ДУ) представляют собой специальные электрические микромашины, предназначенные для

преобразования угла поворота в связанный с ним функционально электрический сигнал.

Все ДУ подразделяются на амплитудные и фазовые.

Амплитудные датчики вырабатывают напряжение, неизменное по фазе, но меняющееся по величине в зависимости от угла поворота. Фазовые датчики вырабатывают неизменное по величине напряжение, фаза которого меняется в зависимости от угла поворота. По роду выходной функции различают амплитудные датчики *синусно-косинусные* и *линейные*. По конструкции — *кольцевые* ДУ (безопорные) и *корпусные*. По характеру токоподводов датчики угла подразделяются на *контактные*, с *гибкими токоподводами* и *бесконтактные*. По рабочему углу — на ДУ с неограниченным и ДУ с ограниченным поворотом.

Кольцевые датчики представляют собой пакеты статора и ротора, набранные из изолированных листов электротехнической стали с обмотками, расположенными в пазах пакетов. Эти датчики выполняются как детали гироскопических приборов и только после установки в аппаратуру представляют собой завершенную конструкцию.

Магнитопроводы окаймлены латунными или стальными, а иногда титановыми обоймами, являющимися посадочными местами датчика. Для обеспечения меньшей чувствительности к эксцентриситету воздушный зазор между пакетами статора и ротора имеет величину 0,3—0,5 мм. Пакеты скошены в различных направлениях.

Корпусные датчики представляют собой корпус той или иной конструкции, внутрь которого вмонтирован кольцевой датчик.

Напряжение к роторной обмотке подводится с помощью токопроводящих колец и прижатых к ним металлических щеток. Другой вариант конструкции предполагает наличие гибких токоподводов (*нитей или пружин*). Естественно, что в этом случае датчики имеют ограниченную зону рабочих углов.

Корпуса датчиков изготовляют из дюралюминия, титана, бериллия. Принцип работы кольцевых и корпусных ДУ такой же, как и у вращающихся трансформаторов (ВТ) и линейных вращающихся трансформаторов (ЛВТ).

Следует обратить внимание на важное требование к кольцевым датчикам. Они используются на чувствительных осях и поэтому необходимо, чтобы момент воздействия между статором и ротором был не выше требуемой, обычно очень малой, величины. Параметры некоторых ДУ приведены в табл. 21.8.

Описанные датчики принципиально могут преобразовать угол поворота в напряжение переменного тока с достаточно большой точностью. Однако тем самым решается лишь первая половина задачи преобразования угла поворота в цифровой код, так как в дальнейшем необходимо преобразовать полученное напряжение переменного тока в код. Для этой цели пользуются различными аналого-цифровыми преобразователями электрических сигналов, в частности, напряжения.

В настоящее время известно достаточно большое число преобразователей напряжения постоянного тока в двоичный код различных типов: время-импульсного, с эталонными уровнями, с обратной связью и др. Подобные устройства могут преобразовывать напряжение в код с достаточно высокой точностью, однако при этом схемные решения становятся весьма громоздкими.

При наличии напряжения переменного тока трудности, связанные с созданием высокоточных преобразователей, еще больше возрастают. Поэтому целесообразно использование аналого-цифровых преобразователей угол-код с промежуточным преобразованием угла поворота в фазу.

***Фазовый двухотсчетный датчик с вращающимся полем.*** *Этот датчик* представляет собой индукционный фазовращатель, в котором на одних и тех же ферромагнитных магнитопроводах выполнены магниторазвязанные комбинации обмоток — однопарнополюсные и многопарнополюсные. Таким образом, датчик является устройством, преобразующим информацию, поступающую на него в виде угла поворота оси, в пропорционально изменяющиеся фазы двух неизменных по величине напряжений.

Датчик состоит из пакета магнитопровода статора с обмотками, двух пакетов магнитопроводов ротора с обмотками и вала. Пакет статора заключен в корпус. Принцип работы датчика заключается в следующем. Первичные (роторные) обмотки подключаются к источнику напряжения, который вырабатывает два

*Таблица 21.8*

**Характеристики датчиков угла**

| Обозначение | Напряжение питания, В | Частота, Гц | Ток возбуждения (не более), мА | Рабочий угол, ° | Остаточное напряжение (не более), мВ | Крутизна нарастания выходного напряжения, мВ/угл. мин | Нелинейность характеристики выходного напряжения (не более), % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ЛДУ-49 | 40±2 | 1 000±50 | 40 | ±60 | 140 | 5,6 | ±3 |
| ДУ-45А | 40±2 | 500±25;<br>1 000±50 | 140 | ±360 | 200 | 16,8<br>19,5 | — |
| ДУ-46А | 40±2 | 1 000±50 | 100 | ±12 | 40 | 15,7 | — |
| ЛДУ-60-3М | 40±2 | 1 000±50 | 90 | ±90 | 50 | 14,7 | ±2 |
| БДУ-38-1 | 40±2 | 1 000±50 | 280 | ±5 | 250 | 130 | 5 |
| БДУ-38-2 | 40±2 | 1 000±50 | 170 | ±5 | 100 | 135 | 5 |
| РДУ-1 | 40±2 | 24 000 | 68 | ±7 | 1 | 8,3 | 3 |
| РДУ-2 | 40±2 | 24 000 | 75 | ±4,5 | 5 | 65 | 5 |

одинаковых по величине амплитуды и сдвинутых друг относительно друга по фазе на 90 градусов напряжения. Эти напряжения вызывают в двухфазной двухполюсной обмотке ротора систему токов и э. д. с., создающую двухполюсное вращающееся магнитное поле. Пересекая витки однофазной двухполюсной обмотки статора, это поле наводит в последней э. д. с., амплитуда которой постоянна, а фаза линейно связана с углом поворота ротора относительно статора. Роторная двухфазная многополюсная обмотка, фазы которой разнесены на два магнито провода, питается той же системой напряжений, что и двухполюсная. Таким образом, помимо двухполюсного создается еще и многополюсное вращающееся поле, которое наводит э. д. с. в многополюсной однофазной обмотке статора. Эта э. д. с. неизменна по амплитуде, а по фазе линейно связана с углом поворота ротора относительно статора. Естественно, что изменение фазы здесь «ускорено» в число раз, равное числу пар полюсов многополюсной обмотки.

## § 22. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ, НАПРЯЖЕНИЯ, ТОКА

Сигнал, снимаемый с чувствительного элемента системы автоматического управления, как правило, имеет малую мощность и не может быть непосредственно подан на исполнительный орган. В связи с этим в состав системы управления обычно входит усилительное устройство, предназначенное для усиления и преобразования сигнала чувствительного элемента до величины и мощности, необходимых для управления исполнительным органом.

Структурная схема усилительного устройства представлена на рис. 22.1. Входное устройство используется в том случае, когда невозможно или нецелесообразно подать сигнал чувствительного элемента на входную цепь предварительного усилителя. Например, в качестве входного устройства электрического усилительного устройства может быть применен трансформатор для согласования выходного сопротивления чувствительного элемента и входного сопротивления предварительного усилителя, симметрирующий трансформатор — для симметрирования входа и т. д. С целью усиления сигнала до величины, достаточной для подачи на вход мощного усилителя, применяется предварительный усилитель. Для

отдачи в исполнительный орган сигнала заданной величины мощности предназначен мощный усилитель. Предварительный и мощный усилители могут иметь несколько каскадов усиления. Выходное устройство служит для преобразования и передачи сигнала от последнего каскада мощного усилителя в исполнительный орган в случае, когда невозможно непосредственное использование сигнала мощного усилителя.

В судовых системах автоматического управления широкое распространение получили электрические усилители, а среди них — электронные, магнитные и электромашинные усилители.

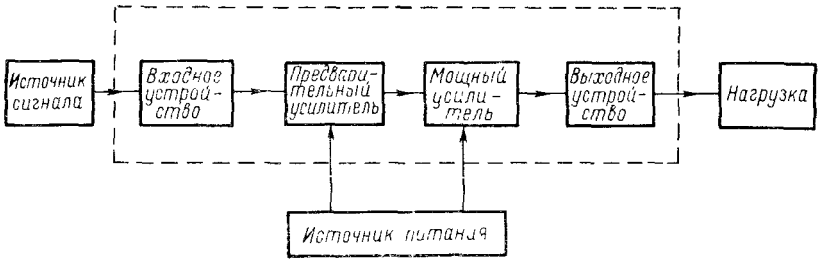



Рис. 22.1. Структурная схема усилительного устройства.

Как элементы систем автоматического управления усилители характеризуются коэффициентами усиления по мощности, току и напряжению, которые определяются соответственно по формулам

$$k_P = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}; \quad k_I = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}; \quad k_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}, \tag{22.1}$$

где $P_{\text{вх}}$, $I_{\text{вх}}$, $U_{\text{вх}}$ — входные мощность, ток и напряжение; $P_{\text{вых}}$, $I_{\text{вых}}$, $U_{\text{вых}}$ — выходные мощность, ток и напряжение.

Нелинейные искажения сигнала в усилителе являются следствием нелинейностей характеристик усилительных элементов, характеристик намагничивания магнитных материалов и определяются по статической характеристике:

$$P_{\text{вых}} = f_1(P_{\text{вх}}); \quad I_{\text{вых}} = f_2(I_{\text{вх}}); \quad U_{\text{вых}} = f_3(U_{\text{вх}}), \tag{22.2}$$

где $f_1(P_{\text{вх}})$, $f_2(I_{\text{вх}})$, $f_3(U_{\text{вх}})$ — некоторые нелинейные функции соответственно аргументов $P_{\text{вх}}$, $I_{\text{вх}}$, $U_{\text{вх}}$.

Для оценки динамических свойств усилителей используются частотные характеристики, снятые экспериментально, или передаточные функции.

Наряду с этими показателями усилители, как и другие элементы систем автоматического управления, характеризуются коэффициентом полезного действия, массой, надежностью, удобством обслуживания при эксплуатации и т. д.

**Электронные усилители.** Под этим названием объединяют усилители, у которых в качестве усилительного элемента используются электронные лампы или транзисторы.

По роду тока усиливаемых сигналов различают усилители постоянного и переменного тока.

*Усилители постоянного тока* (усилители медленно изменяющихся напряжений и токов) усиливают электрические колебания любой частоты, т. е. усиливают как переменные составляющие сигнала, так и его постоянную составляющую. Коэффициент усиления этих усилителей отличен от нуля при частоте сигнала, равной нулю.

Обычно схемы усилителей постоянного тока выполняются на электронных лампах в связи с нестабильностью характеристик транзисторов.

По принципу действия усилители постоянного тока подразделяются на *усилители постоянного тока прямого усиления* и *усилители постоянного тока* с преобразованием частоты сигнала (усилители постоянного тока с преобразованием).

Существенным недостатком усилителей постоянного тока прямого усиления является медленное самопроизвольное изменение выходного напряжения при нулевом входном напряжении (дрейф нуля). Дрейф нуля обусловлен в основном нагревом усилительных элементов, старением их деталей, колебаниями напряжения источников питания усилителя, эффектом мерцания имитирующих электродов усилительных элементов. Уменьшение дрейфа нуля на практике осуществляется главным образом двумя способами: использованием мостовых и компенсационных схем и стабилизированием напряжения источников питания усилителя.

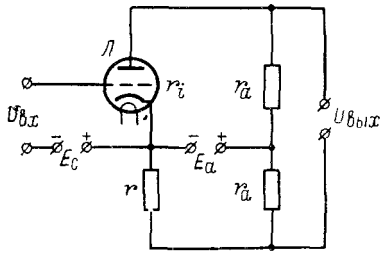



Рис. 22.2. Принципиальная схема мостового усилителя постоянного тока (на рис. 22.2—22.7 приняты обозначения:

*Л* — электронная лампа, *Т* — транзистор, *Тр* — трансформатор, *U* — напряжение, *E* — э. д. с., *R*, *r* — сопротивления, *I*, *i* — сила тока, Ω, ω — частота, *L* — индуктивность, *C* — емкость, Φ — магнитный поток.

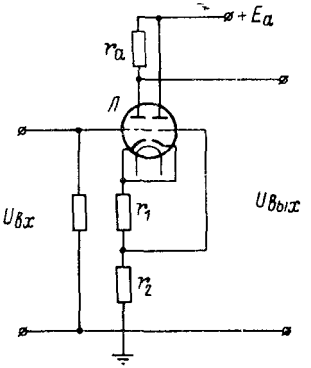



Рис. 22.3 Принципиальная схема усилителя постоянного тока с катодной компенсацией.

На рис. 22.2 изображена принципиальная схема усилителя постоянного тока, выходная цепь которого выполнена по мостовой схеме. Выходное напряжение лампы *Л* отсутствует в этой схеме в том случае, если отсутствует входное напряжение и сопротивление *r* выбрано из условия баланса моста, образованного сопротивлениями $r_i$, $r$, $r_a$.

Принципиальная схема усилителя постоянного тока с катодной компенсацией представлена на рис. 22.3. Правый триод, примененный в схеме, позволяет компенсировать дрейф нуля, возникающий от изменения напряжения накала. Стабилизирование источников питания усилителя с целью уменьшения дрейфа нуля осуществляется с помощью различных стабилизаторов напряжения: электронных, магнитных и т. д.

При необходимости получения больших значений коэффициента усиления отдельные однотактные каскады соединяют между собой, составляя *усилители постоянного тока в виде многокаскадного усилительного устройства*. Соединение каскадов выполняют в большинстве случаев с использованием междукаскадных делителей напряжения, потенциометрических связей, а также путем введения специальных источников питания, напряжения которых компенсируют положительные потенциалы, снимаемые с анодов предыдущих каскадов. Принципиальная схема усилителя постоянного тока с потенциометрической связью приведена на рис. 22.4.

Для улучшения характеристик усилителя постоянного тока в схему обычно вводится глубокая отрицательная обратная связь. Это позволяет осуществить с помощью усилителя постоянного тока дифференцирование и интегрирование входного напряжения. Такой усилитель постоянного тока называют операционным (см. § 23).

Усилители постоянного тока прямого усиления применяются в системах автоматического управления для усиления сигналов и в качестве операционных усилителей — в вычислительной технике. Коэффициент усиления усилителей находится в пределах от нескольких единиц до нескольких миллионов, минимальное значение дрейфа нуля, приведенного к входу, — порядка десятков микровольт в час по напряжению.

Для усиления сигналов с напряжением ниже сотен микровольт в системах автоматического управления используют усилители постоянного тока с преобразованием, так как колебания напряжения дрейфа, вызываемые, например эффектом мерцания, при применении усилителей прямого усиления могут быть весьма значительны. Усилители с преобразованием содержат обычно генератор несущей частоты, балансные модулятор и демодулятор, фильтр, усилитель переменного тока.

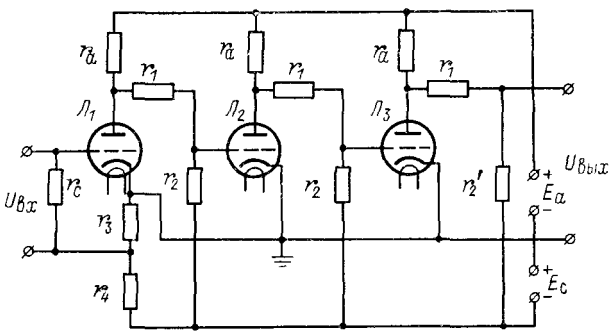



Рис. 22.4. Принципиальная схема усилителя постоянного тока с потенциометрической связью.

К преимуществам усилителя постоянного тока с преобразованием следует отнести простоту введения обратной связи, низкий уровень дрейфа, отсутствие необходимости стабилизации источников питания; к недостаткам — сложность устройства, подверженность воздействию электрических и магнитных помех.

Дрейф нуля, приведенный к входной цепи устройства, в этих усилителях можно получить порядка сотых долей микровольта в минуту.

*Усилители переменного тока* усиливают только переменную составляющую входного сигнала в определенном диапазоне частот. В непрерывных системах автоматического управления находят широкое применение усилители низкой частоты (диапазон частот от нескольких герц до 20 кГц). В импульсных системах используются широкополосные усилители (диапазон частот: низкая рабочая частота порядка 1 кГц, высшая рабочая частота порядка 1 МГц).

В зависимости от назначения усилители низкой частоты подразделяются на усилители напряжения и усилители мощности; по характеру нагрузки — на усилители на сопротивлениях, на дросселях и на трансформаторах.

Усилители напряжения используются в предварительных каскадах, усилители мощности — в оконечных каскадах усиления.

В усилителях напряжения для достижения наибольшего коэффициента усиления применяются лампы и транзисторы с большим статическим коэффициентом усиления.

Усилители напряжения в системах автоматического управления выполняются в основном на сопротивлениях, причем для усилителей на электронных лампах характерна схема с общим катодом (рис. 22.5), для усилителей на транзисторах *Т* — схема с общим эмиттером (рис. 22.6). Следует отметить, что усилитель напряжения на трансформаторах используется иногда в схемах на транзисторах как предварительный каскад, но он имеет значительно бо́льшие массу, габарит

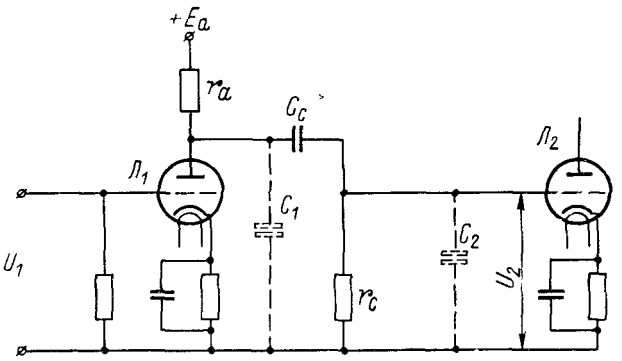



Рис. 22.5. Принципиальная схема лампового усилителя на сопротивлениях.

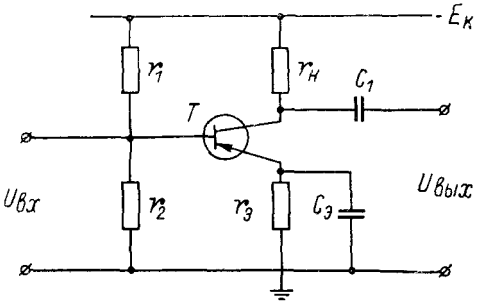



Рис. 22.6. Принципиальная схема транзисторного усилителя на сопротивлениях.

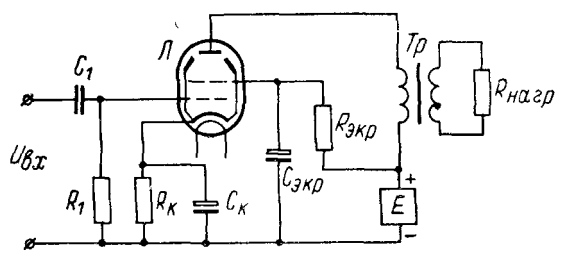



Рис. 22.7. Оконечный ламповый каскад на трансформаторе.

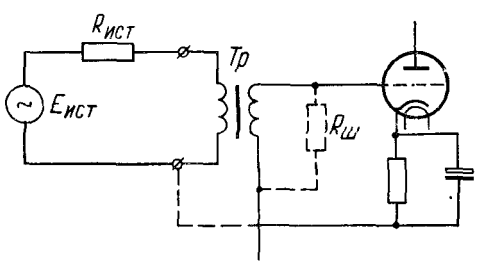



Рис. 22.8. Входное устройство лампового усилителя на трансформаторе.

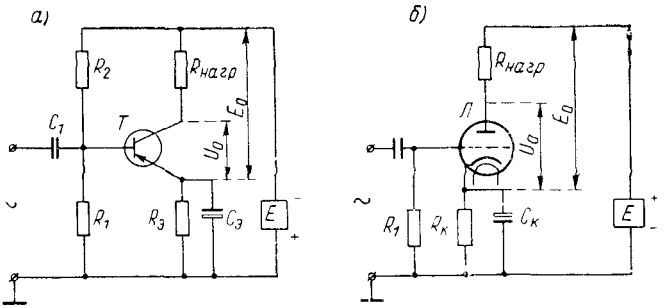



Рис. 22.9. Каскад мощного усиления с непосредственным включением нагрузки в выходную цепь: *а* — транзисторный; *б* — ламповый.

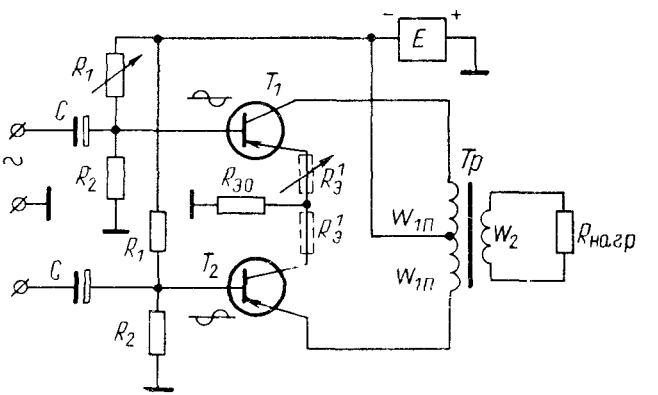



Рис. 22.10. Двухтактный трансформаторный каскад мощного усиления для работы в режиме А.

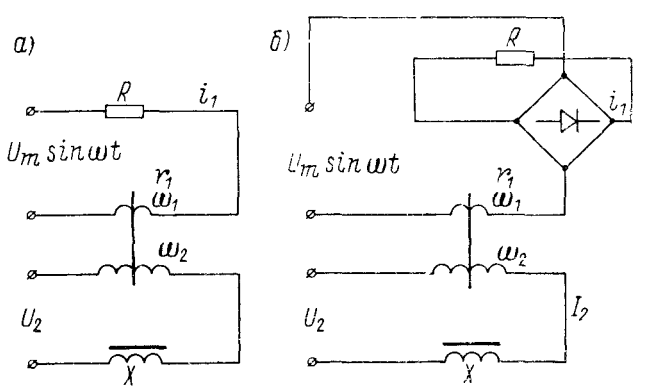



Рис. 22.11. Схема дросселя насыщения с одним сердечником: *а* — напряжение на нагрузке переменное; *б* — напряжение на нагрузке выпрямленное.

и худшие частотные и переходные характеристики по сравнению с усилителем на сопротивлениях. Более широко используются трансформаторы *Тр* в качестве выходного устройства усилителя для согласования выхода с сопротивлением нагрузки (рис. 22.7) или в качестве входного устройства в ламповых усилителях для согласования источника сигнала с входом усилителя (рис. 22.8).

Задача усилителя мощности — отдавать в заданное сопротивление нагрузки максимальную мощность при допустимом уровне частотных и нелинейных искажений. В усилителях мощности оконечных каскадов используются схемы как с электронными лампами, так и с транзисторами. Для усилителя на лампах применяется схема с общим катодом, для усилителей на транзисторах — схема с общим эмиттером. При выходной мощности до 6 Вт усилители выполняются однотактными (рис. 22.9), при большем значении выходной мощности — двухтактными и на трансформаторах (рис. 22.10).

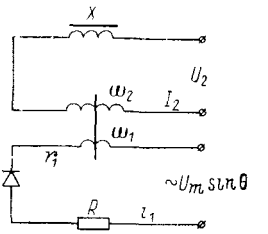



Рис. 22.12. Схема магнитного усилителя с одним сердечником и выпрямленным током нагрузочной обмотки.

В динамическом отношении электронные усилители описываются дифференциальным уравнением первого порядка. Постоянная времени усилителей находится в диапазоне $10^{-5}$—$10^{-7}$ с и практически не зависит от коэффициента усиления.

**Магнитные усилители.** Схема простейшего магнитного усилителя представлена на рис. 22.11. Усилитель состоит из сердечника из ферромагнитного материала, на котором намотаны обмотка управления и нагрузочная обмотка. Нагрузочная обмотка с последовательно включенным сопротивлением нагрузки подключена к источнику переменного тока, обмотка управления подключена к источнику сигнала — источнику постоянного тока.

При изменении постоянного тока управления изменяется постоянная составляющая напряженности магнитного поля в сердечнике и, как следствие, индуктивное сопротивление нагрузочной обмотки $X$ и ток нагрузки. Ввиду этого при определенном выборе обмотки управления, нагрузочной обмотки и материала сердечника можно создать такие условия, когда небольшое изменение тока управления будет вызывать значительное изменение тока нагрузки.

Для полной или частичной компенсации тока от электродвижущей силы, которая наводится в обмотке управления переменным магнитным потоком нагрузочной обмотки, предназначен дроссель, включенный последовательно в обмотку управления.

Магнитные усилители подразделяются на две основные группы: *дроссели насыщения* и *магнитные усилители с самонасыщением*. Отличие заключается в том, что по нагрузочной обмотке дросселя насыщения протекает переменный ток (см. рис. 22.11), а по нагрузочной обмотке магнитного усилителя с самонасыщением — выпрямленный ток (рис. 22.12). К магнитным усилителям с самонасыщением относятся так называемые быстродействующие усилители, у которых длительность переходных процессов равна половине периода питающего напряжения.

В зависимости от назначения дроссели насыщения могут быть усилителями тока, усилителями напряжения или мощности. Усилители напряжения или мощности имеют два и более сердечников (рис. 22.13).

Качество магнитных усилителей характеризуется величиной *добротности*, которая определяется как отношение коэффициента усиления по мощности к постоянной времени магнитного усилителя при определенном режиме его работы:

$$Д = \frac{k_p}{T_у}, \qquad (22.3)$$

где $T_у$ — постоянная времени магнитного усилителя; Д — добротность магнитного усилителя.

Увеличить добротность магнитного усилителя можно путем увеличения коэффициента усиления по мощности или уменьшения постоянной времени. Для увеличения коэффициента усиления по мощности однотактного усилителя применяют различные способы: вводят положительную обратную связь, увеличивают частоту тока питания, выполняют усилитель многокаскадным и т. д.

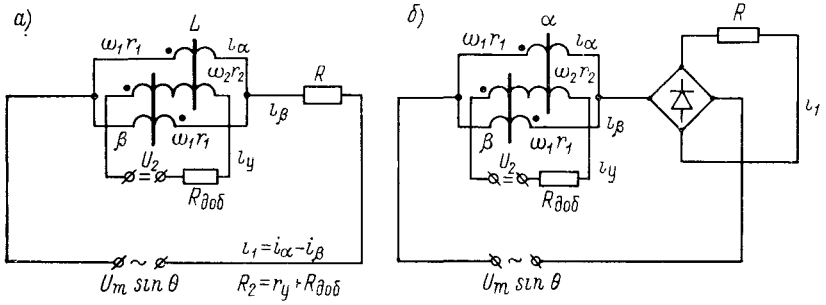



Рис. 22.13. Схемы дросселя насыщения с нагрузочными обмотками, соединенными параллельно: *а* — ток нагрузки переменный; *б* — ток нагрузки выпрямленный.

Магнитные усилители с обратной связью более сложны по конструкции, имеют бо́льшие массы и габариты, но при одинаковом коэффициенте усиления по мощности имеют меньшую постоянную времени. Для магнитных усилителей без обратной связи характерна бо́льшая стабильность характеристик.

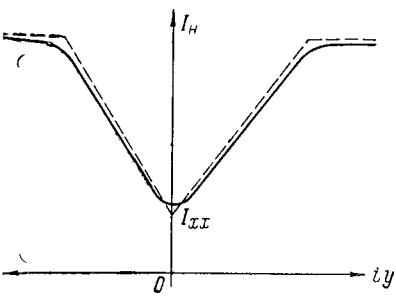



Рис. 22.14. Статическая характеристика однотактного магнитного усилителя.

*Однотактные усилители* не обеспечивают изменения фазы и полярности выходного тока при изменении полярности управляющего тока (рис. 22.14). В связи с этим в системах автоматического управления получили распространение двухтактные схемы магнитных усилителей, которые позволяют получить требуемую симметричную статическую характеристику. *Двухтактные магнитные усилители* могут быть выполнены по схемам трех типов: дифференциальной (рис. 22.15), мостовой (рис. 22.16) и трансформаторной (рис. 22.17). Характерной особенностью дифференциальной схемы является обязательное применение силового трансформатора. В мостовой схеме силовой трансформатор можно не применять, если выходное напряжение должно быть в пределах 0,5—0,7 напряжения сети. Преимущество трансформаторной схемы перед дифференциальной и мостовой заключается в том, что с помощью выбора витков вторичных обмоток можно согласовать сопротивления усилителя и нагрузки.

Динамические процессы в магнитном усилителе можно приближенно оценить с помощью дифференциального уравнения первого порядка

$$(T_y p + 1) U_н = k U_y, \qquad (22.4)$$

где $k$ — коэффициент усиления; $T_y$ — постоянная времени магнитного усилителя; $U_н$ — среднее за период значение напряжения на нагрузке; $U_y$ — напряжение, подаваемое к обмотке управления.

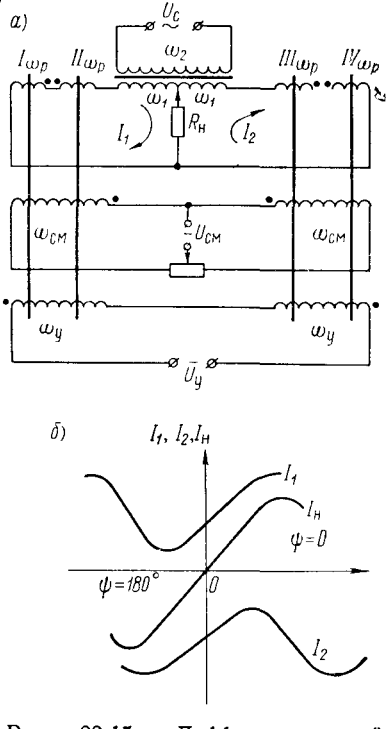



Рис. 22.15. Дифференциальный магнитный усилитель: *а* — принципиальная схема; *б* — статическая характеристика.

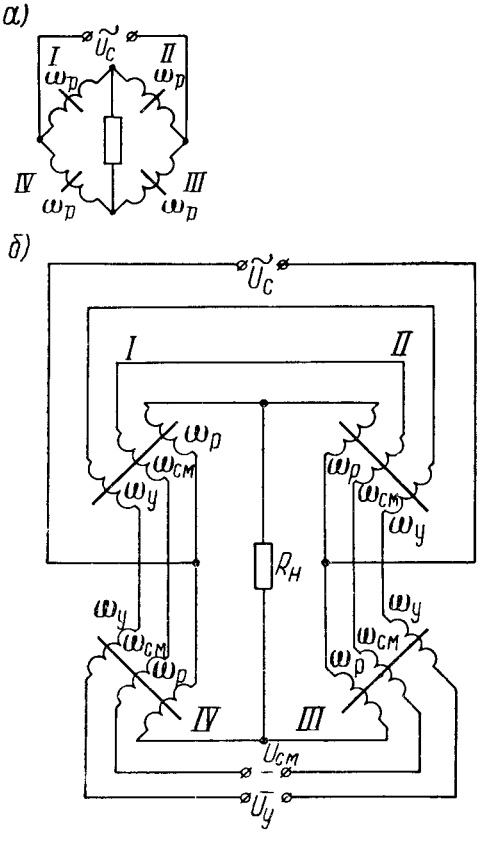



Рис. 22.16. Мостовой магнитный усилитель: *а* — схема соединения рабочих обмоток; *б* — принципиальная схема.

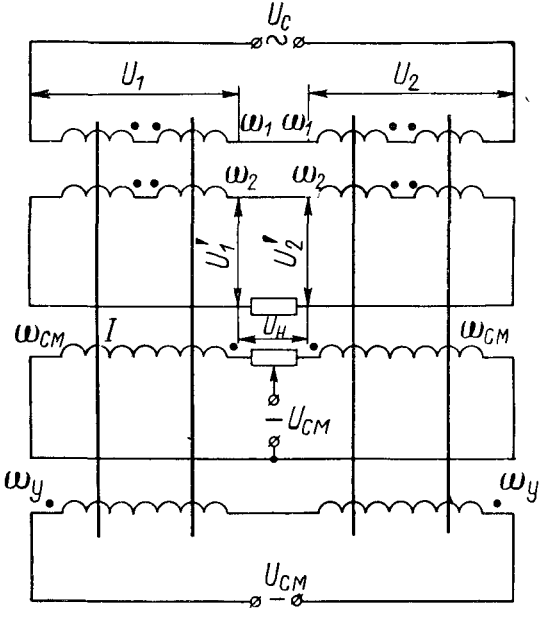



Рис. 22.17. Схема трансформаторного магнитного усилителя.

Для мощных усилителей постоянная времени определяется в несколько секунд, для маломощных она имеет порядок сотых и десятых долей секунды. Однако выражение (22.4) можно использовать только при выполнении следующих условий переходный процесс в усилителе близок к экспоненциальному; усилитель имеет линейную статическую характеристику; постоянная времени является неизменной величиной при различных режимах работы усилителя. Применение нелинейных методов приводит к следующему уравнению, которое, как показали эксперименты, с достаточной для инженерных расчетов точностью описывает динамические процессы в усилителе

$$[1 - [1 + c_1 \operatorname{sign}(p_1 U_н)] - c_2 |U_н|] T_1 U_н = kU_у. \qquad (22.5)$$

Здесь $T$ — среднее «фиктивное» значение постоянной времени усилителя; $c_1$, $c_2$ — коэффициенты, определяющие изменение постоянной времени усилителя, причем обычно $c_1 < 0$, $c_2 < 0$.

Промышленностью выпускается несколько серий магнитных усилителей, а также основанных на них выходных магнитных устройств, блоков, двигателей-усилителей.

*Однофазные магнитные усилители* типа ТУМ предназначены для работы в системах автоматического управления в качестве входных усилителей, в качестве отдельных каскадов — в многокаскадных схемах с электромашинными и магнитными усилителями, в качестве выходных каскадов усиления — для питания маломощных серводвигателей. Технические данные усилителей приведены в табл. 22.1.

*Таблица 22.1*

**Технические данные магнитных усилителей ТУМ-А, ТУМ-Б**

| Номер габарита усилителя ТУМ-А, ТУМ-Б | Номер исполнения нагрузочных обмоток | Напряжение питания $U_с$, В | Мощность нагрузки $P_н$, Вт | Напряжение на грузке (среднее значение) $U_н$, В | Ток нагрузки (среднее значение) $I_н$, А | Сопротивление нагрузки $R_н$, Ом | Число витков одной секции нагрузочной обмотки | Сопротивление одной секции нагрузочной обмотки при 20° С, Ом | Добротность $\Lambda$, 1/с | Масса усилителя ТУМ-А, кг | Масса усилителя ТУМ-Б, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 36 | 2,36 | 15,6 | 0,15 | 105 | 1250 | 27 | 4000 | 0,9 | 1,8 |
| 1 | 2 | 45 | 1,03 | 23 | 0,045 | 510 | 2700 | 120 | 2000 | 0,9 | 1,8 |
| 2 | 1 | 36 | 5,85 | 19,5 | 0,3 | 65 | 850 | 9,45 | 4800 | 1,1 | 1,8 |
| 3 | 1 | 36 | 11,9 | 19,8 | 0,6 | 33 | 500 | 3,64 | 4800 | 1,4 | 2,2 |
| 3 | 2 | 100 | 5,7 | 63 | 0,09 | 700 | 1400 | 63 | 2500 | 1,4 | 2,2 |
| 4 | 1 | 127 | 24,8 | 82,5 | 0,3 | 275 | 1200 | 17,2 | 6000 | 2,1 | 3,1 |
| 4 | 2 | 220 | 25,2 | 148 | 0,17 | 875 | 2100 | 55 | 5500 | 2,1 | 3,1 |
| 5 | 1 | 127 | 45,4 | 84,5 | 0,55 | 150 | 800 | 8,2 | 7200 | 2,7 | 4,3 |
| 5 | 2 | 220 | 40 | 145 | 0,275 | 525 | 1400 | 36 | 6300 | 2,7 | 4,3 |

В зависимости от исполнения усилителей их можно применять при различных условиях работы в диапазоне температуры от —60 до +45° С, относительной влажности 70—98%, при наличии вибрации и ударных нагрузок.

В зависимости от особенностей монтажа катушки усилители подразделяются на группы: ТУМ-А — катушка смонтирована на клеммной панели; ТУМ-Б — катушка залита компаундом; ТУМ-В — катушка на клеммной панели имеет проходную трубу для проводов или шин, заменяющих одну или несколько обмоток управления. Выполняются усилители с тороидальными ленточными сердечниками из стали марки Э310 толщиной 0,35 мм, с диапазоном мощностей 2,36—45,3 Вт. Размеры сердечников усилителей ТУМ-А, ТУМ-Б и номера габаритов приведены в табл. 22.2. Усилители ТУМ-В имеют только первый габарит.

*Таблица 22.2*

**Размеры сердечников магнитных усилителей ТУМ-А, ТУМ-Б**

| Номер габарита усилителя | Обозначение габарита усилителя | Размеры сердечника, мм | | |
|---|---|---|---|---|
| | | внутренний диаметр | наружный диаметр | ширина ленты |
| 1 | ТУМ-А1<br>ТУМ-Б1<br>ТУМ-В1 | 41 | 52 | 10 |
| 2 | ТУМ-А2<br>ТУМ-Б2 | 43 | 59 | 10 |
| 3 | ТУМ-А3<br>ТУМ-Б3 | 46 | 64 | 15 |
| 4 | ТУМ-А4<br>ТУМ-Б4 | 49 | 75 | 15 |
| 5 | ТУМ-А5<br>ТУМ-Б5 | 52 | 82 | 20 |

Питание усилителей осуществляется переменным напряжением с частотой 50 или 60 Гц. Обычно они включаются по мостовой схеме с самонасыщением (рис. 22.18).

Нагрузочные обмотки усилителей с параметрами $A_1$, $A_2$, $B_1$, $B_2$, состоящие из двух секций с одинаковым числом витков $X$ и $У$, выполняются в двух исполнениях; номер исполнения указывается после номера габарита усилителя.

Номер исполнения обмоток управления указывается после номера исполнения нагрузочных обмоток. Технические данные обмоток управления усилителей приведены в табл. 22.3 и 22.4.

Постоянная времени любой обмотки управления определяется по формуле

$$T_{\text{упр}} = \frac{k_P}{Д} - \frac{P_{\text{н}}}{I^2_{\text{упр н}} R_{\text{упр}} Д}, \qquad (22\,6)$$

где $P_{\text{н}}$, Д выбираются из табл. 22.1, $I_{\text{упр н}}$, $R_{\text{упр}}$ — из табл. 22.3 и 22.4.

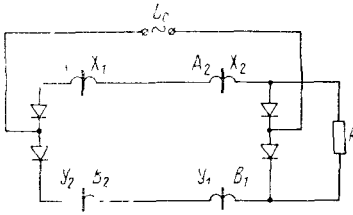



Рис. 22.18. Схема включения однофазного магнитного усилителя серии ТУМ.

*Однофазные магнитные усилители серий* УМТ и УМТК могут использоваться при температуре от —40 до +45° С и относительной влажности воздуха от 90% при +20° С до 98% при +35° С. Усилители изготовляются либо в металлическом корпусе залитыми с пластмассовым клеммником и обозначаются тогда буквой Д, стоящей после названия серии, либо в виде катушек с гибкими выводами для монтажа в блоках и обозначаются буквой Г.

Усилители имеют тороидальные ленточные сердечники из пермаллоя марки 68НМП толщиной 0,1 мм и диапазон мощностей от 1 до 400 Вт для серии УМТ, от 3 до 1000 Вт для серии УМТК.

Питание усилителей серии УМТ осуществляется переменным напряжением с частотой 50 Гц, серии УМТК — с частотой 400 Гц.

Нагрузочные обмотки усилителей имеют девять исполнений (табл 22.5) и указывают напряжение питания усилителей.

Таблица 22.3

**Технические данные обмоток управления магнитных усилителей ТУМ-А**

| Тип усилителя | Намагничивающая сила, А | 1Н-1К | | | 2Н-2К | | | 3Н-3К | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом |
| ТУМ-А1-11 | 6,5 | 93 | 165 | 3,2 | 13 | 63 | 53 | 4,4 | 63 | 154 |
| ТУМ-А1-13 | 6,5 | 93 | 165 | 4,0 | — | — | — | — | — | — |
| ТУМ-А1-15 | 6,5 | 93 | 165 | 4,0 | — | — | — | — | — | — |
| ТУМ-А1-16 | 6,5 | 93 | 175 | 3,0 | 13 | 90 | 37 | 32,5 | 90 | 14,5 |
| ТУМ-А1-22 | 10,5 | 53 | 145 | 9,5 | 7 | 90 | 125 | — | — | — |
| ТУМ-А2-11 | 8,1 | 160 | 330 | 0,96 | 17,8 | 58 | 54 | 5,7 | 58 | 163 |
| ТУМ-А3-11 | 9,9 | 283 | 660 | 0,39 | 21,3 | 55 | 55 | 6,1 | 55 | 190 |
| ТУМ-А3-22 | 8,0 | 62 | 150 | 8,2 | 80 | 150 | 6,5 | 2,2 | 80 | 364 |
| ТУМ-А4-11 | 11,0 | 152 | 330 | 1,7 | 21 | 52 | 77 | 9 | 74 | 124 |
| ТУМ-А1-12 | 11,0 | 275 | 800 | 0,57 | 13,8 | 51 | 144 | 13,8 | 51 | 144 |
| ТУМ-А4-23 | 9,9 | 77 | 330 | 2,95 | 18 | 52 | 82 | 7,7 | 74 | 134 |
| ТУМ-А4-24 | 9,9 | 90 | 330 | 2,95 | 21 | 52 | 77 | 9 | 74 | 124 |
| ТУМ-А5-11 | 11,2 | 224 | 605 | 0,9 | 26 | 72 | 60 | 11,2 | 72 | 128 |
| ТУМ-А5-12 | 11,2 | 8 | 425 | 43 | — | — | — | — | — | — |
| ТУМ-А5-13 | 11,2 | 280 | 605 | 0,93 | 17,5 | 48 | 165 | 14 | 48 | 220 |
| ТУМ-А5-24 | 11,2 | 125 | 270 | 2,88 | 374 | 270 | 0,96 | 28 | 210 | 16,2 |
| ТУМ-А5-25 | 11,2 | — | — | — | 26 | 72 | 55 | — | — | — |

| 4Н-4К | | | 5Н-5К | | | 6Н-6К | | | 7Н-7К | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом |
| 5 | 63 | 150 | 5 | 63 | 150 | 5 | 63 | 156 | 5 | 63 | 156 |
| 4,4 | 90 | 117 | 4,4 | 90 | 117 | 6,5 | 145 | 52 | 6,5 | 145 | 52 |
| — | — | — | — | — | — | 32,5 | 950 | 1,3 | 4,4 | 175 | 65 |
| 0,52 | 50 | 1500 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| — | — | — | — | — | — | 7 | 90 | 125 | 5,3 | 145 | 108 |
| 9 | 58 | 113 | 9 | 58 | 113 | 9 | 100 | 73 | 9 | 100 | 73 |
| 7,8 | 55 | 168 | 7,8 | 55 | 168 | 7,8 | 90 | 125 | 7,8 | 90 | 125 |
| 8 | 80 | 105 | 8 | 80 | 105 | 6,7 | 80 | 133 | 6,7 | 80 | 133 |
| 9 | 52 | 184 | 9 | 52 | 184 | 9 | 100 | 103 | 9 | 100 | 103 |
| 36,5 | 220 | 11,5 | 36,5 | 220 | 11,5 | 11 | 120 | 75 | 11 | 120 | 75 |
| 7,7 | 52 | 200 | 7,7 | 52 | 200 | 7,7 | 100 | 103 | 7,7 | 100 | 103 |
| 40 | 740 | 3,3 | 40 | 740 | 3,3 | — | — | — | — | — | — |
| 16 | 72 | 100 | 16 | 72 | 100 | 16 | 160 | 45 | 16 | 160 | 45 |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 11,7 | 48 | 260 | 14 | 48 | 230 | 10 | 48 | 330 | 10 | 48 | 330 |
| — | — | — | — | — | — | 14 | 270 | 29 | 14 | 270 | 29 |
| 75 | 900 | 1,7 | 75 | 900 | 1,7 | 35 | 425 | 7,2 | 35 | 425 | 1,2 |

Таблица 22.4

**Технические данные обмоток управления магнитных усилителей ТУМ-Б, ТУМ-В**

| Тип усилителя | Намагничивающая сила, А | 1Н-1К | | | 2Н-2К | | | 3Н 3К | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом |
| ТУМ-Б1-11 | 6,5 | 93 | 165 | 3,2 | 13 | 63 | 53 | 4,4 | 63 | 154 |
| ТУМ-Б1-11Т | 6,5 | 93 | 165 | 3,2 | 13 | 63 | 53 | 4,4 | 63 | 154 |
| ТУМ-Б1-22Т | 10,5 | 53 | 145 | 9,5 | 7 | 90 | 125 | — | — | — |
| ТУМ-Б2-11 | 8,1 | 160 | 330 | 0,96 | 17,8 | 58 | 5,7 | 58 | 163 | 9 |
| ТУМ-Б2-11Т | 8,1 | 160 | 330 | 0,96 | 17,8 | 58 | 5,7 | 58 | 163 | 9 |
| ТУМ-Б3-11 | 9,9 | 283 | 660 | 0,39 | 21,3 | 55 | 55 | 6,1 | 55 | 190 |
| ТУМ-Б3-11Т | 9,9 | 283 | 660 | 0,39 | 21,3 | 55 | 55 | 6,1 | 55 | 190 |
| ТУМ-Б4-11 | 11,0 | 152 | 330 | 1,7 | 21 | 52 | 77 | 9 | 74 | 124 |
| ТУМ-Б4-11Т | 11,0 | 152 | 330 | 1,7 | 21 | 52 | 77 | 9 | 74 | 124 |
| ТУМ-Б4-12 | 11,0 | 275 | 800 | 0,57 | 13,8 | 51 | 144 | 13,8 | 51 | 144 |
| ТУМ-Б4-12Т | 11,0 | 275 | 800 | 0,57 | 13,8 | 51 | 144 | 13,8 | 51 | 144 |
| ТУМ-Б4-23 | 11,0 | 77 | 330 | 2,95 | 18 | 52 | 82 | 7,7 | 74 | 134 |
| ТУМ-Б5-11 | 14,0 | 224 | 605 | 0,9 | 26 | 72 | 60 | 11,2 | 72 | 128 |
| ТУМ-Б5-11Т | 14,0 | 224 | 605 | 0,9 | 26 | 72 | 60 | 11,2 | 72 | 128 |
| ТУМ-Б5-12 | 14,0 | 8 | 425 | 43 | — | — | — | — | — | — |
| ТУМ-Б5-13 | 14,0 | 280 | 605 | 0,93 | 17,5 | 48 | 165 | 14 | 48 | 220 |
| ТУМ-Б5-13Т | 14,0 | 280 | 605 | 0,93 | 17,5 | 48 | 165 | 14 | 48 | 220 |
| ТУМ-Б5-24 | 14,0 | 156 | 270 | 2,88 | 466 | 270 | 0,96 | 36 | 210 | 16,2 |
| ТУМ-Б5-25Т | 14,0 | — | — | — | 32,5 | 72 | 55 | — | — | — |
| ТУМ-В1-16 | 6,5 | 93 | 165 | 4,0 | — | — | — | — | — | — |
| ТУМ-В1-24 | 6,5 | 93 | 165 | 4,0 | 14,5 | 62 | 46 | — | — | — |

| 1Н-4К | | | 5Н-5К | | | 6Н 6К | | | 7Н-7К | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом | $I_{упр\ н}$, мА | $I_{упр\ д}$, мА | $R_{упр}$, Ом |
| 5 | 63 | 150 | 5 | 63 | 150 | 5 | 63 | 156 | 5 | 63 | 156 |
| 5 | 63 | 15 | 5 | 63 | 150 | 5 | 63 | 156 | 5 | 63 | 156 |
| — | — | — | — | — | — | 7 | 90 | 125 | 5,3 | 145 | 108 |
| 58 | 113 | 9 | 9 | 58 | 113 | 9 | 100 | 73 | 9 | 100 | 73 |
| 58 | 113 | 9 | 9 | 58 | 113 | 9 | 100 | 73 | 9 | 100 | 73 |
| 7,8 | 55 | 168 | 7,8 | 55 | 168 | 7,8 | 90 | 125 | 7,8 | 90 | 125 |
| 7,8 | 55 | 168 | 7,8 | 55 | 168 | 7,8 | 90 | 125 | 7,8 | 90 | 125 |
| 9 | 52 | 184 | 9 | 52 | 184 | 9 | 100 | 103 | 9 | 100 | 103 |
| 9 | 52 | 184 | 9 | 52 | 184 | 9 | 100 | 103 | 9 | 100 | 103 |
| 36,5 | 220 | 11,5 | 36,5 | 220 | 11,5 | 11 | 120 | 75 | 11 | 120 | 75 |
| 36,5 | 220 | 11,5 | 36,5 | 220 | 11,5 | 11 | 120 | 75 | 11 | 120 | 75 |
| 7,7 | 52 | 200 | 7,7 | 52 | 200 | 7,7 | 100 | 103 | 7,7 | 100 | 103 |
| 16 | 72 | 100 | 16 | 72 | 100 | 16 | 160 | 45 | 16 | 160 | 45 |
| 16 | 72 | 100 | 16 | 72 | 100 | 16 | 160 | 45 | 16 | 160 | 45 |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 11,7 | 48 | 260 | 14 | 48 | 230 | 10 | 48 | 330 | 10 | 48 | 330 |
| 11,7 | 48 | 260 | 14 | 48 | 230 | 10 | 48 | 330 | 10 | 48 | 330 |
| — | — | — | — | — | — | 17,5 | 270 | 27 | 17,5 | 270 | 27 |
| 93 | 900 | 1,6 | 93 | 900 | 1,6 | 44 | 425 | 7,6 | 44 | 425 | 7,6 |
| 4,4 | 90 | 117 | 6,5 | 90 | 117 | 6,5 | 145 | 52 | 6,5 | 145 | 52 |
| — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

Каждый усилитель имеет шесть обмоток управления, которые в зависимости от мощности усилителя наматываются на обоих сердечниках или на каждом сердечнике отдельно.

Технические данные усилителей УМТ и УМТК приведены в табл. 22.6—22.10.

*Устройства выходные магнитные серии* УВМ предназначены для управления различными исполнительными механизмами фазной мощностью до 1 кВт, а также могут использоваться в качестве обычных магнитных усилителей. Условия, при которых устройства могут работать, следующие: температура от —40 до +40° С, относительная влажность — до 98% при 20° С, вибрация — с частотой до 30 Гц при ускорении до 6*g*, ударные ускорения — не более 15*g*, рабочее положение в пространстве — любое.

Выходное устройство изготовляется на базе магнитного усилителя с выходом на переменном токе, полной внутренней обратной связью и постоянным смещением. Выходное устройство имеет две управляющие обмотки и одну обмотку смещения.

*Исполнительный механизм должен включаться последовательно с нагрузочной* сетью выходного устройства в сеть переменного тока.

Технические данные выходных устройств серии УВМ приведены в табл. 22.11.

*Магнитные усилители единой серии* УМП включают в себя серию однофазных усилителей УМ1П и серию трехфазных усилителей УМ3П. Диапазон мощности единой серии — от 0,07 до 25 кВт.

Усилители предназначены для регулирования величины переменного тока и напряжения в системах автоматического управления. Условия работы усилителей следующие: температура окружающего воздуха от —40 до +40° С, относительная влажность — до 80%. Кроме того, выпускаются усилители в тропическом исполнении — *для сухого* (ТС) и *влажного* (ТВ) *тропического климата.*

Для управления магнитным усилителем используется постоянный (выпрямленный) ток. Для усиления управляющего сигнала можно применять в качестве промежуточных магнитные усилители ТУМ (50 Гц) или ТУМ АК (400 Гц). Последовательно с магнитным усилителем можно включать выпрямительные мосты: однофазный — для усилителей серии УМ1П и трехфазный — для УМ3П, причем нагрузка выключается в этом случае на постоянном (выпрямленном) токе.

По величине напряжения питающей сети частотой 50 Гц магнитные усилители серии УМ3П имеют исполнения на 127, 220, 380, 254 и 440 В линейного напряжения питания, серии УМ1П — исполнения на напряжения 127, 220, 380, 63, 110 и 190 В. *Обмоточные данные рабочих катушек* однофазных и трехфазных магнитных усилителей унифицированы.

Усилители УМ1П и УМ3П имеют пять вариантов исполнения обмоток управления:

1-е исполнение — 4 высокоомные обмотки;
2-е исполнение — 4 низкоомные обмотки;
3-е исполнение — 2 высокоомные и 2 низкоомные обмотки;
4-е исполнение — 1 высокоомная и 3 низкоомные обмотки;
5-е исполнение — 3 высокоомные и 1 низкоомная обмотка.

Кроме того, эти усилители имеют 15 конструктивных типоразмеров, которые образованы из пяти номинальных размеров пластин магнитопроводов. Ниже приведены толщины набора магнитопровода для каждого размера пластины.

**Типы пластин магнитных усилителей серии УМ1П**

| Размер пластины *a*, мм | Толщина набора, мм | | |
|---|---|---|---|
| 15 | 15 | 21 | 30 |
| 20 | 20 | 29 | 40 |
| 25 | 25 | 35 | 50 |
| 32 | 32 | 45 | 64 |
| 40 | 40 | 56 | 80 |

*Таблица 22.5*

**Номер исполнения нагрузочных обмоток и напряжение питания усилителей серии УМТ и УМТК**

| Исполнение нагрузочных обмоток | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Напряжение питания при частоте 50 Гц, В | 7,5 | 12 | 24 | 36 | 60 | 127 | 190 | 220 | 380 |
| Напряжение питания при частоте 400 Гц, В | 7,5 | 12 | 24 | 36 | 60 | 127 | 190 | 220 | 380 |

*Таблица 22.6*

**Шкалы мощностей магнитных усилителей серии УМТ и УМТК**

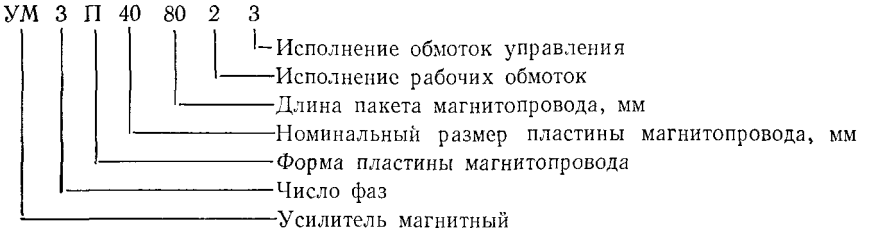
| Размеры сердечника, мм | | | Номер типоразмера сердечника и катушки | Номер габарита корпуса (исполнения Д) | Серия УМТ | | Серия УМТК | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Внутренний диаметр | Наружный диаметр | Ширина ленты | | | Обозначение типоразмера усилителя | Номинальная мощность нагрузки, Вт | Обозначение типоразмера усилителя | Номинальная мощность нагрузки, Вт |
| 28 | 33,5 | 4 | 11 | 1 | —<br>— | —<br>— | УМТК.Г11<br>УМТК.Д11 | 3,2 |
| 32 | 40 | 4 | 12 | 1 | —<br>— | —<br>— | УМТК.Г12<br>УМТК.Д12 | 10 |
| 40 | 50 | 8 | 13 | 2 | УМТ.Г13<br>УМТ.Д13 | 1 | УМТК.Г13<br>УМТК.Д13 | 32 |
| 45 | 56 | 10 | 14 | 2 | УМТ.Г14<br>УМТ.Д14 | 2,5 | УМТК.Г14<br>УМТК.Д14 | 63 |
| 50 | 63 | 10 | 15 | 3 | УМТ.Г15<br>УМТ.Д15 | 6,3 | —<br>— | —<br>— |
| 50 | 63 | 16 | 16 | 3 | УМТ.Г16<br>УМТ.Д16 | 12,5 | УМТК.Г16<br>УМТК.Д16 | 125 |
| 50 | 75 | 16 | 17 | 4 | УМТ.Г17<br>УМТ.Д17 | 25 | УМТК.Г17<br>УМТК.Д17 | 250 |
| 67 | 90 | 16 | 18 | 4 | УМТ.Г18<br>УМТ.Д18 | 47 | УМТК.Г18<br>УМТК.Д18 | 475 |
| 75 | 100 | 25 | 19 | 5 | УМТ.Д19 | 100 | УМТК.Д19 | 1000 |
| 85 | 125 | 25 | 20 | 5 | УМТ.Д20 | 200 | — | — |
| 95 | 140 | 32 | 21 | 6 | УМТ.Д21 | 400 | — | — |

*Таблица 22.7*

**Технические данные магнитных усилителей серии УМТ**

| Номер габарита усилителя УМТ | Исполнение нагрузочных обмоток | Номинальная мощность нагрузки, Вт | Номинальное напряжение питания (при $f = 50$ Гц), В | Номинальный ток нагрузки, А | Номинальное сопротивление нагрузки, Ом | Номинальное напряжение на нагрузке, В | Данные нагрузочных обмоток $A_1—X_1$, $A_2—X_2$, $B_1—Y_1$, $B_2—Y_2$ | | | Коэффициент регулирования | Добротность $10^3$, 1/с | Масса усилителя в заливном исполнении, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Число витков одной секции обмотки | Диаметр провода, мм | Сопротивление одной секции обмотки при 20° С, Ом | | | |
| 13 | 3 | 1,0 | 24 | 0,13 | 65 | 8,45 | 1600 | 0,27 | 28 | 150 | 20,2 | 0,8 |
| 14 | 4 | 2,5 | 36 | 0,15 | 110 | 16,5 | 1730 | 0,27 | 33 | 175 | 28,9 | 1,4 |
| 15 | 4 | 6,3 | 36 | 0,35 | 50 | 17,5 | 1470 | 0,44 | 12,2 | 310 | 58,5 | 1,6 |
| 16 | 4 | 12 | 36 | 0,7 | 25 | 17,5 | 915 | 0,53 | 6,1 | 385 | 70,5 | 1,8 |
| 17 | 6 | 25 | 127 | 0,34 | 215 | 73 | 2200 | 0,38 | 31,5 | 386 | 90 | 3 |
| 17 | 8 | 22 | 220 | 0,175 | 705 | 123 | 3800 | 0,25 | 125 | 344 | 77 | 3 |
| 18 | 6 | 47 | 127 | 0,6 | 130 | 78 | 1825 | 0,55 | 13,6 | 470 | 112 | 4 |
| 18 | 8 | 45 | 220 | 0,34 | 400 | 136 | 3150 | 0,41 | 42,5 | 465 | 114 | 4 |
| 19 | 7 | 97 | 190 | 0,77 | 165 | 124 | 1620 | 0,62 | 11,9 | 485 | 126 | 7 |
| 19 | 8 | 100 | 220 | 0,68 | 215 | 146 | 1860 | 0,59 | 15,2 | 490 | 127 | 7 |
| 19 | 9 | 90 | 380 | 0,36 | 700 | 250 | 3240 | 0,41 | 54,5 | 455 | 120 | 7 |
| 20 | 7 | 200 | 190 | 1,55 | 85 | 132 | 1000 | 1,0 | 3,35 | 490 | 134 | 10 |
| 20 | 8 | 200 | 220 | 1,3 | 117 | 152 | 1165 | 0,9 | 4,8 | 490 | 134 | 10 |
| 20 | 9 | 200 | 380 | 0,76 | 350 | 266 | 2000 | 0,96 | 14 | 490 | 135 | 10 |
| 21 | 7 | 400 | 190 | 3,0 | 45 | 135 | 700 | 1,45 | 1,35 | 610 | 174 | 15 |
| 21 | 8 | 400 | 220 | 2,5 | 62 | 158 | 810 | 1,3 | 1,9 | 590 | 174 | 15 |
| 21 | 9 | 400 | 380 | 1,5 | 180 | 270 | 140 | 1,0 | 5,5 | 610 | 176 | 15 |

*Обозначение типа магнитного усилителя расшифровывается таким образом* (пример):




Технические данные магнитных усилителей серии УМ1П приведены в табл. 22 12 и 22.13. Номинальные данные, указанные в этих таблицах, соответствуют схеме с отдельным выпрямительным мостом, изображенной на рис. 22.19.

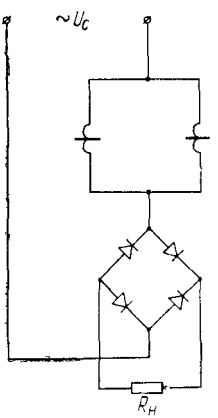



Рис. 22.19. Схема включения однофазных силовых магнитных усилителей серии УМ1П.

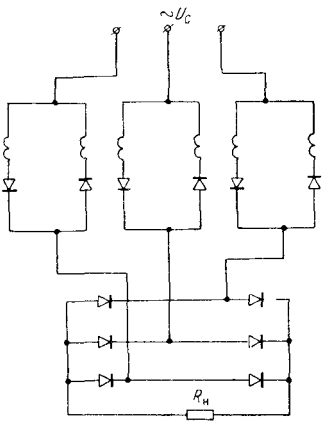



Рис. 22.20. Схема включения трехфазного силового магнитного усилителя серии УМ3П.

Технические данные магнитных усилителей серии УМ3П, полученные для схемы, показанной на рис. 22.20, приведены в табл. 22.14 и 22.15.

*Двигатели-усилители серии* ДУ представляют собой бесконтактные электрические машины, совмещающие в одном агрегате исполнительный асинхронный двигатель и магнитный усилитель с внутренней обратной связью. Двигатели-усилители предназначены для работы в системах автоматизированного электропривода и могут заменить одновременно исполнительный двигатель и магнитный усилитель. Условия их работы следующие: температура окружающего воздуха от — 50 до + 35° С, относительная влажность — до 80%, вибрация — с частотой до 80 Гц, ускорение — до 90 м/с$^2$.

Двигатели-усилители выполняются реверсивными типа РДУ (рис. 22.21, 22.22) и РТДУ (рис. 22.23) и нереверсивными типа НДУ (рис. 22.24) и НТДУ (рис. 22.25). Серия двигателей-усилителей включает в себя семь типоразмеров с мощностью на валу 5—1500 Вт при частоте 50 Гц и 5—250 Вт при частоте 400 Гц.

## Технические данные обмоток управления

| Номер габарита УМТ | | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Исполнение нагрузочных обмоток | | 3 | 4 | 4 | 4 | 6 | 8 |
| Номинальная намагничивающая сила | | 0,9 | 1,0 | 1,05 | 1,05 | 1,25 | 1,25 |
| 1Н-1К 2Н-2К | $I_{упр\ н}$, мА | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 |
| | $I_{упр\ д}$, мА | 75 | 70 | 65 | 60 | 150 | 150 |
| | $\omega_{упр}$ | 450 | 500 | 525 | 525 | 250 | 320 |
| | $d$, мм | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,25 | 0,25 |
| | $R_{упр}$, Ом | 53 | 63 | 84 | 96 | 17,4 | 17,4 |
| | $P_{упр\ н}$, мВт | 0,21 | 0,25 | 0,33 | 0,38 | 0,44 | 0,44 |
| | $kp \cdot 10^{-3}$ | 4,7 | 10 | 19,1 | 33 | 57 | 57 |
| 3Н-3К 4Н 4К | $I_{упр\ н}$, мА | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 |
| | $I_{упр\ д}$, мА | 75 | 70 | 65 | 60 | 150 | 150 |
| | $\omega_{упр}$ | 450 | 500 | 525 | 525 | 250 | 250 |
| | $d$, мм | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,25 | 0,25 |
| | $R_{упр}$, Ом | 57 | 66 | 86 | 99 | 18,2 | 18,2 |
| | $P_{упр\ н}$, мВт | 0,23 | 0,27 | 0,34 | 0,4 | 0,46 | 0,46 |
| | $kp \cdot 10^{-3}$ | 4,35 | 9,2 | 18,3 | 31 | 54 | 54 |
| 5Н-5К | $I_{упр\ н}$, мА | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 |
| | $I_{упр\ д}$, мА | 75 | 70 | 65 | 60 | 150 | 150 |
| | $\omega_{упр}$ | 180 | 200 | 210 | 210 | 125 | 125 |
| | $d$, мм | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,25 | 0,25 |
| | $R_{упр}$, Ом | 24 | 29 | 37 | 41,5 | 9,5 | 9,5 |
| | $P_{упр\ н}$, мВт | 0,6 | 0,72 | 0,93 | 1,04 | 0,95 | 0,95 |
| | $kp \cdot 10^{-3}$ | 1,67 | 3,45 | 6,8 | 12 | 26,3 | 26,3 |

## Технические данные магнитных

| Номер габарита усилителя УМТК | Исполнение нагрузочных обмоток | Номинальная мощность нагрузки, Вт | Номинальное напряжение питания (при $f$ = 400 Гц), В | Номинальный ток нагрузки, А | Номинальное сопротивление нагрузки, Ом |
|---|---|---|---|---|---|
| 11 | 3 | 3,2 | 24 | 0,3 | 37 |
| 12 | 5 | 10 | 60 | 0,29 | 120 |
| 13 | 6 | 32 | 110 | 0,42 | 180 |
| 13 | 8 | 32 | 320 | 0,21 | 730 |
| 14 | 6 | 64 | 110 | 0,82 | 95 |
| 14 | 8 | 63 | 220 | 0,4 | 390 |
| 16 | 8 | 125 | 220 | 0,79 | 200 |
| 16 | 9 | 125 | 380 | 0,45 | 610 |
| 17 | 8 | 250 | 220 | 1,55 | 105 |
| 17 | 9 | 250 | 380 | 0,9 | 310 |
| 18 | 8 | 475 | 220 | 2,9 | 57 |
| 18 | 9 | 460 | 380 | 1,65 | 170 |
| 19 | 8 | 1000 | 220 | 6,1 | 27 |
| 19 | 9 | 945 | 380 | 3,4 | 83 |

*Таблица 22.8*

**магнитных усилителей серии УМТ**

| 18 | | 19 | | | 20 | | | 21 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6 | 8 | 7 | 8 | 9 | 7 | 8 | 9 | 7 | 8 | 9 |
| 1,6 | 1,6 | 1,75 | 1,75 | 1,75 | 2 05 | 2,05 | 2,05 | 2,22 | 2,22 | 2,22 |
| 5 | 5 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 150 | 150 | 750 | 750 | 750 | 660 | 660 | 660 | 600 | 600 | 600 |
| 320 | 320 | 90 | 90 | 90 | 110 | 110 | 110 | 120 | 120 | 120 |
| 0,25 | 0,25 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0 55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 |
| 24,2 | 24,2 | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 3,25 | 3,25 | 3,25 | 4,3 | 4,3 | 4,3 |
| 0,6 | 0,6 | 0,96 | 0,96 | 0,96 | 1,3 | 1,3 | 1,3 | 1,72 | 1,72 | 1,72 |
| 83 | 83 | 104 | 104 | 104 | 154 | 154 | 154 | 235 | 235 | 235 |
| 5 | 5 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| 150 | 150 | 750 | 750 | 750 | 660 | 660 | 660 | 600 | 600 | 600 |
| 320 | 320 | 320 | 90 | 90 | 90 | 110 | 110 | 120 | 120 | 120 |
| 0,25 | 0,25 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 |
| 26,5 | 26,5 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 4,6 | 4,6 | 4,6 |
| 0,66 | 0,66 | 1,05 | 1,05 | 1,05 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,85 | 1,85 | 1,85 |
| 76 | 76 | 95 | 95 | 95 | 143 | 143 | 143 | 215 | 215 | 215 |
| 10 | 10 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| 150 | 150 | 750 | 750 | 750 | 660 | 660 | 660 | 600 | 600 | 600 |
| 160 | 160 | 45 | 45 | 45 | 55 | 55 | 55 | 60 | 60 | 60 |
| 0,25 | 0,25 | 0 55 | 0,55 | 0,55 | 0 55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 |
| 14,6 | 14,6 | 1,38 | 1,38 | 1,38 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 2,44 | 2,44 | 2,44 |
| 1,46 | 1,46 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,9 | 3,9 | 3,9 |
| 34 | 34 | 45 | 45 | 45 | 67 | 67 | 67 | 103 | 103 | 103 |

*Таблица 22.9*

**усилителей серии УМТК**

| Номинальное напряжение на нагрузке, В | Данные нагрузочных обмоток $A_1 - X_1$, $A_2 - X_2$, $B_1 - Y_1, B_2 - Y_2$ | | | Коэффициент регулирования | Добротность $10^3$, 1/с | Масса усилителя в залитом исполнении, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Число витков одной секции обмотки | Диаметр провода, мм | Сопротивление одной секции обмотки при + 20° С, Ом | | | |
| 11 | 1390 | 0,25 | 15,5 | 169 | 155 | 0,5 |
| 35 | 2380 | 0,25 | 31,0 | 240 | 274 | 0,6 |
| 75 | 875 | 0,38 | 7,75 | 204 | 292 | 0,8 |
| 153 | 1750 | 0,27 | 30,5 | 204 | 298 | 0,8 |
| 78 | 635 | 0,55 | 2,9 | 250 | 350 | 1,4 |
| 156 | 1275 | 0,38 | 12,25 | 250 | 350 | 1,4 |
| 158 | 675 | 0,59 | 3,65 | 236 | 354 | 1,8 |
| 275 | 1170 | 0,44 | 11,3 | 236 | 352 | 1,8 |
| 163 | 460 | 0,86 | 1,28 | 270 | 394 | 3,0 |
| 280 | 800 | 0,64 | 4,0 | 273 | 392 | 3,0 |
| 166 | 385 | 1,25 | 0,55 | 356 | 520 | 4,0 |
| 280 | 675 | 0,93 | 1,76 | 356 | 520 | 4,0 |
| 165 | 225 | 1,81 | 0,195 | 392 | 585 | 7,0 |
| 282 | 390 | 1,3 | 0,65 | 380 | 570 | 7,0 |

*Таблица 22.10*

**Технические данные обмоток управления магнитных усилителей серии УМТК**

| Номер габарита УМТК | | 11 | 12 | 13 | | 14 | 16 | | 17 | | 18 | | 19 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Исполнение нагрузочных обмоток | | 3 | 5 | 6 | 8 | 8 | 8 | 9 | 8 | 9 | 8 | 9 | 8 | 9 |
| Номинальная намагничивающая сила | | 1,25 | 1,45 | 1,8 | 1,8 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,8 | 2,8 | 3,3 | 3,3 | 3,75 | 3,75 |
| 1Н-1К<br>2Н-2К | $I_{упр\ н}$, мА | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | $I_{упр\ д}$, мА | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| | $\omega_{упр}$ | 625 | 725 | 900 | 900 | 1100 | 460 | 460 | 560 | 560 | 660 | 660 | 750 | 750 |
| | $d$, мм | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| | $R_{упр}$, Ом | 50 | 68 | 106 | 106 | 140 | 27,2 | 27,2 | 39,3 | 39,3 | 51 | 51 | 64 | 64 |
| | $P_{упр\ н}$, мВт | 0,2 | 0,27 | 0,42 | 0,42 | 0,56 | 0,68 | 0,68 | 0,98 | 0,98 | 1,28 | 1,28 | 1,6 | 1,6 |
| | $k_P \cdot 10^{-3}$ | 16 | 37 | 76 | 76 | 112 | 184 | 184 | 255 | 255 | 390 | 390 | 625 | 625 |
| 3Н-3К<br>4Н-4К | $I_{упр\ н}$, мА | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | $I_{упр\ д}$, мА | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| | $\omega_{упр}$ | 625 | 725 | 900 | 900 | 1100 | 460 | 460 | 560 | 560 | 660 | 660 | 750 | 750 |
| | $d$, мм | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| | $R_{упр}$, Ом | 58 | 81 | 120 | 120 | 147 | 31 | 31 | 41 | 41 | 56 | 56 | 70 | 70 |
| | $P_{упр\ н}$, мВт | 0,23 | 0,32 | 0,48 | 0,48 | 0,59 | 0,59 | 0,78 | 0,78 | 1,03 | 1,03 | 1,4 | 1,4 | 1,75 |
| | $k_P \cdot 10^{-3}$ | 13,9 | 31 | 66,5 | 66,5 | 107 | 160 | 160 | 243 | 243 | 357 | 357 | 570 | 570 |
| 5Н-5К<br>6Н-6К | $I_{упр\ н}$, мА | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | $I_{упр\ д}$, мА | 60 | 60 | 60 | 60 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 |
| | $\omega_{упр}$ | 250 | 300 | 360 | 360 | 440 | 230 | 230 | 280 | 280 | 330 | 330 | 375 | 375 |
| | $d$, мм | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,31 | 0,31 |
| | $R_{упр}$, Ом | 27 | 35,3 | 52 | 52 | 64 | 16,3 | 16,3 | 21,5 | 21,5 | 31 | 31 | 36,5 | 36,5 |
| | $P_{упр\ н}$, мВт | 0,68 | 0,88 | 1,3 | 1,3 | 1,6 | 1,63 | 1,63 | 2,15 | 2,15 | 3,1 | 3,1 | 3,65 | 3,65 |
| | $k_P \cdot 10^{-3}$ | 4,7 | 11,4 | 24,5 | 24,5 | 39,5 | 76,5 | 76,5 | 116 | 116 | 161 | 161 | 275 | 275 |

*Таблица 22.11*

**Технические данные выходных магнитных устройств серии УВМ**

| Тип выходного устройства | Тип усилителя | Тип выпрямителя | Нагрузочная цепь | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $U_с$, В | $P_н$, кВт | $U_н$, В | $I_н$, А | $I_{min}$, А |
| УВМ.0,25.4 | УВМ.0,25.41 | Д-233 | 127 | 0,25 | 116 | 2,15 | 0,08 |
| УВМ.0,25.5 | УВМ.0,25.51 | Д-233 | 220 | 0,25 | 206 | 1,21 | 0,05 |
| УВМ.0,25.6 | УВМ.0,25.61 | Д-233 | 380 | 0,25 | 342 | 0,73 | 0,031 |
| УВМ.0,63.4 | УВМ.0,63.41 | ВК-25 | 127 | 0,63 | 119 | 5,3 | 0,19 |
| УВМ.0,63.5 | УВМ.0,63.51 | ВК-25 | 220 | 0,63 | 210 | 3,0 | 0,1 |
| УВМ.0,63.6 | УВМ.0,63.61 | ВК-25 | 380 | 0,63 | 356 | 1,77 | 0,06 |
| УВМ.1,0.4 | УВМ.1,0.41 | ВК-50 | 127 | 1,0 | 110 | 9,3 | 0,26 |
| УВМ.1,0.5 | УВМ.1,0.51 | ВК-50 | 220 | 1,0 | 204 | 4,9 | 0,16 |
| УВМ.1,0.6 | УВМ.1,0.61 | ВК-50 | 380 | 1,0 | 360 | 2,78 | 0,083 |



| Цепь смещения | | | Цепь управления | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $U_{пост}$, В | $I$, А | $R$, Ом | $U$, В | $I$, А | $R$, Ом |
| 12 | 0,112—0,138 | 87—107 | 12 | 0,127—0,155 | 77,5—94,5 |
| 12 | 0,112—0,138 | 87—107 | 12 | 0,127—0,155 | 77,5—94,5 |
| 12 | 0,112—0,138 | 87—107 | 12 | 0,127—0,155 | 77,5—94,5 |
| 12 | 0,106—0,129 | 93—113 | 12 | 0,121—0,148 | 81—99 |
| 12 | 0,106—0,129 | 93—113 | 12 | 0,121—0,148 | 81—99 |
| 12 | 0,106—0,129 | 93—113 | 12 | 0,121—0,148 | 81—99 |
| 12 | 0,102—0,124 | 96,5—118 | 12 | 0,123—0,15 | 80—98 |
| 12 | 0,102—0,124 | 96,5—118 | 12 | 0,123—0,15 | 80—98 |
| 12 | 0,102—0,124 | 96,5—118 | 12 | 0,123—0,15 | 80—98 |

*Таблица 22.13*

**Технические данные обмоток управления магнитных усилителей серии УМ1П**

| Номер типоразмера | Обозначение типоразмера усилителя | Намагничивающая сила, А | Обмотки управления высокоомные | | | | | | Обмотки управления низкоомные | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Номинальная мощность управления, Вт | Число витков обмотки управления | Номинальный ток управления, А | Длительно допустимый ток управления, А | Сопротивление обмотки управления при 20° С, Ом | Постоянная времени обмотки управления, с | Номинальная мощность управления, Вт | Число витков обмотки управления | Номинальный ток управления, А | Длительно допустимый ток управления, А | Сопротивление обмотки управления при 20° С Ом | Постоянная времени обмотки управления, с |
| 1 | УМ1П.15.15 | 32 | 0,19 | 200 | 0,16 | 0,4 | 7,5 | 0,07 | 0,21 | 45 | 0,7 | 1,4 | 0,42 | 0,06 |
| 2 | УМ1П.15.21 | 32 | 0,22 | 200 | 0,16 | 0,4 | 8,4 | 0,08 | 0,23 | 45 | 0,7 | 1,4 | 0,46 | 0,07 |
| 3 | УМ1П.15.30 | 32 | 0,24 | 200 | 0,16 | 0,4 | 9,2 | 0,09 | 0,25 | 45 | 0,7 | 1,4 | 0,5 | 0,09 |
| 4 | УМ1П.20.20 | 42 | 0,28 | 200 | 0,21 | 0,42 | 6,3 | 0,10 | 0,27 | 50 | 0,84 | 1,7 | 0,38 | 0,10 |
| 5 | УМ1П.20.28 | 42 | 0,31 | 200 | 0,21 | 0,42 | 7 | 0,12 | 0,31 | 50 | 0,84 | 1,7 | 0,44 | 0,12 |
| 6 | УМ1П.20.40 | 42 | 0,35 | 200 | 0,21 | 0,42 | 8 | 0,16 | 0,35 | 50 | 0,84 | 1,7 | 0,5 | 0,16 |
| 7 | УМ1П.25.25 | 50 | 0,39 | 200 | 0,25 | 0,5 | 6,2 | 0,15 | 0,75 | 20 | 2,5 | 6 | 0,12 | 0,08 |
| 8 | УМ1П.25.35 | 50 | 0,41 | 200 | 0,25 | 0,5 | 6,6 | 0,19 | 0,94 | 20 | 2,5 | 6 | 0,15 | 0,08 |
| 9 | УМ1П.25.50 | 50 | 0,47 | 200 | 0,25 | 0,5 | 7,4 | 0,23 | 1,12 | 20 | 2,5 | 6 | 0,18 | 0,10 |
| 10 | УМ1П.32.32 | 60 | 0,64 | 200 | 0,31 | 0,8 | 6,6 | 0,18 | 1,25 | 25 | 2,5 | 6 | 0,2 | 0,09 |

*Таблица 22.12*

## Технические данные магнитных усилителей серии УМ1П

| Номер типоразмера | Обозначение типоразмера усилителя | Нагрузка постоянного тока (см. схему на рис. 13.19) | | | | | | Коэффициент кратности тока нагрузки | Добротность, 1/с | Габарит, мм | | | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Сеть 380 В (исполнение 5) | | | Сеть 220 В (исполнение 5) | | | | | Длина | Ширина | Высота | |
| | | Номинальная выходная мощность, Вт | Номинальное напряжение на нагрузке, В | Номинальный ток нагрузки (среднее значение), А | Номинальная выходная мощность, Вт | Номинальное напряжение на нагрузке, Вт | Номинальный ток нагрузки (среднее значение), А | | | | | | |
| 1 | УМ1П.15.15 | 58 | 192 | 0,3 | 57 | 111 | 0,515 | 18 | 4600 | 110 | 160 | 105 | 3,7 |
| 2 | УМ1П.15.21 | 85 | 194 | 0,44 | 86 | 112 | 0,77 | 18 | 5100 | 122 | 160 | 105 | 4,4 |
| 3 | УМ1П.15.30 | 113 | 196 | 0,58 | 124 | 115 | 1,08 | 18 | 5000 | 140 | 160 | 105 | 5,3 |
| 4 | УМ1П.20.20 | 191 | 200 | 0,96 | 186 | 115 | 1,62 | 20 | 6800 | 153 | 214 | 140 | 8,0 |
| 5 | УМ1П.20.28 | 262 | 208 | 1,26 | 277 | 123 | 2,25 | 20 | 6900 | 169 | 214 | 140 | 10,0 |
| 6 | УМ1П.20.40 | 338 | 208 | 1,62 | 360 | 123 | 2,93 | 20 | 6000 | 192 | 214 | 140 | 11,8 |
| 7 | УМ1П.25.25 | 408 | 211 | 1,93 | 406 | 123 | 3,3 | 20 | 7200 | 172 | 255 | 170 | 13,5 |
| 8 | УМ1П.25.35 | 570 | 211 | 2,7 | 608 | 123 | 4,95 | 20 | 7500 | 192 | 255 | 170 | 16,3 |
| 9 | УМ1П.25.50 | 823 | 215 | 3,83 | 877 | 127 | 6,9 | 20 | 7500 | 222 | 255 | 170 | 20,0 |
| 10 | УМ1П.32.32 | 1100 | 223 | 4,95 | 1050 | 130 | 8,1 | 30 | 9600 | 195 | 326 | 200 | 27,0 |

*Таблица 22.15*

## Технические данные обмоток управления магнитных усилителей серии УМ3П

| Номер типоразмера | Обозначение типоразмера усилителя | Намагничивающая сила, А | Обмотки управления высокоомные | | | | | | Обмотки управления низкоомные | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Номинальная мощность управления, Вт | Число витков обмотки управления | Номинальный ток управления, А | Длительно допустимый ток управления, А | Сопротивление обмотки управления при 20° С, Ом | Постоянная времени обмотки управления, с | Номинальная мощность управления, Вт | Число витков обмотки управления | Номинальный ток управления, А | Длительно допустимый ток управления, А | Сопротивление обмотки управления при 20° С, Ом | Постоянная времени обмотки управления, с |
| 1 | УМ3П.15.15 | 32 | 0,41 | 200 | 0,16 | 0,4 | 16 | 0,095 | 0,43 | 45 | 0,7 | 1,4 | 0,87 | 0,08 |
| 2 | УМ3П.15.21 | 32 | 0,44 | 200 | 0,16 | 0,4 | 17 | 0,11 | 0,49 | 45 | 0,7 | 1,4 | 1,0 | 0,095 |
| 3 | УМ3П.15.30 | 32 | 0,46 | 200 | 0,16 | 0,4 | 18 | 0,12 | 0,54 | 45 | 0,7 | 1,4 | 1,1 | 0,12 |
| 4 | УМ3П.20.20 | 42 | 0,57 | 200 | 0,21 | 0,42 | 13 | 0,135 | 0,66 | 50 | 0,84 | 1,7 | 0,97 | 0,135 |
| 5 | УМ3П.20.28 | 42 | 0,62 | 200 | 0,21 | 0,42 | 14 | 0,16 | 0,7 | 50 | 0,84 | 1,7 | 1,0 | 0,16 |
| 6 | УМ3П.20.40 | 42 | 0,68 | 200 | 0,21 | 0,42 | 15,5 | 0,21 | 0,77 | 50 | 0,84 | 1,7 | 1,1 | 0,21 |
| 7 | УМ3П.25.25 | 50 | 0,81 | 200 | 0,25 | 0,5 | 13 | 0,2 | 0,62 | 20 | 2,5 | 6,0 | 0,1 | 0,11 |
| 8 | УМ3П.25 35 | 50 | 0,87 | 200 | 0,25 | 0,5 | 14 | 0,26 | 0,95 | 20 | 2,5 | 6,0 | 0,15 | 0,11 |
| 9 | УМ3П.25.50 | 50 | 1,0 | 200 | 0,25 | 0,5 | 16 | 0,31 | 1,25 | 20 | 2,5 | 6,0 | 0,2 | 0,135 |
| 10 | УМ3П.32.32 | 62 | 1,25 | 200 | 0,31 | 0,8 | 13 | 0,24 | 1,43 | 25 | 1,5 | 6,0 | 0,23 | 0,12 |

*Таблица 22.14*

**Технические данные магнитных усилителей серии УМ3П**

| Номер типоразмера | Обозначение типоразмера усилителя | Нагрузка постоянного тока (см. схему на рис. 13.20) | | | | | | Коэффициент кратности тока нагрузки | Добротность, 1/с | Габарит, мм | | | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Сеть 380 В (исполнение 3) | | | Сеть 220 В (исполнение 2) | | | | | Длина | Ширина | Высота | |
| | | Номинальная выходная мощность, Вт | Номинальное напряжение на нагрузке, В | Номинальный ток нагрузки, А | Номинальная выходная мощность, Вт | Номинальное напряжение на нагрузке, В | Номинальный ток нагрузки, А | | | | | | |
| 1 | УМ3П.15.15 | 267 | 330 | 0,81 | 318 | 192 | 1,58 | 13 | 7 200 | 206 | 210 | 187 | 11,5 |
| 2 | УМ3П.15.21 | 428 | 330 | 1,13 | 390 | 192 | 2,03 | 13 | 9 000 | 204 | 210 | 187 | 13,6 |
| 3 | УМ3П.15.30 | 493 | 330 | 1,5 | 557 | 192 | 2,9 | 13 | 9 200 | 251 | 210 | 187 | 16,0 |
| 4 | УМ3П.20.20 | 878 | 360 | 2,44 | 910 | 210 | 4,33 | 15 | 11 500 | 246 | 250 | 234 | 25,0 |
| 5 | УМ3П.20.28 | 1210 | 360 | 3,37 | 1267 | 210 | 6,03 | 15 | 12 000 | 270 | 250 | 234 | 30,0 |
| 6 | УМ3П.20.40 | 1580 | 360 | 4,4 | 1664 | 210 | 7,92 | 15 | 10 700 | 305 | 250 | 234 | 35,0 |
| 7 | УМ3П.25.25 | 1880 | 370 | 5,1 | 1830 | 215 | 8,5 | 15 | 11 700 | 280 | 290 | 300 | 42,0 |
| 8 | УМ3П.25.35 | 2620 | 370 | 7,1 | 2730 | 215 | 12,7 | 15 | 12 200 | 310 | 290 | 300 | 53,0 |
| 9 | УМ3П.25.50 | 3750 | 375 | 10,0 | 3940 | 219 | 18,0 | 15 | 12 200 | 354 | 290 | 300 | 61,0 |
| 10 | УМ3П.32.32 | 4900 | 380 | 12,9 | 4730 | 220 | 21,5 | 23 | 16 000 | 352 | 355 | 350 | 90,0 |

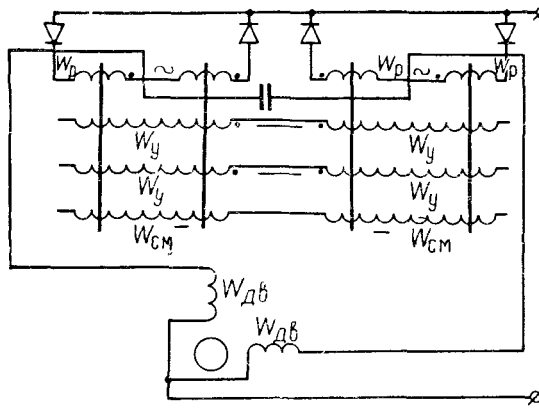



Рис. 22 21. Схема двухфазного реверсивного двигателя-усилителя типа РДУ с полым ротором.

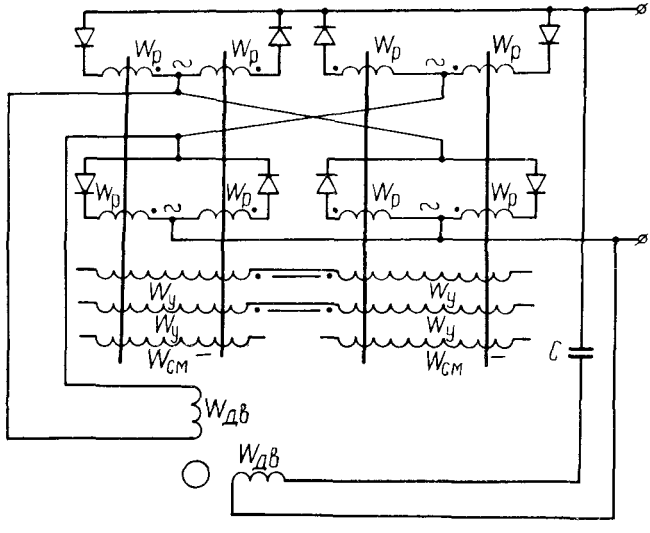



Рис. 22.22. Схема двухфазного реверсивного двигателя-усилителя типа РДУ с короткозамкнутым ротором.

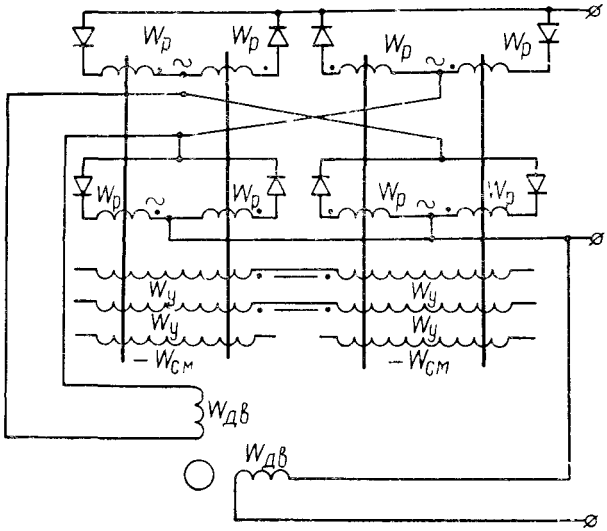



Рис. 22.23. Схема трехфазного реверсивного двигателя-усилителя типа РТДУ.

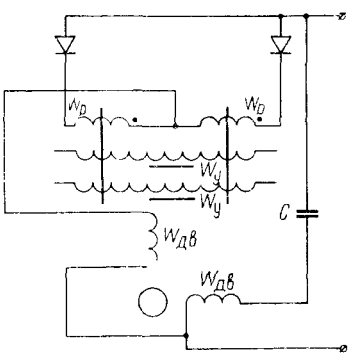



Рис 22 24. Схема двухфазного нереверсивного двигателя-усилителя типа НДУ.

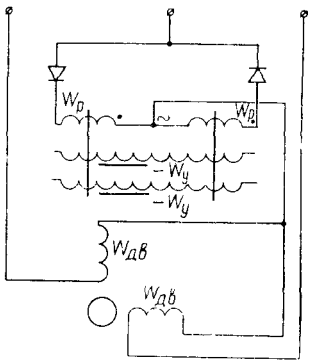
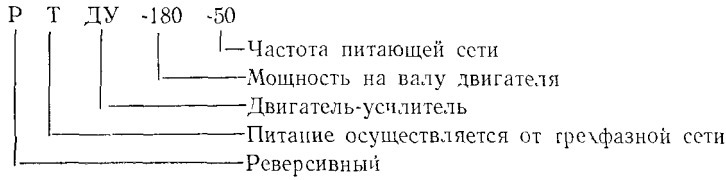



Рис. 22.25. Схема трехфазного нереверсивного двигателя-усилителя типа НТДУ.

Обозначение типа двигателя-усилителя расшифровывается таким образом (пример):




Технические данные двигателей-усилителей серии ДУ приведены в табл. 22.16.

Изменение направления вращения в реверсивном двигателе-усилителе осуществляется изменением чередования фаз напряжения на обмотке двигателя с помощью двухтактного магнитного усилителя. Нереверсивные двигатели-усилители имеют однотактный магнитный усилитель. Регулирование частоты вращения

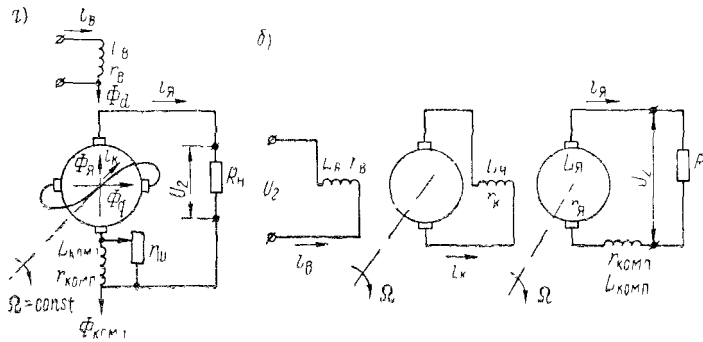



Рис. 22.26. Электромашинный усилитель поперечного поля: *а* — принципиальная схема; *б* — эквивалентная схема.

двигателя-усилителя осуществляется путем изменения напряжения, подводимого к двигателю, с помощью магнитного усилителя, включенного последовательно с управляющей фазой обмотки двигателя.

Двигательные обмотки выполнены двухфазными с пространственным сдвигом 90°, что позволяет использовать четыре однотактных магнитных усилителя в реверсивной схеме, один или два — в нереверсивной.

**Электромашинные усилители.** В системах автоматического управления электромашинные усилители применяются в качестве оконечных каскадов усилителей мощности. В группу электрических машин под названием «электромашинные усилители» входят электромашинные усилители поперечного поля, электромашинные усилители продольного и продольно-поперечного поля. В судовых автоматических системах наибольшее распространение получили электромашинные усилители поперечного поля.

Принцип действия электромашинного усилителя поперечного поля, принципиальная схема которого изображена на рис. 22 26, *а*, состоит в следующем. Ток $i_в$, протекающий по обмотке возбуждения, создает продольный магнитный поток $\Phi_d$. Этот поток на поперечных накоротко замкнутых между собой щетках якоря наводит электродвижущую силу $e_к$, в результате чего в короткозамкнутых витках обмотки якоря появляется ток $i_к$. Ток $i_к$ создает поперечный магнитный поток $\Phi_q$, порождающий электродвижущую силу $e_2$, которая используется в качестве источника питания рабочей цепи. Таким образом, электромашинный усилитель поперечного поля имеет две ступени усиления: первую — от обмотки возбуждения к короткозамкнутым виткам обмотки якоря и вторую — от коротко-

**Технические данные двигателей-усилителей серии ДУ**

| Тип двигателя-усилителя | Номинальная мощность $P_2$, Вт | Напряжение сети $U_c$, В | Частота $f$, Гц | Номинальный ток статора $I$, А | К. п. д., % | Коэффициент мощности | Емкость $C$, мкФ | Синхронная частота вращения $n$, об/мин | Номер рисунка, на котором показана электрическая схема | Тип ротора | Момент инерции ротора $J$, гс м/с$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| РДУ-5 50 | 5 | 127 | 50 | 0,8 | 20 | 0,5 | 10 | 3000 | 22 21 | Полый стакан | 0,2 |
| РДУ-20-50 | 20 | 127 | 50 | 1,3 | 20 | 0,6 | 30 | 3000 | 22 21 | То же | 0,206 |
| РДУ-90-50 | 90 | 127 | 50 | 1,6 | 38 | 0,85 | 25 | 3000 | 22 22 | Короткозамкнутый | 5,4 |
| РДУ-180 50 | 180 | 127 | 50 | 3,2 | 42 | 0,9 | 45 | 3000 | 22.22 | То же | 7,3 |
| РТДУ-180-50 | 180 | 220 | 50 | 1,4 | 52 | 0,9 | — | 3000 | 22 23 | Короткозамкнутый | 31,8 |
| РТДУ-370-50 | 370 | 220 | 50 | 2,8 | 63 | 0,85 | — | 3000 | 22 23 | То же | 41,5 |
| РТДУ-750-50 | 750 | 380 | 50 | 5 | 68 | 0,8 | — | 3000 | 22 23 | » | 225 |
| РТДУ-1500 50 | 1500 | 380 | 50 | 10,0 | 70 | 0,75 | — | 3000 | 22 23 | » | 308 |
| РДУ-5 400 | 5 | 115 | 400 | 0,4 | 20 | 0,85 | 1,5 | 6000 | 22 21 | Полый стакан | 0,18, |
| РДУ-180 400 | 180 | 115 | 400 | 3,85 | 45 | 0,9 | 15 | 6000 | 22 22 | Короткозамкнутый | 5,4 |
| НДУ-250-50 | 250 | 127 | 50 | 4,7 | 44 | 0,95 | 32 | 3000 | 22 24 | То же | 5 |
| НТДУ-250-50 | 250 | 220 | 50 | 2,0 | 63 | 0,94 | — | 3000 | 22 25 | Короткозамкнутый | 20,2 |
| НТДУ-550-50 | 550 | 220 | 50 | 3,5 | 64 | 0,95 | — | 3000 | 22.25 | То же | 30,6 |
| НТДУ-1500-50 | 1500 | 380 | 50 | 5,1 | 65 | 0,96 | — | 3000 | 22 25 | » | 210 |

*Продолжение табл. 22.16*

| Тип двигателя-усилителя | Пределы регулирования частоты вращения | Длительно допустимый ток управления $I_{упр}$, мА | Сопротивление обмотки управления $r_{упр}$, Ом | Сопротивление обмотки смещения $r_{см}$, Ом | Максимальный ток управления $I_{упр\ max}$, мА | Коэффициент усиления по мощности | Тип диода | Масса, кг | Габарит, мм | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| РДУ-5-50 | 1 : 20 | 20 | 980 | 130 | 100 | 200 | Д303 | 10 | 100×150 | Без учета выходных концов вала |
| РДУ-20-50 | 1 : 20 | 20 | 147 | 256 | 100 | 200 | Д303 | 14,6 | 208×150 | |
| РДУ-90 50 | 1 : 20 | 20 | 560 | 160 | 100 | 400 | Д303 | 14 | 170×200 | |
| РДУ-180-50 | 1 : 20 | 20 | 850 | 280 | 100 | 500 | Д303 | 19 | 265×200 | |
| РТДУ-180-50 | 1 : 20 | 50 | 455 | 130 | 150 | 150 | Д303 | 23 | 360×260 | С учетом выходных концов вала |
| РТДУ-370 50 | 1 : 20 | 50 | 650 | 170 | 150 | 150 | Д303 | 31 | 420×260 | |
| РТДУ-750-50 | 1 : 10 | 100 | 400 | 140 | 300 | 200 | Д233 | 56 | 402×390 | |
| РТДУ-1500 50 | 1 : 10 | 100 | 650 | 190 | 300 | 200 | Д233 | 76 | 542×390 | |
| РДУ-5 400 | 1 : 20 | 20 | 540 | 155 | 100 | 200 | Д303 | 5,6 | 140×180 | Без учета выходных концов вала |
| РДУ-180-400 | 1 : 20 | 20 | 270 | 90 | 100 | 1600 | Д303 | 16 | 220×200 | |
| НДУ-250 50 | 1 : 20 | 20 | 320 | — | 100 | 2000 | Д303 | 16,8 | 208×200 | |
| НТДУ-250-50 | 1 : 20 | 50 | 700 | — | 150 | 150 | Д303 | 21 | 296×255 | С учетом выходных концов вала |
| НТДУ-550-50 | 1 : 10 | 50 | 1100 | — | 150 | 200 | Д303 | 33 | 376×375 | |
| НТДУ-1500-50 | 1 : 10 | 100 | 950 | — | 300 | 1500 | Д233 | 75 | 413×375 | |

замкнутых витков обмотки якоря к рабочей цепи. Эквивалентная схема электромашинного усилителя поперечного поля в виде последовательно соединенных двух генераторов с независимым возбуждением представлена на рис. 22.26, *б*.

Для компенсации поперечного размагничивающего потока, который появляется при протекании через якорь электромашинного усилителя тока нагрузки, последовательно с нагрузкой включается компенсационная обмотка. С помощью сопротивления $r_{ш}$ регулируется степень компенсации потока. Электромашинные усилители поперечного поля, применяемые в системах автоматического управления, обычно имеют недокомпенсацию 10—15%.

Статическая характеристика электромашинного усилителя имеет вид гистерезисной петли (рис. 22.27), ширина которой достигает 5—10 В и обусловлена остаточным магнитным потоком в магнитной системе усилителя.

Передаточная функция электромашинного усилителя, полученная при условии постоянной частоты вращения якоря генератора при любом изменении нагрузки, имеет вид

$$W(p) = \frac{k}{(T_{в}p + 1)(T_{к}p + 1)(T_{я}p + 1)}, \qquad (22.7)$$

где $T_{в}$ — постоянная времени обмотки возбуждения

$$T_{в} = \frac{L_{в}}{r_{в}};$$

$T_{к}$ — постоянная времени короткозамкнутой части якоря

$$T_{к} = \frac{L_{я}}{r_{к}};$$

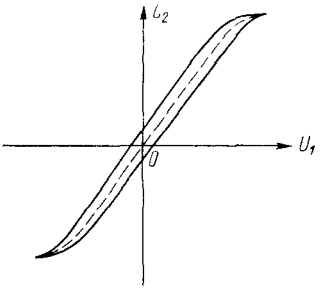



Рис. 22.27. Статическая характеристика электромашинного усилителя поперечного поля.

$T_{я}$ — постоянная времени нагруженной части якоря

$$T_{я} = \frac{L_{я} + L_{комп}}{r_{я} + R_{н} + r_{комп}};$$

$r_{в}$, $r_{к}$, $r_{я}$, $R_{н}$, $r_{комп}$ — активные сопротивления; $L_{в}$, $L_{я}$, $L_{комп}$ — индуктивности; $k$ — коэффициент усиления, $p \equiv d/dt$.

В том случае, когда сопротивление нагрузки $R_{н}$ велико, принимают $T_{я} \simeq 0$.

При малом выходном сопротивлении предварительного усилителя постоянная времени $T_{в} \simeq 0{,}01$—$0{,}05$ с. Постоянная времени $T_{к}$ зависит от мощности усилителя и имеет значения в пределах 0,03—0,08 с.

Коэффициент усиления по напряжению $k_{U} = 4$—$10$, коэффициент усиления по мощности у некоторых электромашинных усилителей поперечного поля достигает 20 000.

Отечественной промышленностью выпускаются электромашинные усилители поперечного поля общепромышленного применения с мощностью от 200 до 100 кВт.

В табл. 22.17—22.20 приведены технические данные некоторых электромашинных усилителей поперечного поля типа ЭМУ-5А, ЭМУ-12А, ЭМУ-5П, ЭМУ-12П в морском исполнении. Усилители типа ЭМУ-5А выпускаются 30 разновидностей, типа ЭМУ-12А — 85 разновидностей, типа ЭМУ-5П — 5 разновидностей, типа ЭМУ-12П — 23 разновидностей.

Изделия серии ЭМУ в морском исполнении выполнены в виде агрегата, состоящего из электромашинного усилителя и приводного электродвигателя, конструктивно сопряженных на общем валу и в общем корпусе. В усилителях типа ЭМУ-5А, ЭМУ-12А в качестве приводного электродвигателя используется асинхронный электродвигатель трехфазного тока, в усилителях типа ЭМУ-5П, ЭМУ-12А — электродвигатель постоянного тока. Приводные асинхронные электродвигатели изготовлены на частоту 50 Гц. Условия работы электромашинных

**Технические данные электромашинных уси**

| Испол нение | Генератор (усили | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Напряжение, В | Мощность, кВт | Сила тока, А | Обмотка управления I | | Обмотка управления II | |
| | | | | Число витков | Сопро тивление, Ом | Число витков | Сопро тивление, Ом |
| 41 | 60 | 0,5 | 8,3 | 3250 | 1000 | 3250 | 1000 |
| 42 | | | | | | | |
| 43 | | | | | | | |
| 44 | | | | | | | |
| 45 | | | | | | | |
| 61 | 115 | 0,5 | 4,35 | 475 | 100 | 510 | 50 |
| 62 | | | | | | | |
| 63 | | | | | | | |
| 64 | | | | | | | |
| 65 | | | | | | | |
| 71 | 115 | 0 5 | 4,35 | 300 | 20 | 292 | 20 |
| 72 | | | | | | | |
| 73 | | | | | | | |
| 74 | | | | | | | |

**Технические данные электромашинных уси**

| Испол нение | Генератор (усили | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Напряжение, В | Мощность кВт | Сила тока, А | Обмотка управления I | | Обмотка управления II | |
| | | | | Число витков | Сопро тивление Ом | Число витков | Сопро тивление, Ом |
| С11 | 115 | 1,0 | 8 7 | 1300 | 166 | 1300 | 166 |
| С12 | | | | | | | |
| С13 | | | | | | | |
| С14 | | | | | | | |
| С15 | | | | | | | |
| Ж11 | 115 | 1,0 | 8,7 | 900 | 155 | 900 | 155 |
| Ж12 | | | | | | | |
| Ж13 | | | | | | | |
| Ж14 | | | | | | | |
| Ж15 | | | | | | | |
| З11 | 115 | 1 0 | 8 7 | 790 | 184 | 900 | 155 |
| З12 | | | | | | | |
| З13 | | | | | | | |



*Таблица 22.17*

**лителей поперечного поля типа ЭМУ-5А**

| тель) | | | | Приводной электродвигатель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обмотка управления III | | Обмотка управления IV | | Входная мощность Вт | Частота вращения, об/мин | Частота, Гц | Напряжение В | Сила тока А |
| Число витков | Сопротивление Ом | Число витков | Сопротивление Ом | | | | | |
| — | — | — | — | 0 4 | 2850 | 50 | 220 380 | 3,1 1 8 |
| | | | | | | | 127 220 | 5,4 3 1 |
| | | | | | 3500 | 60 | 220 440 | 3,1 1,55 |
| | | | | | 2850 | 50 | 240/415 | 2,85/1,65 |
| | | | | | | | 230/400 | 2,97/1,72 |
| 475 | 100 | 510 | 50 | 0,8 | 2850 | 50 | 220 380 | 3,1/1,8 |
| | | | | | | | 127/220 | 5 4 3,1 |
| | | | | | 3500 | 60 | 220 440 | 3,1/1,55 |
| | | | | | 2850 | 50 | 240/415 | 2,85 1,65 |
| | | | | | | | 230 400 | 2 97/1,72 |
| 300 | 20 | 292 | 20 | 0,8 | 2850 | 50 | 220/380 | 3 1/1,8 |
| | | | | | | | 127 220 | 5,4 3,1 |
| | | | | | 3500 | 60 | 220 440 | 3,1 1,55 |
| | | | | | 2850 | 50 | 240 415 | 2,85 1,65 |
| | | | | | | | 230 400 | 2 97 1,72 |

*Таблица 22 18*

**лителей поперечного поля типа ЭМУ-12А**

| тель) | | | | Приводной электродвигатель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Обмотка управления III | | Обмотка управления IV | | Входная мощность, Вт | Частота вращения, об/мин | Частота, Гц | Напряжение, В | Сила тока, А |
| Число витков | Сопротивление Ом | Число витков | Сопротивление Ом | | | | | |
| — | — | — | — | 0,4 | 2850 | 50 | 220 380 | 5,4/3,15 |
| | | | | | | | 127 220 | 9,4/5,4 |
| | | | | | 3500 | **60** | **220**/440 | 5 4 2,7 |
| | | | | | 2850 | 50 | 240/415 | 5,0 2,9 |
| | | | | | | | 230/400 | 5,0 3,0 |
| 1350 | 367 | — | — | 0,6 | 2850 | 50 | 220/380 | 5,4 3,15 |
| | | | | | | | 127 220 | 9,4 5,4 |
| | | | | | 3500 | 60 | 220/440 | 5,4/2,7 |
| | | | | | 2850 | 50 | 210/415 | 5,0/2,9 |
| | | | | | | | 230/400 | 5,2 3,0 |
| 790 | 184 | 900 | 155 | 0,8 | 2850 | 50 | 200 380 | 5,4 3,15 |
| | | | | | | | 127 220 | 9,4/5,4 |
| | | | | | 3500 | 60 | 220 440 | 5,4/2,7 |
| | | | | | 2850 | 50 | 240 415 | 5,0 2,9 |
| | | | | | | | 230/400 | 5,0/3,0 |

## Технические данные электромашинных усилителей поперечного типа ЭМУ-5П

*Таблица 22.19*

| Исполнение | Генератор (усилитель) | | | | | | | | | Обмотка управления IV | | Входная мощность, Вт | Приводной двигатель | | | | К п д агрегата |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Напряжение, В | Мощность, кВт | Сила тока, А | Обмотка управления I | | Обмотка управления II | | Обмотка управления III | | | | | | | | | |
| | | | | Число витков | Сопротивление, Ом | Число витков | Сопротивление, Ом | Число витков | Сопротивление, Ом | Число витков | Сопротивление, Ом | | Частота вращения, об/мин | Потребляемая мощность, кВт | Напряжение, В | Сила тока, А | |
| А121 | 115 | 0,35 | 3,0 | 3250 | 1000 | 3250 | 1000 | | | | | 0,4 | 2850 | 0,7 | 220 | 3,2 | 0,5 |
| Б121 | | | | 5300 | 3000 | 5300 | 3000 | | | | | 0,4 | | | | | |
| З121 | | | | 1625 | 475 | 1625 | 525 | 1625 | 475 | 1625 | 525 | 0,8 | | | | | |
| А112 | 115 | 0,7 | 6,1 | 3250 | 1000 | 3250 | 1000 | | | | | 0,4 | 5000 | 1,3 | 110 | 11,8 | 0,54 |
| Б112 | | | | 5300 | 3000 | 5300 | 3000 | | | | | | | | | | |

## Технические данные электромашинных усилителей поперечного поля типа ЭМУ-12П

*Таблица 22.20*

| Исполнение | Генератор (усилитель) | | | | | | | Обмотка управления III | | Входная мощность, Вт | Приводной двигатель | | | | К п д агрегата |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Напряжение, В | Мощность, кВт | Сила тока, А | Обмотка управления I | | Обмотка управления II | | Число витков | Сопротивление, Ом | | Частота вращения, об/мин | Потребляемая мощность, кВт | Напряжение, В | Сила тока, А | |
| | | | | Число витков | Сопротивление, Ом | Число витков | Сопротивление, Ом | | | | | | | | |
| С11 | 115 | 1,0 | 8,7 | 1300 | 166 | 1300 | 166 | — | — | 0,4 | 3000 | 1,8 | 220 | 8,2 | 0,555 |
| С33 | | 1,0 | 11,3 | | | | | | | | 3500 | 2,2 | 110 | 20 | 0,59 |
| Г11 | 115 | 1,0 | 8,7 | 3000 | 1550 | 3000 | 1550 | 3000 | 1345 | 0,6 | 3000 | 1,8 | 220 | 8,2 | 0,555 |
| Г33 | | 1,3 | 11,3 | | | | | | | | 3500 | 3,2 | 110 | 20 | 0,59 |
| Д11 | 115 | 1,0 | 8,7 | 2350 | 1340 | 2350 | 1340 | 460 | 34,2 | 0,6 | 3000 | 1,8 | 220 | 8,2 | 0,555 |
| Д33 | | 1,3 | 11,3 | | | | | | | | 3500 | 2,2 | 110 | 20 | 0,59 |
| Е11 | 115 | 1,0 | 8,7 | 830 | 161 | 570 | 84 | 740 | 72 | | 3000 | 1,8 | 220 | 8,2 | 0,555 |
| Е33 | | 1,3 | 11,3 | | | | | | | | 3500 | 2,2 | 110 | 20 | 0,59 |
| Ж11 | 115 | 1,0 | 8,7 | 900 | 155 | 900 | 155 | 1350 | 367 | | 3000 | 1,8 | 220 | 8,2 | 0,555 |
| Ж33 | | 1,3 | 11,3 | | | | | | | | 3500 | 2,2 | 110 | 20 | 0,59 |
| Я11 | 115 | 1,0 | 8,7 | 1550 | 570 | 1550 | 570 | 36 | 0,215 | | 3000 | 1,8 | 220 | 8,2 | 0,555 |

усилителей поперечного поля в морском исполнении следующие: температура окружающего воздуха — от —40 до +50° С, относительная влажность — до 95%, допускается периодический наклон оси усилителя относительно оси горизонта до 45°, длительный наклон — до 15°.

**Сравнительный анализ электрических усилителей.** Электронные усилители при выходной мощности до 10 Вт наиболее часто применяются в качестве предварительных усилителей — усилителей напряжения и тока. Ламповые усилители могут быть выполнены с большим входным сопротивлением — до $10^{12}$ Ом, полупроводниковые — до $10^6$ Ом. Это позволяет легко согласовать выход чувствительного элемента с входом усилителя. Ламповые усилители имеют срок службы до 10 000 ч. Полупроводниковые усилители отличаются по сравнению с электронными лампами большей надежностью, малой массой и размерами, ударостойкостью. Полупроводниковые усилители имеют срок службы до 100 000 ч и могут выдерживать ускорение до 1000 $g$. К. п. д. полупроводниковых усилителей достигает 80%. К отрицательным свойствам полупроводниковых усилителей следует отнести значительный разброс параметров и зависимость параметров и характеристик от температуры окружающей среды.

Магнитные усилители применяются в предоконечных и оконечных каскадах при выходной мощности от нескольких ватт до сотен киловатт. Постоянная времени усилителя находится в пределах десятых и сотых долей секунды и линейно зависит от коэффициента усиления по мощности. Преимущества магнитного усилителя выражаются в его надежности, простоте в эксплуатации, отсутствии вращающихся и трущихся деталей, бесшумности в работе. Машинный усилитель допускает кратковременные значительные перегрузки по току и легко может быть переведен в категорию взрывобезопасного и химостойкого оборудования. Магнитный усилитель имеет достаточно высокое быстродействие. Однако быстродействие полупроводниковых транзисторов и тиристоров выше, поэтому в системах, требующих высокого быстродействия, полупроводниковые усилители предпочтительнее; но эти приборы менее надежны по сравнению с магнитными усилителями и не переносят токовых перегрузок.

Повышение быстродействия магнитных усилителей достигается применением магнитных усилителей повышенной частоты в качестве промежуточных.

Электромашинные усилители используются в основном в оконечных каскадах при выходной мощности от сотен ватт до тысяч киловатт. Коэффициент усиления по мощности у электромашинных усилителей достигает $10^4$, мощность управления — 1 Вт. Однако при эксплуатации усилителей требуется тщательный уход за щетками и коллектором.

## § 23. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

К разновидности аналоговых счетно-решающих устройств относятся операционные (решающие) усилители. Ими являются усилители постоянного тока с большим коэффициентом усиления (ламповые, полупроводниковые и магнитные), с глубокой отрицательной обратной связью по напряжению и с подключенными на вход и в обратную связь функциональными элементами (сопротивлениями, емкостями и индуктивностями).

Операционные усилители применяются как средство моделирования математических операций и решения линейных и нелинейных дифференциальных уравнений. В частности, они выполняют операции умножения, дифференцирования, интегрирования, инвертирования (изменение знака входного сигнала), воспроизводства типовых динамических звеньев, существенных нелинейностей и корректоров автоматических систем. Операционные усилители предоставляют широкие возможности для преобразования сигналов и позволяют получить любую передаточную функцию. Они используются для построения аналоговых устройств, аналоговых вычислительных машин, а также самонастраивающихся систем автоматического управления.

Основными характеристиками операционных усилителей являются входное напряжение, коэффициент усиления, полоса пропускания частот, напряжение питания, потребляемая и выходная мощности, сопротивления входа и выхода и нагрузка.

Операционные усилители обладают высокими быстродействием и устойчивостью, рассчитываются на значительный диапазон входных напряжений и частот, имеют линейные или близкие к линейным статические характеристики, очень высокое входное и очень низкое выходное сопротивления (что облегчает соединение усилителей с другими устройствами и системами). Стабильность и точность работы операционных усилителей практически не зависят от изменения параметров и напряжения питания и определяются только стабильностью параметров цепей входа и обратной связи. Операционные усилители сложны и стоимость их высока.

Функциональная схема операционного усилителя, выполняющего функцию умножения, показана на рис. 23.1. Отрицательная обратная связь обеспечивает стабильность и высокую устойчивость работы операционного усилителя, ослабляет нелинейные искажения сигнала.

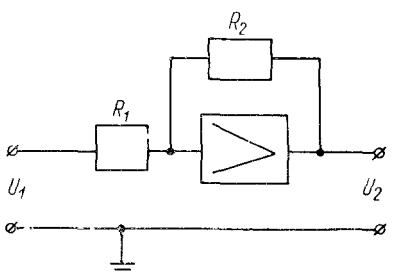



Рис. 23.1. Функциональная схема операционного усилителя.

Коэффициент усиления операционного усилителя

$$k_{oy} = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_2 \beta k}{R_1 (1 + \beta k)} < k, \quad (23\ 1)$$

где $k$ — коэффициент усиления усилителя постоянного тока, $\beta$ — коэффициент обратной связи

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

С ростом $\beta k$ глубина обратной связи увеличивается, дрейф нуля уменьшается, частотные характеристики улучшаются *.

При $k \gg 1$, $\frac{R_1 + R_2}{k} \approx R_1$ и $k_{oy} \simeq -\frac{R_2}{R_1}$,

а при $R_1 = R_2$ $k_{oy} \simeq -1$. Входное и выходное сопротивления соответственно равны

$$R_{вх} = R_1 - \frac{R_2}{1 - k} \simeq R_1; \quad (23\ 2)$$

$$R_{вых} = \frac{R'_{вых}}{1 + \beta k}, \quad (23\ 3)$$

где $R'_{вых}$ — выходное сопротивление усилителя постоянного тока.

С ростом $R_1$, $R_2$ и $k$ увеличивается $R_{вх}$ и уменьшается $R_{вых}$, что благоприятно отражается на нагрузочных характеристиках операционного усилителя. Наличие общей точки (земли) для всей схемы операционного усилителя упрощает соединение этих усилителей, а также исключает их влияние друг на друга вследствие изоляции нулевым потенциалом узловой точки.

Усилитель постоянного тока несимметричной схемы имеет нечетное число каскадов (обычно 3), что делает обратную связь отрицательной. В ряде случаев операционные усилители могут состоять из нескольких параллельных каналов усиления (низких, средних и высоких частот) с последующим суммированием сигналов в широкополосном усилителе и усилителе мощности.

Напряжение дрейфа нуля не должно превышать 1—2 мВ в течение 10 мин. Дрейф нуля вызывается изменением питающих напряжений, температуры,

* Дрейфом нуля называется медленное самопроизвольное изменение выходного напряжения при неизменном или отсутствующем входном напряжении

параметров элементов схемы из-за их старения и механическим смещением электродов из-за вибраций и сотрясений. Для уменьшения дрейфа нуля применяют предварительный прогрев усилителей, стабилизацию напряжения источников питания, балансные и компенсационные схемы усилителей, элементы с нелинейной зависимостью параметров от температуры, уменьшение анодных напряжений. В ламповых усилителях дрейф нуля снижают параметрической компенсацией, автоматическим регулированием нулевого уровня, стабилизацией питающего напряжения и тока накала ламп и применением балансных схем входных каскадов. В полупроводниковых усилителях дрейф нуля обусловлен в основном температурным изменением параметров.

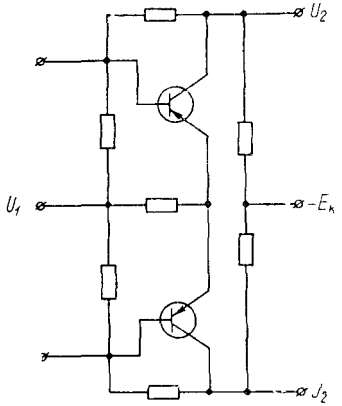



Рис. 23 2. Принципиальная схема однокаскадного операционного усилителя.

$E_к$ — напряжение питания коллектора.

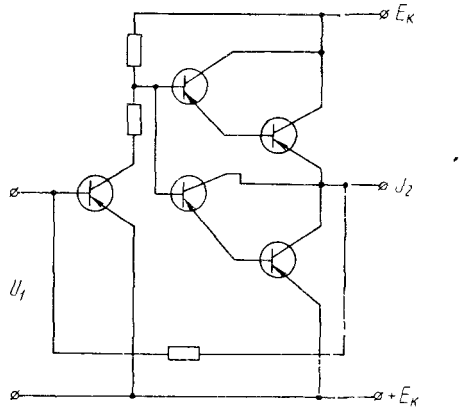



Рис. 23.3. Принципиальная схема трехкаскадного операционного усилителя.

Принципиальная схема однокаскадного операционного усилителя с полупроводниковым усилителем постоянного тока, выполненного по балансной схеме, показана на рис. 23.2. Ряд таких каскадов позволяет получить необходимый коэффициент усиления $k_{оу}$. Такой усилитель характеризуется следующими данными $U_1 = 25—100$ мВ, $k_{оу} = 100—200$, полоса пропускания 0—3 кГц, питающее напряжение 25 В, сопротивление нагрузки 20 кОм, потребляемая мощность 0,1 Вт

На рис. 23.3 изображена принципиальная схема операционного усилителя с трехкаскадным полупроводниковым усилителем постоянного тока. Первый каскад выполнен с несимметричным входом, переход от первого ко второму двухтактному каскаду сделан без фазоинвертора, так как триоды второго каскада имеют различную проводимость. Оконечный каскад выполнен по двухтактной последовательной схеме. Связь каскадов — гальваническая. Данные усилителя: $U_1 = 25$ мВ, полоса пропускания 0—6 кГц, питающие напряжение 9 В, сопротивление нагрузки 4—10 Ом, потребляемая мощность 0,45 Вт, выходная мощность 250 мВт.

Ниже рассмотрены основные данные операционного усилителя ФЭ-11. Четырехкаскадный ламповый операционный усилитель ФЭ-11 является счетно-решающим усилителем постоянного тока с глубокой отрицательной обратной связью (рис. 23.4). Для обеспечения малого дрейфа первые два каскада собраны по балансным схемам. В третьем каскаде осуществляется преобразование двухтактного выхода второго каскада в однотактный. Четвертый каскад обеспечивает необходимую мощность выходного сигнала. Входными и выходными величинами являются напряжения постоянного тока, меняющиеся в диапазоне $\pm 100$ В. Коэффициент усиления изменяется от $1 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ при изменении частоты

от 0 до 50 Гц Диапазон регулирования выходного напряжения, приведенного к входу, равен ±75 В с допуском 30%. Напряжение анод — катод лампы составляет 92±5 В, минимальное выходное напряжение — 120 В. Дрейф выходного напряжения при скачкообразном изменении накала на 0,1 В не превышает ±3 мВ.

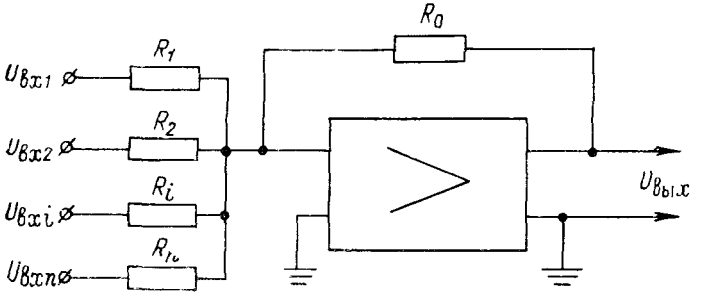



Рис. 23.4. Функциональная схема операционного усилителя ФЭ-11.

Изменение выходного напряжения, приведенного к входу, при изменении температуры окружающей среды на 1° С составляет не более 0,3 мВ. Рабочая температура лежит в пределах 5—55° С при относительной влажности окружающей среды до 80%. Время непрерывной работы — 6 ч после часового прогрева. Сеточный ток входного каскада усилителя составляет не более $2 \cdot 10^{-10}$ А. Величина переменной составляющей на выходе, приведенная к входу, не превышает 0,5 мВ (при пульсации с частотой 50 Гц). Сопротивление нагрузки должно быть не ниже 10 кОм при сопротивлении в цепи анода выходного каскада ±5 кОм. Нормальная работа обеспечивается при подключении к входной сетке емкости до 200 пФ, а к выходу — до 10 000 пФ при входном (эквивалентном) сопротивлении от 10 до 5,1 кОм и сопротивлении обратной связи от 50 до 5,1 кОм. Максимальная потребляемая мощность равна 32 Вт.

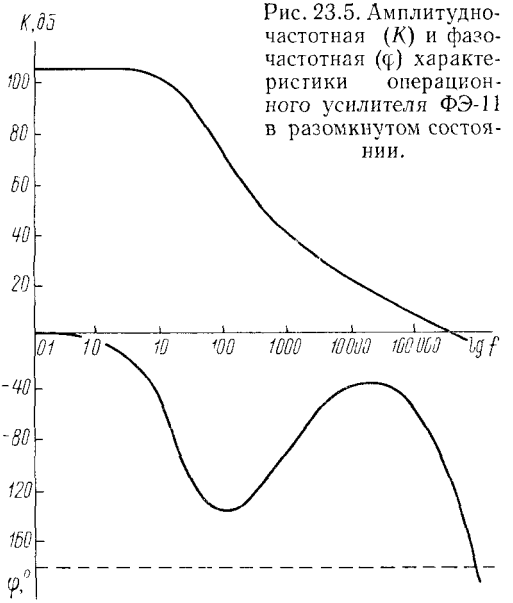



Рис. 23.5. Амплитудно-частотная ($K$) и фазочастотная ($\varphi$) характеристики операционного усилителя ФЭ-11 в разомкнутом состоянии.

Усилитель выполняет следующие функции: суммирование, умножение на постоянный множитель, инвертирование, интегрирование и дифференцирование. Питание первых трех каскадов осуществляется от стабилизированных источников питания +350, —350 и —200 В, питание анода четвертой лампы — от нестабилизированного источника +350 В Цепи накала ламп питаются напряжением 5,6 и ~6,3В.

Габарит усилителя 161×38×123. Частотные характеристики усилителя приведены на рис. 23 5.

Типовые функциональные схемы операционных усилителей сведены в табл. 23.1, в которой указаны назначение усилителей и реализуемые ими передаточные функции.

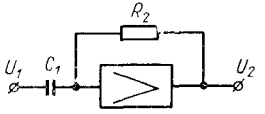
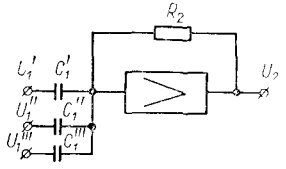
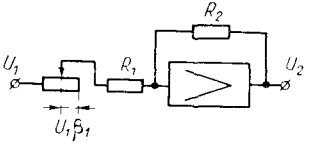
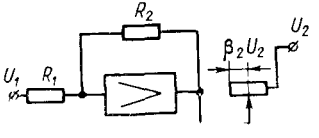
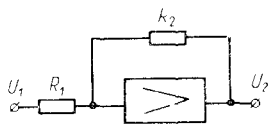
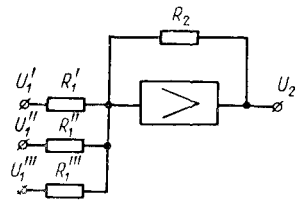
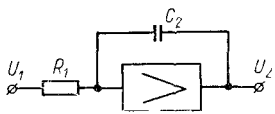
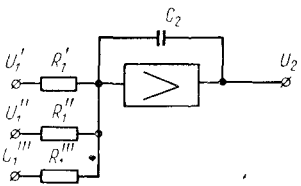
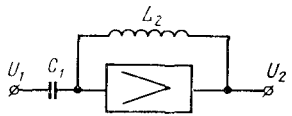
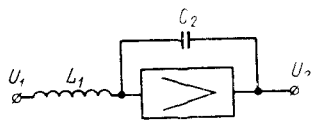
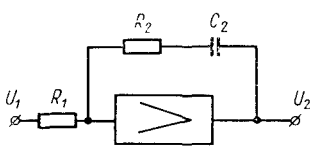
| | | |
|---|---|---|
|  | Дифференцирование | $W(p) = -R_2C_1p$ |
|  | Дифференцирование суммы | $W(p) = -R_2\sum_{i=1}^{n} C_1p$ |
|  | Умножение на коэффициент $\beta_1 < 1$ | $W(p) = -\frac{R_2}{R_1}\beta_1$ |
|  | Деление на коэффициент $\beta_2 < 1$ | $W(p) = -\frac{R_2}{R_1\beta_2}$ |

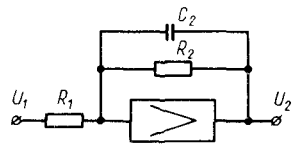
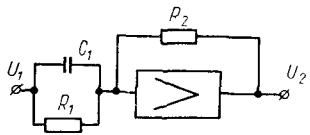
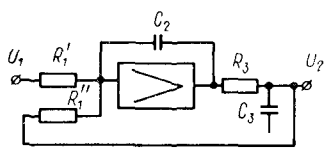
*Таблица 23.1*

**Функциональные схемы, назначение и передаточные функции операционных усилителей**

| Схема | Назначение | Передаточная функция |
|---|---|---|
|  | Изменение знака и умножение на постоянный коэффициент | $W(p) = -\frac{R_2}{R_1}$ |
|  | Суммирование | $W(p) = -R_2 \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_1^i}$ |
|  | Интегрирование | $W(p) = -\frac{1}{R_1 C_2 p}$ |
|  | Интегрирование суммы | $W(p) = -\frac{1}{C_2 p} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_1^i}$ |

| | | |
|---|---|---|
|  | Двойное дифференцирование | $W(p) = -L_2C_1p^2$ |
|  | Двойное интегрирование | $W(p) = -\frac{1}{L_1C_2p^2}$ |
|  | Воспроизведение последовательного соединения интегрирующего и форсирующего звеньев | $W(p) = -\frac{(R_2C_2p + 1)}{R_1C_2p}$ |

*Продолжение табл. 23.1*

| Схема | Назначение | Передаточная функция |
|---|---|---|
|   | Воспроизведение апериодического звена первого порядка | $W(p) = -\dfrac{R_2}{R_1(R_2C_2p + 1)}$ |
|   | Воспроизведение форсирующего звена | $W(p) = -\dfrac{R_2}{R_1}(R_1C_1p + 1)$ |
|   | Воспроизведение звена второго порядка:<br>колебательного при $4C_3R_3 > R_1''C_2$<br>апериодического при $4C_3R_3 < R_1''C_2$ | $W(p) = -\dfrac{R_1''}{R_1'(R_1''R_3C_3C_2p^2 + C_2R_1''p + 1)}$ |

# § 24. РЕЛЕ И ДРУГИЕ ДИСКРЕТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Широкий класс приборов, в которых выходная величина $x_{\text{вых}}$ изменяется скачком по достижении определенного значения входной величины $x_{\text{вх}}$, называют *реле*. Статическая характеристика реле дана на рис. 24.1.

Отношение величины отпускания к величине срабатывания представляет собой коэффициент возврата:

$$K_{\text{в}} = \frac{x_{\text{вх}\,1}}{x_{\text{вх}\,2}}.$$

Обычно $x_{\text{вх}1} < x_{\text{вх}2}$ и коэффициент возврата равен $K_{\text{в}} = 0{,}2—0{,}95$.

Для надежного поддержания выходного значения $x_{\text{вых}}$ необходимо, чтобы $x_{1\text{х}} = x_{1\text{х}3}$ была больше величины срабатывания $x_{\text{вх}2}$. Отношение

$$K_{\text{з}} = \frac{x_{\text{вх}\,3}}{x_{\text{вх}\,2}}$$

называют коэффициентом запаса. Обычно $K_{\text{з}} = 1{,}2—4$.

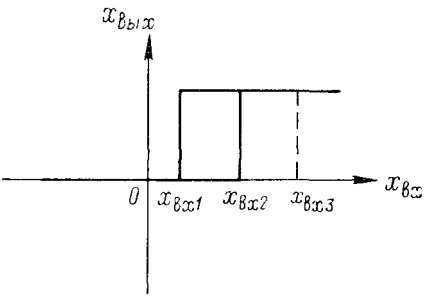



Рис. 24.1. Статическая характеристика реле:

$x_{\text{вх}1}$ — величина отпускания, $x_{\text{вх}2}$ — величина срабатывания; $x_{\text{вх}3}$ — величина поддержания.

Входные и выходные величины могут иметь различную физическую природу (ток, напряжение, давление и др.). При этом входные величины воздействуют на воспринимающий орган реле. Управление выходной величиной осуществляется исполнительным органом. Принципы выполнения воспринимающих и исполнительных органов зависят от технического исполнения реле и поэтому весьма различны.

Входными и выходными величинами электрических реле, получивших преимущественное распространение в судовых схемах автоматики, являются ток или напряжение. По принципу выполнения воспринимающих органов электрические реле подразделяют на электромагнитные, магнитоэлектрические, индукционные, электродинамические и электротермические. Исполнительным органом реле служит контактная система, состоящая из одного или нескольких контактов, переключаемых при изменении состояния реле.

В качестве датчиков в логических и исполнительных цепях чаще всего применяют электромагнитные реле различных типов. Тот или иной тип реле выбирают в соответствии с условиями его работы.

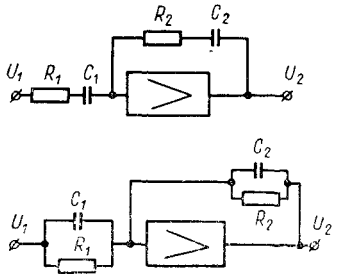
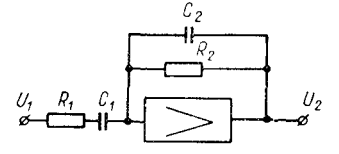
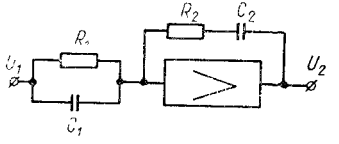
Контакты реле чаще всего рассчитаны на относительно малые токи (до 5 А) и воздействуют на цепи обмоток других аппаратов, в частности, контакторов, которые относятся к релейной аппаратуре автоматического управления.

*Контакторы* — аппараты дистанционного действия, предназначенные для частых размыканий и замыканий силовых цепей электрического тока: они рассчитаны на токи в несколько десятков и сотен ампер. Основными элементами контакторов служат главные контакты, которые могут замыкаться или размыкаться чаще всего с помощью электромагнитов.

Электромагнитные реле и контакторы подразделяются на реле и контакторы постоянного и переменного тока.

Контакты реле и контакторов бывают замыкающими, когда при отключенной обмотке электромагнита контакты разомкнуты, и размыкающими, когда при отключенной обмотке электромагнита они замкнуты.

Принципиальная схема электромагнитного реле (контактора) дана на рис. 24.2. Электромагнитное реле (контактор) состоит из стального сердечника *1* с насаженной обмоткой *2*, стального якоря *5*, поворачивающегося на ребре призмы, неподвижного *3* и подвижного *4* контактов, упора *6* и пружины *7*.

| Схема | Назначение | Передаточная функция |
|---|---|---|
|  | Воспроизведение последовательного соединения форсирующего и апериодического звеньев первого порядка | $W(p) = -\frac{(R_2C_2p + 1)C_1}{(R_1C_1p + 1)C_2}$<br>$W(p) = -\frac{(R_1C_1p + 1)R_2}{(R_2C_2p + 1)R_1}$ |
|  | Воспроизведение последовательного соединения дифференцирующего звена и двух апериодических звеньев первого порядка | $W(p) = -\frac{R_2C_1p}{(R_2C_2p + 1)(R_1C_1p + 1)}$ |
|  | Воспроизведение последовательного соединения интегрирующего и двух форсирующих звеньев | $W(p) = -\frac{(R_1C_1p + 1)(R_2C_2p + 1)}{R_1C_2p}$ |

При отключенной обмотке *2* электромагнита якорь, а вместе с ним и подвижный контакт под действием пружины *7*, прижимающей нижнюю часть якоря к упору *6*, занимают положение, указанное на рисунке. При этом токоведущие контакты разомкнуты. При включении обмотки электромагнита в электрическую цепь якорь притягивается к сердечнику, и контакты *3* и *4* замыкаются.

Якори контакторов, применяемых на судах, выполняются уравновешенными относительно своей оси вращения для уменьшения влияния вибрации на их работу.

Для улучшения условий гашения электрической дуги, возникающей между главными контактами в контакторах, применяется дугогасящее устройство. Помимо главных контактов, указанных на рис. 24.2, обычно имеются вспомогательные блок-контакты, предназначенные для замыкания и размыкания цепей управления других устройств и аппаратов. Блок-контакты, как и контакты реле, выполняются на малые токи.

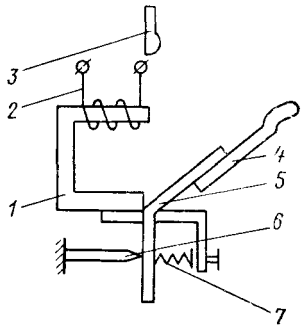



Рис. 24.2. Принципиальная схема электромагнитного реле (контактора).

Реле и контакторы применяются в схемах автоматического управления двигателей и электропривода, в системах автоматического регулирования (двухпозиционное регулирование) и защиты судовых электрических станций.

Ниже рассмотрены технические характеристики наиболее распространенных типов реле и контакторов в судовых системах автоматизированного управления.

*Малогабаритное реле постоянного тока серии* РЭС предназначено для коммутации электрических цепей постоянного и переменного тока в аппаратуре автоматики (в частности, для реализации логических операций) и сигнализации при условиях, указанных в табл. 24.1.

Технические данные реле указаны в табл. 24.2 и 24.3. Реле типа РЭС-7 заключено в алюминиевый чехол, предохраняющий реле от механических повреждений (рис. 24.3). Внутри корпуса установлен полый сердечник с катушкой, выполненный как самостоятельный узел, который крепится к корпусу при помощи двух винтов. Двухлопастной якорь с впрессованной в него осью соединен с переключающим сектором из пластмассы с шестью зубцами, зубцы сектора входят между концами подвижных контактных пружин. При повороте якоря сектор переключает контакты реле. При отсутствии тока якорь удерживается в исходном положении с помощью двух цилиндрических витых пружин. С наружной стороны корпуса установлены две контактные системы, каждая в виде полукольца, по дуге которого расположены три контактные группы. Контактная система крепится к корпусу при помощи двух винтов.

Электрическая схема и конструктивное исполнение реле РЭС-7 показаны на рис. 24.3.

Корпус реле типа РЭС-8 (рис. 24.4), в который запрессован сердечник с подпятником на конце и катушкой, служит магнитопроводом. С внутренней стороны корпуса над катушкой приварены четыре полюсных наконечника в виде угольников, между которыми укреплены два постоянных магнита для устранения вибрации якоря и удержания его в исходном положении при отсутствии тока.

Якорь состоит из четырех взаимно перпендикулярных пластин и соединен с палеткой из пластмассы с шестью пазами, через которые проходят концы подвижных контактных пружин. При повороте якоря палетка переключает контакты реле. Для демпфирования вращения подвижной системы на палетку насажено металлическое кольцо.

Электрическая схема и конструктивное оформление реле РЭС-8 даны на рис. 24.4.

Магнитная система реле РЭС-9 — двухкатушечная клапанного типа. Якорь подвешен на оси и имеет по бокам два удлиненных рычага с изолирующими буксами на концах. Неподвижные контакты выполнены цилиндрической формы и приварены к внутренним торцам выводных штырьков, запрессованных в основание реле. Контакты изготовлены из серебра, для коммутации очень малых

*Таблица 24.1*

## Условия работы реле серии РЭС

| Тип реле | Температура окружающего воздуха, °С | Относительная влажность окружающего воздуха, % | Вибрация в диапазоне частот | | | Линейные нагрузки | Ударные нагрузки с числом ударов 1000 | Атмосферное давление (до) мм рт. ст. | Рабочее положение |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 20—50 Гц | 50—600 Гц | 600—1500 Гц | | | | |
| РЭС-7 | −60 ÷ ÷+125 | $t$ = 20± ±5° С ≤98 | ≤10$g$ | ≤12$g$ | ≤5$g$ | 80$g$ | 50$g$ | 5 | Любое |
| РЭС 8 | −60 ÷ ÷+125 | $t$ = 40± ±5° С <98 | Амплитуда до 1 мм ≤10$g$ | ≤12$g$ | ≤5$g$ | 80$g$ | 50$g$ | 5 | » |
| РЭС-9 | −60 ÷ ÷+85 | $t$ = 40± ±5° С ≤98 | ≤10$g$ | ≤12$g$ | — | 25$g$ | 50$g$ | 5 | » |

*Таблица 24.2*

## Характеристики реле серии РЭС

| Тип реле | Количество контактов на переключение | Время срабатывания, мс | Время отпускания, мс | Ток срабатывания, мА | Ток отпускания, мА | Контактное давление (не менее), г/см² | Зазоры между разомкнутыми контактами (не менее), мм | Число срабатываний реле при активной нагрузке контактов | Сопротивление изоляции между обмоткой, контактными пружинами и корпусом (не менее), мОм | Масса, г | Габарит, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| РЭС-7 | 6 | 25 | 15 | 12—75 | 2—15 | 7 | 0,25 | 3 000 000 | 100 | 120 | 40×42××52 |
| РЭС-8 | 6 | 20—25 | 10 | 13—81 | 4—15 | 8 | — | 1 000 000 | 200 | 110 | 29×49××50 |
| РЭС-9 | 2 | 11 | — | 7—108 | 1,1—18 | — | — | 300 000 | 100 | 20 | 21,3××21,3××33 |

*Таблица 24.3*

## Допустимые нагрузки на контакты

| Параметр | РЭС-7 | | | | РЭС-8 | | | | РЭС-9 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Род тока | | | | | | | | | | | |
| | постоянный | | | переменный | постоянный | | | переменный | постоянный | | | переменный |
| Напряжение, В | 0,05 | 30 | 300 | 50 | 0,05 | 30 | 220 | 115 | 0,05 | 30 | 220 | 115 |
| Ток, А | $5\cdot10^{-6}$ | 2 | 0,3 | 1,0 | $5\cdot10^{-6}$ | 2 | 0,3 | 1,0 | $5\cdot10^{-6}$ | 2 | 0,3 | 0,5 |

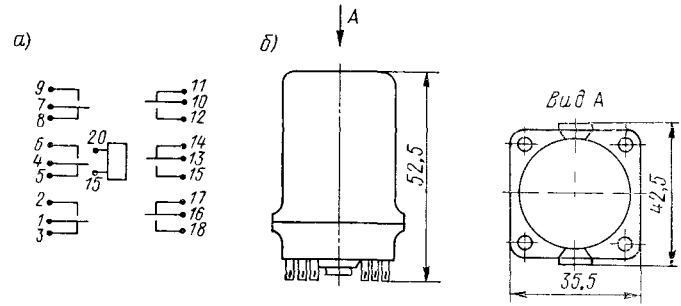



Рис. 24.3. Реле РЭС-7: *а* — электрическая схема; *б* — конструкция.

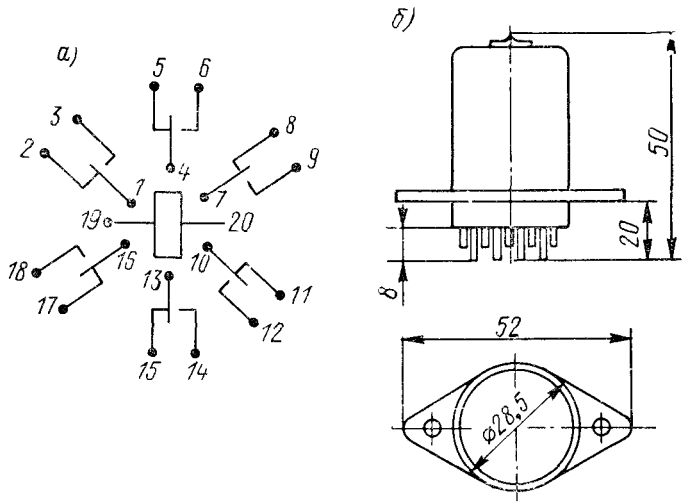



Рис. 24.4. Реле РЭС-8: *а* — электрическая схема; *б* — конструкция.

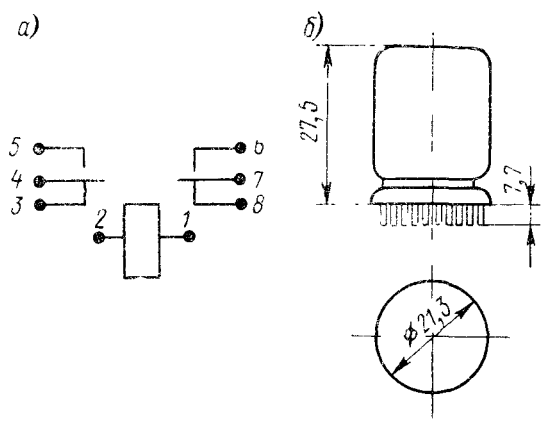



Рис. 24.5. Реле РЭС-9: *а* — электрическая схема; *б* — конструкция.

токов и напряжений применяются контакты из сплава платины с иридием марки ПЛИ-10. Подвижные контакты приклепаны к подвижным контактным пружинам, запрессованным одним концом в пластмассовую колодку, укрепленную на корпусе реле. Основание реле имеет круглую форму и опрессовано теплостойкой пластмассой. В основании запрессовано по окружности восемь выводных штырьков из нейзильбера диаметром 0,95 мм для возможности включения реле в печатную схему с последующей пайкой. В центре основания установлен винт для крепления реле. Реле защищено цилиндрическим алюминиевым чехлом, кромки которого развальцованы на основании.

Электрическая схема и конструктивное оформление реле РЭС-9 представлены на рис. 24.5.

*Малогабаритное реле серии* РМ-4 представляет собой промежуточное электромагнитное многоконтактное реле постоянного тока. Оно предназначено для включения и отключения электрических цепей постоянного и переменного тока при температуре окружающего воздуха от —50 до +50° С и влажности до 98%. Катушка реле изготовляется на напряжения 110, 27 и 24 В постоянного тока. Реле имеет 4 замыкающих и 4 размыкающих контакта. Реле рассчитано на продолжительную работу при напряжении 105% номинального. Реле должно коммутировать следующие токи: 50 мА постоянного тока при напряжении 20 В; включать 10 А и отключать 5 А переменного тока при напряжении 380 В, частоте 50—400 Гц и коэффициенте мощности не менее 0,6; включать 7 А и отключать 0,6 А постоянного тока при напряжении 110 В, безотказно коммутировать 50 мА постоянного тока при напряжении 20 В.

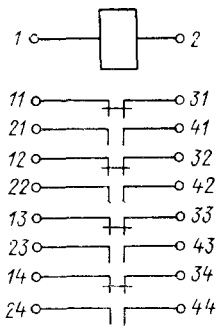



Рис. 24.6. Принципиальная электрическая схема реле РМ-4.

Контакты реле РМ-4 длительно пропускают ток 5 А при напряжении сети 380 В переменного тока. При коммутировании вышеуказанных токов реле рассчитано на 100 000 срабатываний. Мощность, потребляемая катушкой реле при номинальном напряжении, составляет около 7 Вт. Масса реле — не более 0,35 кг, габарит 66,5× × 31×92 мм.

Принципиальная электрическая схема реле РМ-4 показана на рис. 24.6.

*Электромагнитные многоконтактные унифицированные реле типа* МКУ-48С предназначены для управления питающими и сигнальными цепями в аппарате связи и автоматики и допускают коммутацию цепей постоянного и переменного тока напряжением до 220 В. Реле выпускаются с последовательной катушкой на номинальные токи 0,02; 0,2 и 2,7 А постоянного тока и 0,135—0,175; 0,45; 0,64; 1,27; 1,5; 1,85 и 2,2 А переменного тока.

**Номинальные напряжения, В, катушек реле типа МКУ-48С**

| Постоянный ток | Переменный ток | Постоянный ток | Переменный ток |
|---|---|---|---|
| 24 | 24 | — | 127 |
| 48 | — | 220 | 220 |
| 60 | — | — | 380 |
| 110 | 110 | | |

Реле с параллельной катушкой четко срабатывает при 0,85 $U_н$, с последовательной катушкой — при 0,85 $I_н$.

Потребляемая мощность реле постоянного тока — не более 3 Вт, переменного тока — не более 6 Вт.

Собственное время срабатывания реле типа МКУ-48С при номинальных напряжениях и токе составляет не более 0,035 с для реле, имеющих до 8 контактных пружин, и не более 0,06 с для реле, имеющих от 8 до 16 контактных пружин.

Реле выпускаются с контактной системой согласно табл. 24.4.

Реле типа МКУ-48С предназначены для работы при температурах от —50 до +50° С и относительной влажности 95±3%. Масса реле в кожухе 0,5 кг, без кожуха — 0,36 кг.

*Таблица 24.4*

**Контактные системы реле типа МКУ-48С**

| Катушка | Исполнение реле | | | |
|---|---|---|---|---|
| | открытое | | в кожухе | |
| | Род тока | | | |
| | постоянный | переменный | постоянный | переменный |
| Последовательная | 2з<br>2п 2з<br>2р 4з<br>— | 2п<br>2з 2п<br>2р 4з<br>2з 4р | —<br>—<br>—<br>— | 2п<br>2р 2з<br>—<br>— |
| Параллельная | 2з<br>2п<br>2р 2з<br>2п 2з<br>2п 2р<br>4з<br>6з<br>2р 4з<br>2з 4р<br>2п 4з<br>2п 2р, 2з<br>2р 6з<br>8з | 2з<br>2п<br>2р 2з<br>2п 2з<br>2п 2р<br>4з<br>6з<br>2р 4з<br>2з 4р<br>2р 6з<br>8з<br>4п<br>— | 2з<br>2п<br>2з 2р<br>4з<br>4р<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>— | 2з<br>2п<br>2з 2р<br>4з<br>4р<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>—<br>— |

Примечание з — замкнутый, р — разомкнутый; п — перекидной

*Электромагнитное малогабаритное реле серии* РСМ изготовляется с двумя контактными группами на замыкание (тип РСМ-1), с одной контактной группой на замыкание и одной на размыкание (тип РСМ-2) и двумя контактными группами на размыкание (тип РСМ-3). Реле этой серии имеют следующие технические данные:

| | |
|---|---|
| Номинальное напряжение обмотки, В | 12 или 248 |
| Номинальный ток контактов при напряжении 28 В постоянного тока, А | 1 |
| Время срабатывания, с | 3—10 |
| Время отпускания, с | 2—4 |
| Габаритные размеры, мм | 11×17,5×38 |

*Реле времени постоянного тока серии* РЭВ-810 и РЭВ-881выпускаются промышленностью вместо реле серии РЭ-510 и РЭ-580. *Они изготовляются на номинальные напряжения* 12, 24, 48, 110 и 220 В.

Реле РЭВ-811 и РЭВ-815 изготовляются с катушками без демпфера (демпфером служит основание реле), реле остальных типов — с катушками с демпфером. Реле работают четко в пределах гарантированной точности при напряжении 0,6 $U_н$. Технические данные подобных реле приведены в табл. 24 5.

Реле серии РЭВ поставляются отрегулированными на максимальную выдержку времени, предусмотренную в табл. 24 5.

*Реле времени типов* ЭВ-1 и ЭВ-2 применяются в схемах защиты автоматики для получения регулируемой замедленной передачи импульса от управляющего органа. Реле типа ЭВ-1 выпускаются на номинальные напряжения постоянного тока 24, 48, 110, 220 В, реле типа ЭВ-2 — на номинальные напряжения 110, 127, 220 и 380 В. Основные временные параметры реле обоих типов приведены в табл. 24.6.

*Таблица 24.5*

**Технические данные реле серии РЭВ-810 и РЭВ-880**

| Тип реле | Пределы регулирования, с | Погрешность выдержки времени, % | Потребляемая мощность, Вт | Исполнение контактов | | Время заряда (не менее), с | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | замыкающих | размыкающих | | |
| РЭВ-811 | 0,25—1 | ±10 | ≤20 | 1 | 1 | 0,5 | 2,5 |
| РЭВ-812 | 0,8—2,5 | ±10 | ≤20 | 1 | 1 | 0,7 | 2,5 |
| РЭВ-813 | 2—3,5 | ±10 | ≤20 | 1 | 1 | 0,9 | 2,5 |
| РЭВ-814 | 3—5 | ±10 | ≤20 | 1 | 1 | 0,9 | 2,5 |
| РЭВ-815 | 0,25—0,6 | ±10 | ≤20 | 2 | 2 | 0,5 | 2,5 |
| РЭВ-816 | 0,5—1,5 | ±10 | ≤20 | 2 | 2 | 0,7 | 2,5 |
| РЭВ-817 | 1,2—2 | ±10 | ≤20 | 2 | 2 | 0,9 | 2,5 |
| РЭВ-818 | 2—3,5 | ±10 | ≤20 | 2 | 2 | 0,9 | 2,5 |
| РЭВ-881 | 4,5—8 | ±10 | ≤20 | 1 | 1 | 1 | 6,0 |
| РЭВ-882 | 7—12 | ±10 | ≤30 | 1 | 1 | 1,5 | 6,0 |
| РЭВ-883 | 3—6 | ±10 | ≤30 | 2 | 2 | 1 | 6,0 |
| РЭВ-884 | 5—9 | ±10 | ≤30 | 2 | 2 | 1,5 | 6,0 |

Реле четко срабатывают при напряжении, равном 0,7 $U_н$. Потребляемая мощность реле при номинальном напряжении составляет не более 30 Вт. При температуре +20° С катушки реле выдерживают напряжение 1,1 $U_н$ в течение не более 2 мин.

*Таблица 24.6*

**Технические данные реле серии ЭВ-1 и ЭВ-2**

| Тип реле | Пределы регулирования, с | Разброс времени, с | Время замкнутого состояния, с | Контактная система | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|
| ЭВ-112, ЭВ-212 | 0,1—1,3 | 0,06 | 0,05—0,1 | 1п 1 1з | 1,5 |
| ЭВ-114, ЭВ-214 | 0,1—1,3 | 0,06 | 0,05—0,1 | 1п 1з | 1,5 |
| ЭВ-122, ЭВ-222 | 0,25—3,5 | 0,12 | 0,17—0,25 | 1п 1 1з | 1,5 |
| ЭВ-124, ЭВ-224 | 0,25—3,5 | 0,12 | 0,17—0,25 | 1п 1з | 1,5 |
| ЭВ-132, ЭВ-232 | 0,5—9 | 0,25 | 0,45—0,65 | 1п 1 1з | 1,5 |
| ЭВ-134, ЭВ-234 | 0,5—9 | 0,25 | 0,45—0,65 | 1п 1з | 1,5 |
| ЭВ-142, ЭВ-242 | 1—20 | 0,8 | 1—1,5 | 1п 1 1з | 1,5 |
| ЭВ-144, ЭВ-244 | 1—20 | 0,8 | 1—1,5 | 1п 1з | 1,5 |

Реле типов ЭВ-1 и ЭВ-2 выдерживают без механических повреждений 5000 включений при максимальной уставке выдержки времени. Частота включений — не более 30 в час. Реле надежно работает в диапазоне температур окружающего воздуха от —30 до +40° С.

Конструкция реле типов ЭВ-1 и ЭВ-2 позволяет произвести уставки выдержки времени замыкающего и основных контактов с разностью между ними от нуля до полной шкалы реле. При этом на временно замыкающем контакте невозможна бо́льшая по времени уставка, чем на основных.

Габариты реле типов ЭВ-1 и ЭВ-2 соответственно составляют 110×150×80 и 94×128×75 мм.

*Реле максимального тока серии* РЭВ-570, выпускаемые вместо реле серии РЭ-570, применяются в схемах автоматического управления электроприводами в цепях постоянного и переменного тока. Катушки реле постоянного тока могут регулироваться на срабатывание в пределах 70—300% номинальных токов: 1,5, 2,5; 5; 10; 25; 50; 100; 150; 300; 600; 1200 А.

Ток срабатывания реле серии РЭВ-570 регулируется в пределах (0,7—3) $I_н$. Заводом реле поставляются отрегулированными на ток 2 $I_н$, на шкале наносятся уставки срабатывания 0,7; 2 и 3 $I_н$.

Погрешность реле РЭВ-570 составляет ±10% при температуре окружающего воздуха 15—25° С. Коэффициент возврата реле не нормируется. Собственное время срабатывания реле — не более 0,05 с. Контактная система реле в стандартном исполнении имеет один разомкнутый контакт.

Срок службы несменных частей реле составляет 15 000 срабатываний. Масса реле — не более 2 кг.

*Реле максимального тока серии* РТ-40 применяется для цепей переменного тока с частотой 50—60 Гц. Технические данные реле приведены в табл. 24.7.

*Таблица 24.7*

**Технические данные реле серии РТ-40**

| Тип реле | Пределы уставок | | | | Потребляемая мощность, Вт | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Соединение катушки | | | | | |
| | последовательное | | параллельное | | | |
| | Время срабатывания, с | Номинальный ток, А | Время срабатывания, с | Номинальный ток, А | | |
| РТ-40/0,2 | 0,05—0,1 | 0,5 | 0,1—0,2 | 1 | 0,2 | 0,75 |
| РТ-40/0,6 | 0,15—0,3 | 1,6 | 0,3—0,6 | 3,2 | 0,2 | 0,75 |
| РТ-40/2 | 0,5—1 | 3,8 | 1—2 | 7,6 | 0,2 | 0,75 |
| РТ-40/6 | 1,5—3 | 10 | 3—6 | 20 | 0,5 | 0,75 |
| РТ-40/10 | 2,5—5 | 16 | 5—10 | 32 | 0,5 | 0,75 |
| РТ-40/20 | 5—10 | 18 | 10—20 | 36 | 0,5 | 0,75 |
| РТ-40/50 | 12,5—25 | 25 | 25—50 | 50 | 0,8 | 0,75 |
| РТ-40/100 | 25—50 | 25 | 50—100 | 50 | 1,8 | 0,75 |
| РТ-40/200 | 50—100 | 25 | 100—200 | 50 | 8 | 0,75 |

Погрешность реле равна ±5% при температуре окружающего воздуха +20° С. *Коэффициент возврата реле составляет 0,85 на первой уставке и не менее 0,8* на остальных. Дополнительные регулировки обеспечивают $K_в$ не менее 0,85 на *любой* уставке шкалы, на других уставках $K_в \leqslant 0{,}8$. Собственное время срабатывания — не более 0,1 с при токе 1,2 $I_{уст}$ и 0,03 с при токе 3 $I_{уст}$.

Время размыкания замыкающего контакта при уменьшении тока в реле с (1,2—2,0) $I_{ср}$ до 0,7 $I_{ср}$ для реле с нормальным $K_в$ составляет не более 0,035 с. Контактная система реле серии РТ-40 состоит из одного замыкающего и одного размыкающего контактов. Реле РТ-40 рассчитаны для работы при температуре окружающего воздуха от —20 до +40° С.

*Реле обратного тока серии* ДТ-100 предназначены для защиты источника электрической энергии постоянного тока при изменении направления тока в его цепи. Реле имеет последовательную и параллельную катушки. Параллельная катушка исполняется на напряжение 50 В. При напряжении 110 и 220 В последовательно с параллельной катушкой включается добавочное сопротивление.

Контакты реле серии ДТ-100 действуют на отключающую катушку автомата или контактора при протекании по токовой катушке тока в обратном направле-

нии, равного 0,1—0,2 номинального значения. При продолжительном режиме работы контакты реле допускают нагрузку током 5 А. Для защиты контактов реле от обгорания при большом токе параллельно им включается конденсатор емкостью 1 мкФ.

В судовых системах управления нашли применение следующие марки реле серии ДТ-100. ДТ-111, ДТ-112, ДТ-115 и ДТ-116.

По исполнению различают следующие реле серии ДТ-100.

По контактам: ДТ-111 и ДТ-112 с нормально-открытым контактом; ДТ-115 и ДТ-116 с нормально-закрытым контактом.

По току: ДТ-111 и ДТ-115 от 6 до 300 А; ДТ-112 и ДТ-116 от 400 до 800 А.

Добавочные сопротивления при напряжении 110 В равны 800 Ом, при 220 В — 2200 Ом; они включаются при работе реле в сети с напряжением 220 В.

Реле серии ДТ-100 выпускаются на номинальное значение тока 6, 12, 25, 50, 200, 300, 400, 600 и 800 А.

Чувствительность реле ДТ-100 (отношение обратного тока, при котором реле срабатывает, к номинальному) составляет около 15%. При толчках прямого тока, больших 2 $I_н$, реле может сработать ложно. Масса реле 3,5 кг.

*Реле обратной мощности серии* ИМ-149 применяется в системах управления судовых энергетических установок переменного тока при параллельной работе синхронных генераторов. Реле воздействует на аппарат защиты генератора и отключает последний в случае его перехода в двигательный режим из-за неисправности первичного двигателя.

Реле обратной мощности, применяемые на судах, для предупреждения срабатывания при кратковременных переходах генератора в двигательный режим (вследствие качания машин в режиме параллельной работы, при коротких замыканиях, синхронизации и т. п.) работают с выдержкой времени. Реле имеют два основных узла — магнитопровод и подвижную систему.

Реле серии ИМ-149 выпускаются на напряжения 127 и 220 В. Для генераторов напряжением 400 В катушка напряжения включается в сеть через трансформатор напряжения с вторичным напряжением 127 В. Реле имеет одну пару размыкающих контактов для замыкания цепи отключающего расцепителя автомата. Уставка на мощность срабатывания изменяется путем подключения к трансформатору тока различного числа витков токовой катушки реле. Реле имеет три уставки. Выдержка времени устанавливается по шкале, на которой нанесены деления 2, 3, 5, 7, 9 и 12 с. Уставки на выдержку времени калиброваны при номинальном напряжении и токе, равном 1,2 номинального тока срабатывания.

*Контакторы переменного и постоянного тока*, рассчитанные для эксплуатации в судовых условиях, выпускаются отечественной промышленностью для коммутирования цепей постоянного и переменного тока напряжением до 320 В. Сравнительные характеристики контакторов приведены в табл. 24.8. Не допускается установка контакторов в среде взрывоопасной, насыщенной токопроводящей пылью, которая содержит едкие газы и пары в концентрациях, разрушающих металл и изоляцию. Контакторы работают в продолжительном, прерывисто-продолжительном и повторно-кратковременном (ПВ = 40%) режимах. Они обеспечивают надежную работу при установках в рабочем положении и наклонах в любую сторону, в спокойном состоянии и вибрации при напряжении в сети 0,85—1,05 $U_н$.

Контакторы применяют в основном для установки в оболочку комплектных устройств (пускателей, станций управления, распределительных щитов и т. п.) защищенного, брызгозащищенного, водозащитного и герметического исполнения. Типы (серии) контакторов, выпускаемых промышленностью для судовых электроэнергетических установок, представлены в табл. 24.8.

*Контакторы постоянного тока серии* КПМ-100 предназначены для коммутирования цепей постоянного тока напряжением до 320 В в судовых установках. Контакторы различаются по номинальному току главных контактов, исполнению главных контактов, номинальному напряжению цепи втягивающей катушки (55, 110, 220 В *постоянного тока*) и по блок-контактам.

Магнитная система всех контакторов — клапанного типа, главные контакты — пальцевого, а блок-контакты — мостикового типа.

Контакторы серии КПМ-100 собирают на изоляционном основании в отдельный блок и устанавливают в комплектные устройства полностью собранными. Типовые обозначения контакторов данной серии показаны на рис. 24.7.

Основные технические данные контакторов серии КПМ-100 приведены в табл. 24.9. Дугогасительные катушки изготовляются для контакторов величины 1 на токи 5, 10, 25 и 80 А, величины 3 — на 200 А. Наибольшие допустимые токи через блок-контакты приведены в табл. 24.10.

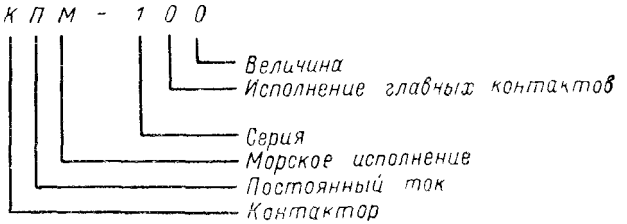



Рис. 24.7. Типовые обозначения контакторов серии КПМ-100.

*Контакторы постоянного тока серии* КН предназначены для управления электроприводами и переключения сетей постоянного тока напряжением до 320 В.

Контакторы серии КН различаются по номинальному току главных контактов: 25, 60, 100, 200 А; по исполнению главных контактов: с двумя замыкающими; по напряжению втягивающей катушки; по блок-контактам. Контакторы

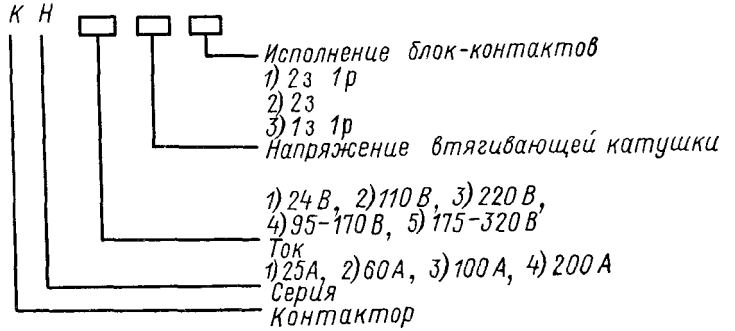



Рис. 24.8. Типовые обозначения контакторов серии КН.

имеют клапанную уравновешенную магнитную систему и состоят из электромагнитной, контактной, дугогасительных систем и блок-контактов. Электромагнитная система имеет П-образный магнитопровод, катушки с сердечником и якорь. Подвижная система состоит из якоря, траверсы с мостиками подвижных контактов и скобы. Подвижные блок-контакты укреплены на гибких бронзовых пружинах, есть возможность регулирования зазоров и прогибов блок-контактов.

Основные технические данные контакторов серии КН приведены в табл. 24.11 Типовые обозначения контакторов серии КН даны на рис. 24.8. Контакторы допускают надежную длительную работу без отключения в течение 2000 ч.

*Контакторы серии* КН-200 предназначены для управления электродвигателями и переключения судовых сетей *постоянного тока напряжением до* 320 В, а переменного — до 380 В.

Контакторы различают: 1) по номинальному току — 25, 50, 100, 150 и 350 А; 2) по исполнению главных контактов (рис. 24.9); 3) по напряжению втягивающих

*Таблица 24.8*

**Сравнительные характеристики контакторов различных серий**

| Серия контактора | Род тока | Температура окружающей среды, °С | Относительная влажность, % | Мощность, потребляемая катушками, Вт | Предельная коммутационная способность | Механическая износоустойчивость, число циклов | Электрическая износоустойчивость | Блок-контактная система | Допустимое число включений |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| КПМ-100 | Постоянный | —40÷+40 | ≤98 | 30 | $10I_н$ при активной нагрузке; $4I_н$ при индуктивной нагрузке | $1 \cdot 10^6$ | $1{,}5 \cdot 10^5$ | 2з<br>1з 1р<br>2р | 300 |
| КН | Постоянный | —40÷+40 | ≤95±3 | 20; 29; 35; 50 | То же | $1{,}5 \cdot 10^6$ | $2{,}0 \cdot 10^5$ | 1з 1р<br>2з<br>1р<br>1р | 1200 (600) |
| КН-200 | Постоянный, переменный | —40÷+40 | ≤95±3 | 50 | $10I_н$; $4I_н$; $7I_н$ | $1{,}0 \cdot 10^6$ | $1{,}5 \cdot 10^5$;<br>$1{,}0 \cdot 10^5$;<br>$0{,}5 \cdot 10^5$ | 1з 1р | 600 |
| КНТ | Переменный | —40÷+40 | ≤95±3 | 40 | $7I_н$ | $1 \div 1{,}5 \cdot 10^5$ | $2{,}0 \cdot 10^5$ | 1з 1р<br>2з 1р<br>2з<br>2р 1з<br>3з | 600 |

*Таблица 24.9*

**Технические данные контакторов серии КПМ**

| Тип контактора | Величина контактора | Номинальный ток, А | Номинальное напряжение, В | Число главных контактов | | Допустимый ток, А | | | | Габарит, мм | Масса, кг |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | замкнутых | разомкнутых | при продолжительной нагрузке | при кратковременной нагрузке | | | | |
| | | | | | | | 30 мин | 60 мин | ПВ — 40% | | |
| КПМ-111 | 1 | 80 | 220; 110 | 1 | — | 80 | 100 | 80 | 100 | 138×115×195 | 4 |
| КПМ-141 | | | 220; 110 | — | 1 | | | | | | |
| КПМ-121 | | | 220; 110 | 2 | — | | | | | 138×130×195 | 5 |
| КПМ-131 | | | 220; 110; 55 | 1 | 1 | | | | | | |
| КПМ-113 | 3 | 200 | 220; 110; 55 | 1 | — | 200 | 300 | 200 | 300 | 185×144×285 | 6 |
| КПМ-143 | | | 220; 110; 55 | — | 1 | | | | | 148×110×290 | |

*Таблица 24.10*

**Наибольшие допустимые токи через блок-контакты**

| Род тока | Напряжение, В | Допустимый ток, А | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | продолжительный | включаемый | разрываемый | |
| | | | | в активной цепи | в индуктивной цепи |
| Постоянный | 110<br>220<br>320 | 10 | 5 | 5<br>2<br>1,2 | 2,5<br>1,0<br>0,6 |

*Таблица 24.11*

## Технические данные контакторов серии КН

| Величина контактора | Тип | Номинальный ток, А | Номинальное напряжение втягивающей катушки, В | Мощность, потребляемая втягивающей катушкой, Вт | Напряжение отпускания при $t = 20°$ С | | Собственное время, с | | Число свободных блок контакторов | | Допустимая температура, °С | Масса, кг | Габарит мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | максимальное | минимальное | срабатывания | отпускания | замкнутых | разомкнутых | | | |
| 1 | КН-112 | 25 | 24 | 20 | 12 | 1,5 | 0,1—0,4 | 0,02—0,036 | 2 | — | 125 | 1,3 | 85×85×115 |
| | КН-113 | | | | | | | | 1 | 1 | | | |
| | КН-122 | | 110 | | 55 | 6,0 | | | 2 | — | | | |
| | КН-123 | | | | | | | | 1 | 1 | | | |
| | КН-132 | | 220 | | 110 | 11,0 | | | 2 | — | | | |
| | КН-133 | | | | | | | | 1 | 1 | | | |
| | КН-142 | | 90—170 | | 48 | 5,0 | | | 2 | — | | | |
| | КН-143 | | | | | | | | 1 | 1 | | | |
| | КН-152 | | 175—320 | | 88 | 10,0 | | | 2 | — | | | |
| | КН-153 | | | | | | | | 1 | 1 | | | |
| 2 | КН-212 | 60 | 24 | 29 | 12 | 1,5 | 0,15—0,075 | 0,036—0,014 | 2 | — | | 2,6 | 118×90×169 |
| | КН-213 | | | | | | | | 1 | 1 | | | |
| | КН-222 | | 110 | | 55 | 6,0 | | | 2 | — | | | |
| | КН-223 | | | | | | | | | | | | |

*Продолжение табл. 24.11*

| Величина контактора | Тип | Номинальный ток, А | Номинальное напряжение втягивающей катушки, В | Мощность, потребляемая втягивающей катушкой, Вт | Напряжение отпускания при $t = 20°$ С | | Собственное время, с | | Число свободных блок-контакторов | | Допустимая температура нагрева, °С | Масса, кг | Габарит, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | максимальное | минимальное | срабатывания | отпускания | замкнутых | разомкнутых | | | |
| 2 | КН-232 | 60 | 220 | 29 | 110 | 11,0 | 0,15—0,075 | 0,036—0,014 | 2 | — | 125 | 2,6 | 118×90×169 |
| | КН-233 | | | | | | | | 1 | 1 | | | |
| | КН-242 | | 95—170 | | 48 | 5,0 | | | 2 | — | | | |
| | КН-243 | | | | | | | | 1 | 1 | | | |
| | КН-252 | 100 | 175—320 | | 88 | 10,0 | | | 2 | — | | | |
| | КН-253 | | | | | | | | 1 | 1 | | | |
| 3 | КН-311 | 100 | 24 | 35 | 12 | 1,5 | 0,19—0,085 | 0,034—0,038 | 2 | 1 | | 3,7 | 139×110×182 |
| | КН-321 | | 110 | | 55 | 6,0 | | | | | | | |
| | КН-331 | | 220 | | 110 | 11,0 | | | | | | | |
| | КН-341 | | 95—170 | | 48 | 5,0 | | | | | | | |
| | КН-351 | | 175—320 | | 88 | 10,0 | | | | | | | |
| 4 | КН-411 | 200 | 24 | 50 | 12 | 1,5 | 0,26—0,11 | 0,019—0,024 | 2 | 1 | | 8,8 | 166×156×216 |
| | КН-421 | | 110 | | 55 | 6,0 | | | | | | | |
| | КН-431 | | 220 | | 110 | 11,0 | | | | | | | |
| | КН-441 | | 95—170 | | 48 | 5,0 | | | | | | | |
| | КН-451 | | 175—320 | | 88 | 10,0 | | | | | | | |

катушек — 24, 48, 110, 220, 95—170 и 175—320 В постоянного тока, 127, 220 и 380 В переменного тока частотой 50 Гц; 4) по конструктивному исполнению блок-контактов (клиновые, перекидные, мостиковые).

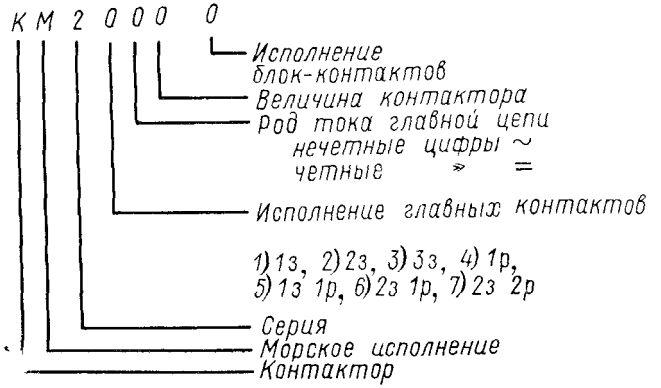



Рис. 24.9. Типовые обозначения контакторов серии КМ.

Контакторы серии КН-200 состоят из контактной, дугогасительной и электромагнитной систем; блок-контактов и основания. Главные контакты независимо от номинального напряжения втягивающей катушки пригодны для работы при напряжении силовой сети 320 В постоянного тока или 380 В переменного тока.

Промышленностью выпускаются 145 различных типов контакторов серии КН-200 массой от 2 до 20 кг.

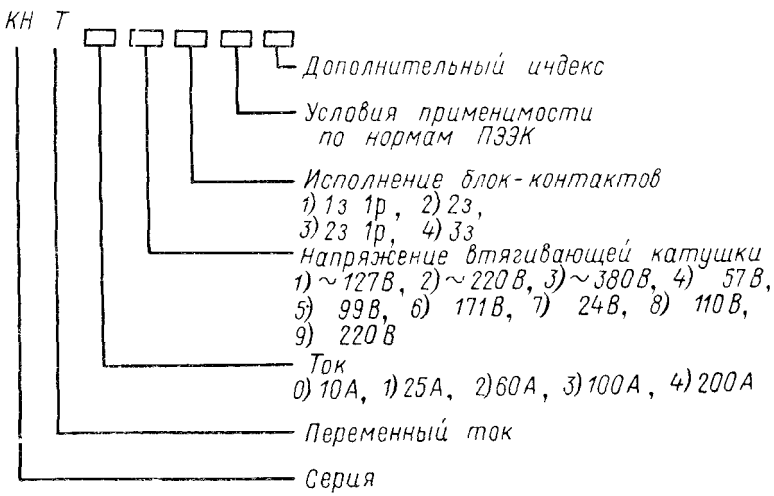



Рис. 24.10. Типовые обозначения контакторов серии КНТ.

Напряжение на зажимах катушек контактов переменного тока, при котором начинается отпадение якоря, не превышает 70% номинального

Типовые обозначения контакторов КГ-200 приведены на рис 24.9.

*Контакторы переменного тока серии* КНТ предназначены для управления электродвигателями и переключения сетей переменного тока напряжением до 380 В, частотой 50—400 Гц в судовых установках.

Контакторы различаются по номинальному току, напряжению цепи втягивающей катушки, по блок-контактам. Их конструкция аналогична конструкции контакторов серии КН-200. Допустимые колебания напряжений и частоты питающей сети даны в табл. 24.12.

*Таблица 24.12*

**Допустимые колебания напряжения и частоты**

| Режим | По напряжению, % | По частоте, % |
|---|---|---|
| Длительный | ±5 | ±2,5 |
| Повторно-кратковременный | −13÷+8 | −4÷+3,5 |
| Кратковременный (до 3 с) | −25÷+13 | −6÷+4 |

Промышленностью выпускается 99 типов контакторов серии КНТ массой от 2,2 до 11 кг. Собственное время срабатывания составляет 0,6 с, время отпускания 0,4—0,6 с.

Типовые обозначения контакторов серии КНТ даны на рис. 24.10.

## § 25. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

**Электродвигатели постоянного тока с независимым возбуждением.** В случае необходимости плавного изменения угловой скорости при мало изменяющейся или постоянной нагрузке применяются электродвигатели с независимым возбу-

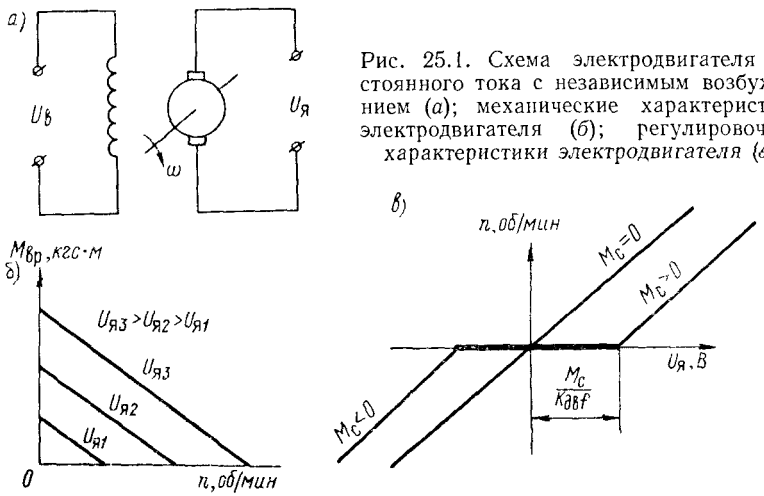



Рис. 25.1. Схема электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением (*а*); механические характеристики электродвигателя (*б*); регулировочные характеристики электродвигателя (*в*).

ждением (рис. 25.1, *а*). Управляющий сигнал — напряжение — подается в цепь якоря, в цепь возбуждения либо в обе цепи одновременно (комбинированное управление).

Управление со стороны якоря. В этом случае обеспечивается возможность безреостатного пуска и плавного изменения угловой скорости в широком диапазоне ($\omega_{max}/\omega_{min} > 3$—4), однако при этом требуются усилители зна-

чительной мощности, так как в цепь якоря должна поступать основная часть энергии, необходимой для работы электродвигателя.

Статические характеристики электродвигателей подразделяются на механические и регулировочные. Механические характеристики представляют собой графическую зависимость вращающего момента $M_{вр}$ от частоты вращения $n$ при неизменном значении напряжения цепи якоря $U_я$ (рис. 25.1, *б*). Характеристики описываются уравнением

$$M_{вр} = fk_{дв}U_я - fn, \qquad (25\ 1)$$

где

$$f = \frac{c_e c_м \Phi_0^2}{R_я}; \quad k_{дв} \quad \frac{1}{c_e \Phi_0};$$

$$c_м = \frac{M_{вр}}{I_я \Phi_0}; \quad c_e \quad \frac{L_я}{n\Phi_0};$$

$E_я$ — противо-э. д. с. двигателя; $c_м$ и $c_e$ — постоянные, зависящие от конструкции электродвигателя; $f$ — коэффициент демпфирования; $n$ — частота вращения; $\Phi_0$ — *поток возбуждения в установившемся режиме*; $R_я$ — *сопротивление* цепи якоря; $I_я$ — ток цепи якоря; $M_п$ — пусковой момент; $fn$ — демпфирующий момент.

Регулировочные характеристики представляют собой графическую зависимость частоты вращения от напряжения цепи якоря при неизменном значении момента сопротивления $M_c$ (рис. 25.1, *в*). Характеристики описываются уравнением

$$n = k_{дв}U_я - \frac{M_c}{f}. \qquad (25\ 2)$$

Зона нечувствительности электродвигателя [$n = 0$ при $|U_я| = 0$] расширяется с ростом нагрузки, так как напряжение страгивания должно достигнуть значения $U_я = M_c/k_{дв}f$, обеспечивающего создание пускового момента, равного моменту сопротивления.

Уравнение динамики электродвигателя имеет вид

$$T_м T_я \ddot{\omega} + T_м\dot{\omega} + \omega \quad k_1 U_я - k_2 (T_я \dot{M}_c - M_c), \qquad (25\ 3)$$

где $T_м$ — электромеханическая постоянная времени (0,05—0,5 с)

$$T_м = \frac{R_я J_{пр}}{c_м c_e \Phi_0^2};$$

$T_я$ — электромагнитная постоянная времени цепи якоря (0,01—0,2 с):

$$T_я = \frac{L_я}{R_я};$$

$k_1$ — коэффициент усиления угловой скорости по управляющему напряжению

$$k_1 = \frac{1}{c_e \Phi_0};$$

$k_2$ — коэффициент усиления угловой скорости по моменту сопротивления

$$k_2 = \frac{R_я}{c_м c_e \Phi_0^2};$$

$J_{пр}$ — момент инерции якоря и нагрузки, приведенный к валу электродвигателя; $L_я$ — индуктивность якоря.

Заметим, что $T_м \gg T_я$, так как индуктивность якоря мала. Поэтому при $M_с = 0$ получим

$$T_м\dot{\omega} + \omega = k_1 U_я \tag{25.4}$$

Для уменьшения $T_м$ необходимо уменьшить диаметр якоря за счет соответствующего увеличения его длины. Для электродвигателей малой мощности $T_м$ составляет сотые доли секунды, для электродвигателей большой мощности — десятые доли.

С целью уменьшения массы и габаритов электродвигатели постоянного тока изготовляют, как правило, быстроходными, хотя скорость перемещения регулирующего органа объекта регулирования обычно невелика. Поэтому в исполнительном устройстве применяется шестеренный или червячный редуктор. Так как зазоры в зацеплении таких редукторов, приводящие к нелинейности типа гистерезисной петли, ухудшают работу автоматических систем, то к редукторам предъявляются повышенные требования. Как элемент системы управления редуктор обладает свойствами звена нулевого порядка. Приведенный момент инерции определяется по формуле

$$J_{пр} = J_я + \sum J_i \left(\frac{\omega_i}{\omega}\right)^2, \tag{25 5}$$

где $J_я$ — момент инерции якоря, выраженный через маховой момент $GD^2$,

$$J_я = \frac{GD^2}{4g};$$

$J_i$ и $\omega_i$ — момент инерции и угловая скорость $i$-й детали механизма.

Если деталь, имеющая массу $m$, совершает поступательное движение со скоростью $v_i$, то ее приведенный момент инерции находится из выражения

$$J_{i\,пр} = m\left(\frac{v_i}{\omega}\right)^2. \tag{25 6}$$

Управление со стороны обмотки возбуждения. При таком управлении диапазон изменения угловой скорости мал, а усилительные элементы имеют незначительную мощность, поскольку основная часть энергии для работы электродвигателя поступает в цепь якоря из сети.

Уравнение динамики электродвигателя имеет вид

$$T_м T_в T_я \dddot{\omega} + T_м (T_я + T_в)\,\ddot{\omega} + (T_м + T_в)\,\dot{\omega} + \omega =$$

$$= T_я \frac{R_я c I_0}{R_в c_e \Phi_0^2} \dot{U}_в - k_в U_ь, \tag{25 7}$$

где $T_в = L_в/R_в$ — постоянная времени цепи возбуждения;

$k_в$ — коэффициент усиления угловой скорости по управляющему напряжению, $k_в = \dfrac{c\omega_0}{R_в \Phi_0}\left(1 - \dfrac{R_я I_0}{c_e \Phi_0 \omega_0}\right)$; $I_0$ — ток в якоре в установившемся режиме; $U_в$ — напряжение на обмотке возбуждения; $L_в$ — индуктивность обмотки возбуждения; $R_в$ — сопротивление цепи возбуждения; $c$ — постоянная, зависящая от конструкции электродвигателя.

Так как $R_я I_я \ll c_e \Phi_0 \omega_0$, то $k_в \approx \frac{c\omega_0}{R_в \Phi_0}$. Кроме того, $T_в \gg T_я$ и $T_м \gg T_я$. Поэтому уравнение динамики электродвигателя можно записать в виде

$$T_м T_в \ddot{\omega} + (T_м - T_в)\dot{\omega} + \omega = k_в U_в. \qquad (25\,8)$$

В случае комбинированного управления сочетаются положительные эффекты обоих способов управления.

**Электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением.** Такие электродвигатели имеют две обмотки возбуждения, соединенные последовательно с якорем (рис. 25.2). Обмотки поочередно подключаются к источнику постоянного напряжения при помощи ключа или контактов поляризованного реле, на обмотку которого подается управляющее напряжение $U_у$. Магнитные потоки обмоток направлены встречно, при переключении ключа или контактов реле направления потоков и вращения вала электродвигателя изменяются, а направление тока якоря остается постоянным. Уравнение динамики электродвигателя при малой индуктивности обмоток возбуждения и якоря аналогично уравнению (25.4).

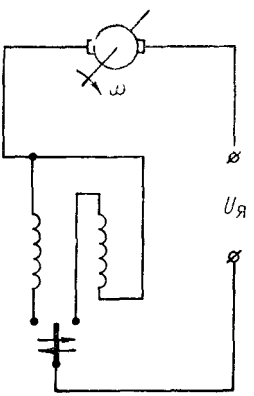


Рис. 25.2. Схема электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

**Электродвигатели переменного тока.** В автоматических системах широко применяются электродвигатели переменного тока. По сравнению с электродвигателями постоянного тока они более надежны, просты (из-за отсутствия коллекторов и щеточного аппарата) и дешевы.

У асинхронного двигателя угловая скорость зависит от момента на валу двигателя. Его принцип действия основан на использовании эффекта вращающегося магнитного поля. Асинхронные двигатели состоят из неподвижного статора и вращающегося ротора.

*Трехфазные асинхронные электродвигатели* имеют большой пусковой ток, малый пусковой момент, а главное, у них трудно регулировать угловую скорость, что существенно сужает область их применения в автоматике.

Более широко используются *двухфазные асинхронные электродвигатели*. Схема двухфазного асинхронного электродвигателя приведена на рис. 25.3, *а*. На его статоре расположены обмотки возбуждения *ОВ* и управления *ОУ* (последняя состоит из одной или двух частей для упрощения согласования с выходным каскадом усилителя). Магнитные оси обмоток сдвинуты относительно друг друга на 90°. Обмотка возбуждения подключена к напряжению сети $U_в$, в обмотку управления поступает управляющий сигнал — напряжение $U_у$ (на рис. 25.3 векторы напряжения обозначены $\bar{U}$). Сдвиг фазы тока относительно фазы напряжения на 90° обеспечивается непосредственно схемой.

Взаимно перпендикулярные переменные магнитные потоки обмоток образуют результирующий магнитный поток статора, вращающийся в пространстве. Если амплитуды магнитных потоков равны друг другу, то длина вектора результирующего магнитного потока не изменяется, а его вращение происходит с постоянной угловой скоростью $\omega_s$, пропорциональной частоте питающего напряжения $f_с$ и называемой синхронной угловой скоростью ($\omega_s = 2\pi f_с/p$, где $p$ — число пар полюсов статора).

В общем случае амплитуды магнитных потоков не равны друг другу, поэтому длина вектора результирующего магнитного потока является переменной, а его вращение происходит неравномерно в пределах каждого периода.

В роторе индуктируются токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем статора, создают вращающий момент, увлекающий ротор во вращение. Ротор вращается в ту же сторону, что и результирующий магнитный поток. Если нагрузка на валу ротора отсутствует, то угловые скорости результирующего магнитного

потока $\omega_s$ и ротора $\omega_{x\backslash}$ теоретически равны. Однако из-за трения в подшипниках, вентиляционных потерь, тормозных моментов от высших пространственных гармоник поля угловая скорость холостого хода меньше $\omega_s$ и составляет $\omega_{\backslash x} = (0{,}75—0{,}90)\,\omega_s$. При наличии нагрузки ротор вращается с еще меньшей скоростью. Обычно номинальная угловая скорость для всех видов управления составляет $\omega_н \approx (0{,}5 — 0{,}6)\,\omega_s$. Разность $\omega_s — \omega$ называется абсолютным скольжением, а $S = \dfrac{\omega_s — \omega}{\omega_s}$ — относительным. При некотором значении скольжения, называемом критическим ($S = S_к$), момент двигателя достигает максимальной величины, а затем падает до значения, соответствующего пусковому режиму. Для ликвидации неустойчивой зоны работы [на возрастающем участке зависимости $M = f(\omega)$] увеличивается активное сопротивление ротора, от которого зависит $S_к$, настолько, чтобы максимум кривой $M = f(\omega)$ сместился в зону отрицательных $\omega$, т. е. в зону скольжений больше 1.

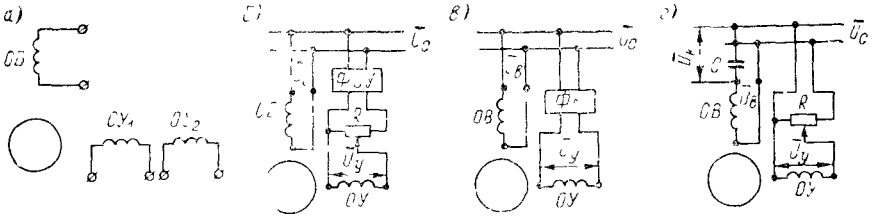



Рис. 25.3. Схемы двухфазных асинхронных двигателей: *а* — с расщепленной обмоткой управления; *б* — с амплитудным методом управления; *в* — с фазовым методом управления; *г* — с амплитудно-фазовым методом управления.

Управление двигателями осуществляется тремя способами. При *амплитудном управлении* (рис. 25.3, *б*) на обмотку управления подается напряжение, переменное по амплитуде и сдвинутое по фазе фазосдвигающим устройством (*ФСУ*) относительно напряжения возбуждения на 90°. При *фазовом управлении* (рис. 25.3, *в*) на обмотку управления подается постоянное по амплитуде напряжение, приведенное значение которого равно напряжению возбуждения. Управление двигателем производится путем изменения фазы напряжения управления с помощью фазовращателя *ФВ*. Схема на рис. 25.3, *г* соответствует *амплитудно-фазовому* (*конденсаторному*) способу управления двигателем. При этом способе напряжения сети и управления совпадают по фазе, а коэффициент управления равен $\lambda = U_у/U_в$. Сдвиг фазы между $\dot{U}_в$ и $\dot{U}_у$ достигается путем включения емкости в цепь возбуждения. Режимы работы двигателей могут быть различными:

1) длительная работа на режимах от пускового до холостого хода;
2) длительная работа практически при холостом ходе;
3) длительная работа в пределах номинального режима и холостого хода.

В зависимости от схемы управления надежность работы и свойства двигателя в указанных режимах различны. Например, для конденсаторного двигателя наиболее тяжелым режимом по нагреву и возможным перенапряжениям на обмотке *ОВ* и на конденсаторе является режим холостого хода. При амплитудном и фазовом управлении наиболее неблагоприятный — стопорный (пусковой) режим. Для двигателей, работающих в системах автоматики, основной режим — пусковой. Поэтому наибольшее распространение для таких двигателей получило амплитудно-фазовое управление.

Механические характеристики $M = f(\omega)$ двухфазного асинхронного двигателя можно получить при различных значениях управляющего напряжения.

Из рассмотрения механических характеристик (рис. 25.4) следует, что при увеличении управляющего напряжения возрастает вращающий момент двигателя. С увеличением момента на валу двигателя уменьшается угловая скорость. На рис. 25.4, *а* изображены линеаризованные характеристики, а на рис.

25.4 *б* — реальные механические характеристики. Параллельность характеристик часто нарушается. Различают двигатели с полым ротором, с короткозамкнутым ротором типа «беличьей клетки», с ферромагнитным ротором.

Достоинства двигателей с полым ротором следующие.

1. Малый момент инерции, что достигается выполнением ротора в виде тонкостенного стакана из немагнитного материала с малым удельным весом (алюминий или дюралюминий) и толщиной стенки 0,1—1 мм.

2. Большой пусковой момент вследствие повышенного сопротивления ротора, что в совокупности с малым моментом инерции обеспечивает малую электромеханическую постоянную времени двигателя, его быстродействие, повышение устойчивости работы и малое время реверса.

3. Механическая характеристика двигателя приближается к прямолинейной вследствие большого критического скольжения $S_к > 1$ ($S_к = 2—7$).

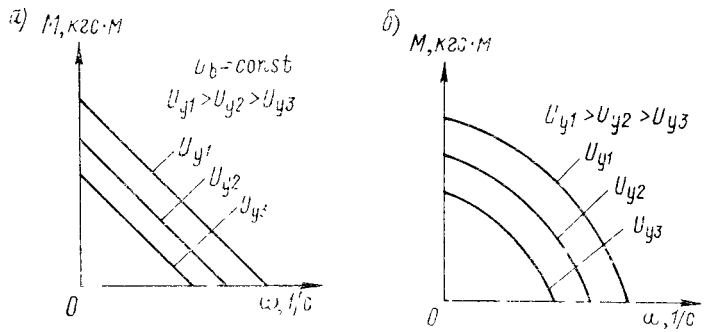



Рис. 25.4. Линеаризованные (*а*) и реальные (*б*) механические характеристики асинхронного двухфазного двигателя с полым ротором.

4. Широкий диапазон плавного регулирования угловой скорости, обусловленный возможностью изменения поля обратной последовательности в больших пределах. Кратность регулирования угловой скорости достигает значения $\omega_{max}/\omega_{min} = 100—200$.

5. Высокая чувствительность двигателя (малое относительное напряжение трогания). Плавный и бесшумный ход из-за отсутствия зубцовых высших гармоник в кривой поля, демпфируемых полым ротором.

6. Постоянство момента, развиваемого двигателем, при любом угловом положении ротора.

7. Малый момент трения, стабильность параметров, отсутствие искровой коммутации и связанных с ней радиопомех.

К недостаткам двигателей с полым ротором относятся следующие.

1. Большой суммарный зазор ($\delta = 0{,}3—1{,}4$ мм), обусловливающий значительный по величине намагничивающий ток и относительно низкий коэффициент мощности.

2. Относительно низкий к. п. д., так как двигатели потребляют довольно большой ток и работают при больших скольжениях (номинальное скольжение $S_{ном} \approx 0{,}5$), что приводит к существенным потерям в статоре и роторе.

3. Относительно большие масса и габарит.

В настоящее время двигатели с полым ротором имеют преимущественное распространение в судовой автоматике.

В качестве двигателей малой мощности (доли и единицы ватта) часто используются двигатели с короткозамкнутой обмоткой ротора в виде беличьей клетки. Двигатели с короткозамкнутым ротором более надежны в условиях высоких температур (до 150—500° С), вибрации и тряски. Кроме того, для тока промышленной частоты $f = 50$ Гц двигатели небольшой мощности с короткозамкнутым ротором типа беличьей клетки имеют лучшие показатели по пусковым моментам,

быстродействию и габаритам по сравнению с двигателями такой же мощности, но с полым ротором. Для частоты $f = 400$ Гц двигатели с ротором типа беличьей клетки имеют лучшие характеристики при диаметре корпуса $D_к \leqslant 60$ мм и уступают двигателям с полым немагнитным ротором при $D_к \geqslant 80$ мм. Для $f = 1000$ Гц эта граница лежит в пределах 30—40 мм.

Использование двигателей с ферромагнитным ротором (с омеднением и без омеднения) обусловлено стремлением устранить в определенной степени отрицательный эффект большого воздушного зазора у двигателей с полым ротором. Двигатели с ферромагнитным ротором имеют значительно меньший воздушный зазор. При этом, во-первых, уменьшается намагничивающий ток, во-вторых, приведенное активное сопротивление оказывается больше благодаря небольшой глубине проникновения в ротор электромагнитной волны (особенно при высоких частотах). Большое активное сопротивление обеспечивает линейность механических и регулировочных характеристик.

Недостатком таких двигателей является снижение пускового момента и увеличение момента инерции, что ведет к уменьшению быстродействия двигателя, и большая чувствительность к неравномерности воздушного зазора. Увеличение пускового момента достигается омеднением ротора. Однако при этом увеличивается воздушный зазор на величину омедняющего слоя и ухудшается линейность характеристик. Поэтому иногда производят омеднение только торцовых поверхностей ротора.

Уравнение динамики электродвигателя для коэффициента управления $\lambda < 0{,}5$ и ненасыщенной магнитной системы имеет вид

$$T_м T_у \ddot{\omega} + (T_м + T_у)\dot{\omega} + \omega = k_1 U_у - k_2 (T_у \dot{M}_с + M_с), \qquad (25\,9)$$

где $T_м = \dfrac{J_{пр}}{c_\omega}$ — электромеханическая постоянная времени (0,01—0,1 с без учета инерционности нагрузки); $T_у = \dfrac{L_у}{R_у}$ — электромагнитная постоянная времени обмотки управления (0,01—0,02 с); $k_1 = \dfrac{c_i}{c_\omega R_у}$ — коэффициент усиления угловой скорости по управляющему напряжению; $k_2 = \dfrac{1}{c_\omega}$ — коэффициент усиления угловой скорости по нагрузке; $L_у$ и $R_у$ — индуктивность и сопротивление цепи обмотки управления; $c_\omega$ и $c_i$ — коэффициенты в уравнении $M_{вр} = c_i I_у - c_\omega \omega$.

Уравнение динамики электродвигателя для любых $\lambda$ и $M_с = 0$ имеет вид

$$T_м \frac{d}{dt}\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right) + \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right) = k_3 \lambda, \qquad (25.10)$$

где $k_3$ — коэффициент усиления угловой скорости по $\lambda$;

$$T_м = \frac{2J_{пр}}{c\,(1+\lambda^2)}; \quad k_3 = \frac{2}{1+\lambda^2};$$

$c$ — постоянный коэффициент.

При $\lambda^2 \ll 1$ величины $T_м$ и $k_3$ практически постоянны.

**Выбор электродвигателей.** Тип электродвигателя определяется назначением и особенностями динамики системы автоматического управления с учетом характеристик объекта управления. Основным параметром при выборе электродвигателя является его мощность, определяемая следующим образом.

Момент сопротивления, приведенный к валу электродвигателя, равен

$$M_{пр} = \alpha \frac{M_с i}{\eta_р}, \qquad (25\,11)$$

где $\alpha$ — коэффициент запаса (1,2—1,6); $M_с$ — момент сопротивления на управляющем органе, кгс м; $i$ — передаточное число редуктора, установленного между

электродвигателем и управляющим органом; $\eta_р$ — к. п. д. редуктора (0,6—0,8). Коэффициент $\alpha$ увеличивается с ростом частоты включений и при наличии резких пиков нагрузки.

Мощность электродвигателя $P$, Вт, определяется по формуле

$$P = 1{,}028 M_{пр} n \cdot 10^{-3}, \qquad (25.12)$$

где $n$ — частота вращения электродвигателя, об/мин.

Технические данные некоторых типов двигателей переменного тока приведены в таблицах: асинхронных двухфазных двигателей типа ДНД с полым ротором — в табл. 25.1, типа АДП — в табл. 25.2, типа АДТ — в табл. 25.3.

*Таблица 25.1*

**Характеристики двигателей типа ДНД**

| Параметр | ДНД-0,5 | ДНД-1 | ДНД-2 | ДНД-3 | ДНД-5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Полезная мощность $P_н$, Вт | 0,3 | 1 | 2 | 3 | 5 |
| Вращающий момент $M_н$, гс·см | 3 | 10 | 18 | 50 | 100 |
| Пусковой момент $M_п$, гс·см | 6 | 16 | 34 | 100 | 200 |
| Частота вращения номинальная $n_н$, об/мин | 9700 | 9700 | 10 800 | 5800 | 4850 |
| Момент инерции ротора $I_д$, гс·см·с$^2$ | $4{,}5 \cdot 10^{-4}$ | $7 \cdot 10^{-4}$ | $8 \cdot 10^{-4}$ | $2{,}4 \cdot 10^{-4}$ | $250 \cdot 10^{-4}$ |
| Напряжение сети $U_с$, В | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Частота сети $f$, Гц | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| $\lambda_п = M_п/M_н$ | 2,0 | 1,6 | 1,9 | 2,0 | 2,0 |
| $P_п = \lambda_п P_н$, Вт | 0,6 | 1,6 | 3,8 | 6,0 | 10,8 |
| Напряжение обмотки управления, В | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Масса, кг | 0,05 | 0,11 | 0,16 | 0,34 | 0,72 |

Часто в маломощных следящих системах предусматриваются тахометрические элементы, выходное напряжение которых используется в качестве первой производной для целей коррекции или для определения угловой скорости исполнительной оси. Для этих целей применяются асинхронные электродвигатели с полым ротором типа АДТ и асинхронные двигатели — тахогенераторы с полым ротором типа ДГ (табл. 25.4). Они состоят из двухфазного электродвигателя и асинхронного тахогенератора, расположенных на одном валу, чтобы обеспечить передаточное число между исполнительным двигателем и тахогенератором, равное единице. Передаточное число принимается равным единице из условия наиболее полного использования номинальной угловой скорости тахогенератора.

**Электромагниты.** Среди электрических исполнительных элементов наиболее просты по конструкции, надежны и удобны в эксплуатации электромагниты, осуществляющие преобразование управляющего сигнала в возвратно-поступательное движение или угловое перемещение управляющих органов. Кроме того, электромагниты могут использоваться для торможения вращающихся валов ряда механизмов. Приводимые электромагнитами управляющие органы часто называются соленоидными (клапанами, вентилями, задвижками). Электромагниты обладают высоким быстродействием (несколько мкс) и не требуют наличия редукторов.

Электромагниты переменного тока имеют худшие параметры, чем электромагниты постоянного тока, при одинаковых размерах они развивают меньшее тяговое усилие, обладают меньшей чувствительностью, неудовлетворительной стабильностью параметров и имеют бо́льшую стоимость.

*Таблица 25.2*

**Характеристики двигателей типа АДП**

| Параметр | АДП-123 | АДП-123Б | АДП-262 | АДП-362 | АДП-263А | АДП-363А | АДП 563А |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Полезная мощность $P_н$, Вт | 4,1 | 8,9, | 9,5 | 19 | 27,8 | 46,4 | 62 |
| Вращающий момент $M_н$, кгс·м | $1 \cdot 10^{-3}$ | $1{,}45 \cdot 10^{-3}$ | $5 \cdot 10^{-3}$ | $9{,}5 \cdot 10^{-3}$ | $4{,}5 \cdot 10^{-3}$ | $7{,}5 \cdot 10^{-3}$ | $10{,}0 \cdot 10^{-3}$ |
| Пусковой момент $M_п$, кгс·м | $1{,}4 \cdot 10^{-3}$ | $1{,}7 \cdot 10^{-3}$ | $9 \cdot 10^{-3}$ | $17 \cdot 10^{-3}$ | $6 \cdot 10^{-3}$ | $8{,}5 \cdot 10^{-3}$ | $12 \cdot 10^{-3}$ |
| Момент трогания $M_{тр}$, кгс·м·$10^{-5}$ | 3 | 3 | 8 | 13 | 12 | 20 | 44 |
| Частота вращения номинальная $n$, об/мин | 4000 | 6000 | 1850 | 1950 | 6000 | 6000 | 6000 |
| Момент инерции ротора, кгс·м·с$^2$ | $0{,}8 \cdot 10^{-7}$ | $0{,}8 \cdot 10^{-7}$ | $1{,}7 \cdot 10^{-7}$ | $4 \cdot 10^{-7}$ | $1{,}9 \cdot 10^{-7}$ | $5 \cdot 10^{-7}$ | $12 \cdot 10^{-7}$ |
| Напряжение сети, В | 110 | 110 | 110 | 110 | 36 | 36 | 36 |
| Частота сети, Гц | 400 | 400 | 50 | 50 | 500 | 500 | 500 |
| $\lambda_п = M_п/M_н$ | 1,4 | 1,17 | 1,8 | 1,8 | 1,15 | 1,05 | 1,8 |
| $P_п = \lambda_п P_н$, Вт | 5,75 | 10,4 | 17,1 | 34 | 37 | 52,5 | 74 |
| $\lambda = I_{уп}/I_{уп}$ | 1 | — | 1,13 | 1,15 | 1,2 | 1,4 | 1,4 |
| Емкость в цепи возбуждения, мкФ | 0,3 | 0,5 | 2,5 | 6,5 | 3,9 | 6,6 | 13 |
| Масса двигателя, кг | 0,55 | 0,55 | 1,6 | 2,6 | 1,6 | 2,7 | 5,7 |

*Таблица 25.3*

**Характеристики двигателей типа АДТ**

| Параметр | АДТ-1 | АДТ-1Б | АДТ-1А | АДТ-1С |
|---|---|---|---|---|
| Тахогенератор | | | | |
| Максимальное напряжение возбуждения, В | 110 | 110 | 55 | 55 |
| Частота, Гц | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Максимальная частота вращения, об/мин | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| Крутизна генераторной э. д. с. при максимальном напряжении возбуждения, $\frac{\text{мВ}}{\text{об/мин}}$ | 5—6,5 | 5—6,5 | 5—6,5 | 5—6,5 |
| Э. д. с. при неподвижном роторе, мВ: | | | | |
| максимальное значение | 50 | 50 | 50 | 50 |
| переменная составляющая | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Потребляемая мощность (не более), Вт | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Двигатель | | | | |
| Номинальное напряжение возбуждения, В | 110 | 110 | 110 | 110 |
| Максимальное напряжение управления, В | 180 | 180 | 180 | 180 |
| Частота, Гц | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Номинальная частота вращения, об/мин | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| Номинальный момент на выходном валу редуктора (не менее), гс·дм | 240 | — | 240 | — |
| Пусковой момент на выходном валу редуктора (не менее), гс·дм | 450 | — | 450 | — |
| Мощность возбуждения (не более), Вт | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Мощность управления (не более), Вт | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Емкость в цепи возбуждения, мкФ | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Редуктор | | | | |
| Передаточное отношение | 30 : 1 | — | 30 : 1 | — |

*Таблица 25.4*

**Характеристики двигателей тахогенераторов типа ДГ**

| Параметр | ДГ-0,5 | ДГ-1 | ДГ-2 | ДГ-3 | ДГ-5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Напряжение возбуждения двигателя и тахогенератора, В | — | 36 | — | — | — |
| Напряжение обмотки управления двигателя, В | — | 30 | — | — | — |
| Частота сети, Гц | — | 400 | — | — | — |
| Номинальная мощность двигателя, Вт | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 5,0 |
| Номинальный вращающий момент, кгс·м | $6{,}5\cdot10^{-5}$ | $8\cdot10^{-5}$ | $16\cdot10^{-5}$ | $50\cdot10^{-5}$ | $100\cdot10^{-5}$ |
| Пусковой момент, кгс·м | $12\cdot10^{-5}$ | $16\cdot10^{-5}$ | $32\cdot10^{-5}$ | $100\cdot10^{-5}$ | $200\cdot10^{-5}$ |
| Момент инерции ротора, кгс·м·с$^2$ | $13\cdot10^{-9}$ | $8\cdot10^{-9}$ | $11\cdot10^{-9}$ | $37\cdot10^{-9}$ | $40\cdot10^{-9}$ |
| Электромеханическая постоянная, мкс | 94 | 86 | 46 | 36 | 80 |
| Частота вращения холостого хода, об/мин | 14 000 | 16 000 | 18 000 | 9000 | 6000 |
| Нулевое напряжение тахогенератора, В | 200 | 200 | 200 | 100 | 100 |
| Крутизна сигнала тахогенератора, $\frac{\text{В}}{\text{об/мин}}$ | $4\cdot10^{-4}$ | $10\cdot10^{-4}$ | $10\cdot10^{-4}$ | $10\cdot10^{-4}$ | $10\cdot10^{-4}$ |
| Масса, кг | 0,1 | 0,2 | 0,25 | 0,55 | 1,0 |

В автоматических системах обычно используются электромагниты постоянного тока с встроенными в цепи питания выпрямительными элементами. Область применения электромагнитов ограничивается двухступенчатым характером действия («открыто», «закрыто»), размерами и массой управляющих органов: для перемещения больших и тяжелых управляющих органов необходимо иметь большой ток в обмотках катушек электромагнитов, что делает их громоздкими. Существенным недостатком электромагнитов является резкое срабатывание, приводящее, например, к гидравлическим ударам в трубопроводах.

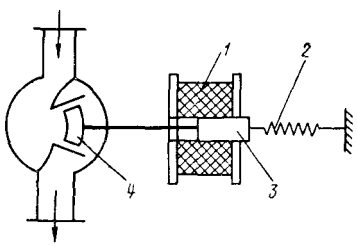


Рис. 25.5. Схема соленоидного клапана.

На рис. 25.5 показан соленоидный клапан. Управляющий сигнал поступает в обмотку катушки электромагнита *1*, насаженную на сердечник из ферромагнитного материала. Протекающий по обмотке ток приводит к появлению магнитного поля, перемещающего ферромагнитный якорь *3* относительно катушки. В результате перемещается соединенный с якорем *золотник 4 клапана*. *Пружина 2 служит для настройки* хода якоря. Реостатом в цепи обмотки можно регулировать силу тока и, следовательно, *величину перемещения золотника*. Мощность срабатывания электромагнитов соленоидных клапанов составляет до 100 Вт.

В табл. 25.5 приведены технические данные некоторых электромагнитов, используемых для судовой дистанционно управляемой арматуры.

*Таблица 25.5*

**Технические данные электромагнитов**

| Тип электромагнита | ЭВ | ЭЗ-00.00 |
|---|---|---|
| Тяговое усилие, кгс | 5—25 | 2—40 |
| Ход якоря, мм | 1—6 | 2—10 |
| Потребляемая мощность, Вт, или ток срабатывания, А | $I = 0{,}2—2$ | Р 30—53 |
| Напряжение, В | 18—110 | 24—220 |
| Масса $\left(\frac{\text{общая}}{\text{якоря}}\right)$, кг | $\frac{1{,}4—12}{0{,}05—1{,}85}$ | 7—23 |
| Габарит, мм | 46×72×107—172×215×265 | 118×124×172—191×196×283 |
| Режим работы | Продолжительный | Продолжительный, прерывистый, повторно-кратковременный |
| Безотказность действия | — | В течение 2000 ч |
| Износоустойчивость (число срабатываний) | — | Не менее 100 000 |
| Температура окружающей среды, °С | 60—100 | 0—50 |
| Допустимая температура нагрева катушки, °С | 100—150 | 130—180 |
| Исполнение | Встраиваются в корпус нужного исполнения | Герметичное |
| Примечание | Специальные разработки | Стандартизованные |

**Электромагнитные муфты.** Для подключения и отключения вращающихся валов объектов могут применяться электромагнитные муфты. Они соединяют на время работы концы ведущих и ведомых валов. Схема электромагнитной муфты изображена на рис. 25.6, *а*. Ведущий вал *1* муфты имеет ферромагнитный сердечник *2* и катушку *3*. На ведомом валу *7* укреплен на шпонке ферромагнитный диск *5*. При отсутствии тока в обмотке катушки диск *5* оттянут пружинами *6* в крайнее правое положение, и ведомый вал неподвижен. При подаче управляющего сигнала диск *5* притягивается к сердечнику *2* и жестко соединяется с ним. Ведомый вал вращается с частотой вращения ведущего вала. Для предотвращения прилипания диска и обеспечения необходимого трения к сердечнику крепится немагнитная фрикционная прокладка *4* из кожи, пробки, пластмассы или чугуна. Мощность управляющего сигнала значительно меньше мощности, передаваемой валами. Время срабатывания муфты не зависит от инерционности приводного двигателя. Для маломощных муфт оно составляет 10—12 мкс и слагается из времени страгивания $t_1$, движения якоря $t_2$ и разгона муфты $t_3$ (рис. 25.6, *б*). После разгона угловые скорости ведущего $\omega_1$ и ведомого $\omega_2$ валов становятся равными. Используя вибрационное управление в виде прямоугольных импульсов входного напряжения, можно обеспечить плавное регулирование угловой скорости ведомого вала. Средняя угловая скорость ведомого вала за период следования им-

пульсов составляет

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{\tau}{T}, \qquad (25.13)$$

где $\tau$ — длительность импульса; $T$ — период импульсов.

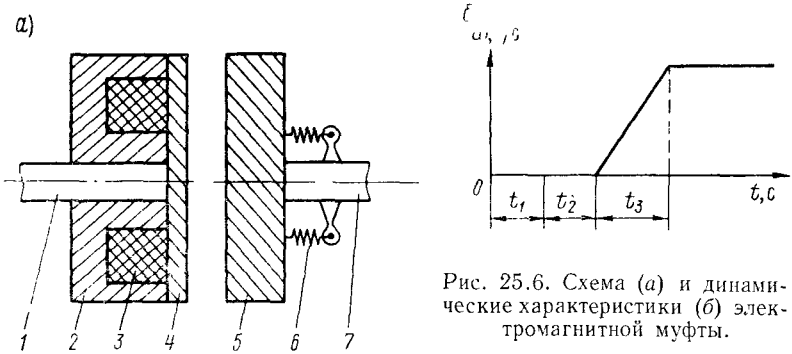



Рис. 25.6. Схема (*а*) и динамические характеристики (*б*) электромагнитной муфты.

Устройство из двух муфт *2* и *3* и системы шестерен может обеспечить реверс ведомого вала *4* при нереверсивном ведущем вале *1* (рис. 25.7, *а*).

Уравнение динамики такого устройства имеет вид

$$T_{\text{я}}\dot{\omega}_2 + \omega_2 - \omega_1 \frac{\tau}{T} e^{-pt_{\text{эм}}}, \qquad (25\ 14)$$

где $T_{\text{я}} = L_{\text{я}}/R_{\text{я}}$ — электромагнитная постоянная обмотки; $t_{\text{эм}}$ — время срабатывания электромагнита.

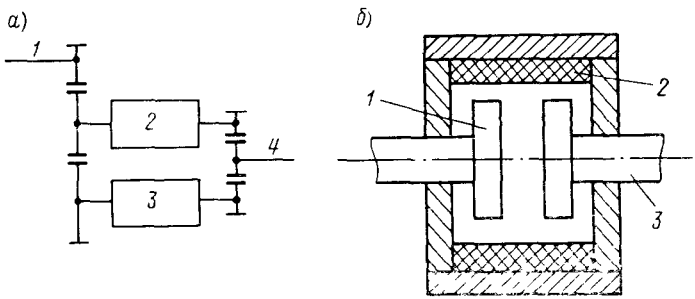



Рис. 25.7 Схемы реверсивного редуктора (*а*) и порошковой муфты (*б*).

**Магнитно-жидкостные, или порошковые муфты.** Схема такой муфты приведена на рис. 25.7, *б*. В стальном корпусе находятся диски ведомого *1* и ведущего *3* валов и катушка электромагнита *2*. Внутренняя полость корпуса заполнена ферромагнитной жидкой массой—смесью из минерального масла и порошков графита, талька и карбонильного железа. Когда по обмотке катушки *2* протекает ток, то смесь намагничивается и загустевает, металлические частицы смеси образуют при этом нити, сцепляющие оба диска. Момент трения между дисками пропорционален напряженности магнитного поля между дисками (т. е. току электромагнита) и не зависит от относительной угловой скорости дисков. Порошковые муфты более универсальны по сравнению с фрикционными, так как позволяют осуществлять как плавное, так и прерывистое регулирование момента на выходном валу.

Уравнение динамики устройства (см. рис. 25.7, *б*) с порошковыми муфтами имеет вид

$$T_{\text{у}}\dot{\omega} \quad \omega \quad kU, \tag{25 15}$$

где $T_{\text{у}}$ — постоянная времени электромагнитов

$$T_{\text{у}} = \frac{L_{\text{у}}}{R_{\text{у}}};$$

$k$ — коэффициент усиления

$$k = \frac{c}{R_{\text{у}} I};$$

$L_{\text{у}}$, $R_{\text{у}}$ — индуктивность и сопротивление электромагнитов (управляющих обмоток); $c$ — коэффициент пропорциональности; $I = I_1 - I_2$ — ток дебаланса в управляющих обмотках; $M = cI$ — момент на выходном валу; $U = IR_{\text{у}}$ — напряжение дебаланса, приложенное к управляющим обмоткам.

## § 26. ТИПОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Под типовым электрическим регулятором обычно понимают устройство (или комплекс устройств), воспринимающее на входе электрические сигналы от датчиков (преобразователей) регулируемой величины и дающее на выходе электрический сигнал, предназначенный для управления объектом.

Виды типовых регуляторов, различающиеся реализуемыми ими законами регулирования, приведены в табл. 26.1.

Настроечные параметры регуляторов указанных типов рекомендуется устанавливать в диапазонах, приведенных в табл. 26.2. В регуляторах типа ПИД необходимо обеспечить возможность установки отношения $T_{\text{д}}/T_{\text{и}}$ не менее 0,18. В пределах указанных в табл. 26.2 диапазонов настройки допускается разбивка на поддиапазоны с условием их перекрытия.

Ниже дается описание ряда типовых электрических регуляторов, используемых в судовых и береговых электроэнергетических установках.

**Регуляторы прямого действия. Автоматические регуляторы напряжения типа РУН.** Регуляторы напряжения типа РУН (регуляторы угольного напряжения) предназначены для стабилизации напряжения на зажимах генераторов постоянного и переменного тока, а также могут быть использованы в качестве автоматических реостатов в цепях постоянного тока. Регуляторы РУН выполняются нескольких типов, отличающихся друг от друга максимально допустимой мощностью угольного столба.

**Сравнительные данные регуляторов типа РУН**

| Тип регулятора | Максимально допустимая мощность, Вт | Точность регулирования напряжения, % |
|---|---|---|
| РУН-111 | 60 | ±2 |
| РУН-121 | 120 | ±2 |
| РУН-131 | 220 | ±2,5 |
| РУН-131А | 110 | ±2,5 |
| РУН-141 | 400 | ±2,5 |

Указанная точность регулирования обеспечивается при колебании частоты вращения генератора в диапазоне ±3% номинального значения.

*Таблица 26.1*

**Виды типовых регуляторов**

| Тип регулятора | Наименование | Уравнение закона регулирования |
|---|---|---|
| П | Пропорциональный | $\mu - \mu_0 = -k(\varphi - \varphi_0)$ |
| И | Интегральный | $\mu - \mu_0 = -\frac{k}{T_и}\int_0^t (\varphi - \varphi_0)\,dt$ |
| ПИ | Пропорционально-интегральный | $\mu - \mu_0 = -k \times \left[(\varphi - \varphi_0) + \frac{1}{T_и}\int_0^t (\varphi - \varphi_0)\,dt\right]$ |
| ПД | Пропорционально-дифференциальный | $\mu - \mu_0 = -k\left[(\varphi - \varphi_0) + T_д \frac{d\varphi}{dt}\right]$ |
| ПИД | Пропорционально-интегродифференциальный | $\mu - \mu_0 = -k \times \left[(\varphi - \varphi_0) + \frac{1}{T_и}\int_0^t (\varphi - \varphi_0)\,dt + T_д \frac{d\varphi}{dt}\right]$ |

Примечание.
$\mu$ и $\mu_0$ — текущее и начальное значения регулирующего воздействия;
$\varphi$ и $\varphi_0$ — текущее и заданное значения регулируемой величины;
$T_и$, $T_д$ — постоянные времени интегрирования и дифференцирования, с;
$k$ — коэффициент усиления;
$t$ — текущее значение времени, с.

*Таблица 26.2*

**Настроечные параметры типовых регуляторов**

| Тип регулятора | Диапазон изменения параметров настройки | | |
|---|---|---|---|
| | $k$ | $T_и$, с | $T_д$, с |
| П | 0,3—10; 2,5—50 | — | — |
| И | 0,3—10; 2,5—50 | 5—500; 20—2000 | — |
| ПИ | 0,3—10; 2,5—50 | 5—500; 20—2000 | — |
| ПИД | 0,3—10; 2,5—50 | 5—500; 20—200 | 0—100 |
| ПД | 0,3—10; 2,5—50 | — | 0—400 |

Регуляторы типа РУН являются регуляторами прямого действия, воздействующими на возбуждение генератора путем автоматического изменения сопротивления угольного реостата, включенного в цепь его возбуждения. Регулятор состоит из трех основных элементов (рис. 26, 1, *а*). катушки электромагнита *1* с втягивающимся якорем *2*, угольного реостата *3* и противодействующей пружины *4*. Принципиальные схемы включения регулятора РУН приведены на рис. 26,1, *а—д*. Назначение элементов регулятора видно из приведенных схем. Угольный реостат регулятора обычно состоит из двух или четырех тонких угольных шайб и включается последовательно в цепь возбуждения генератора. При увеличении давления в угольном столбе его сопротивление уменьшается.

В случае, когда напряжение генератора равно заданному, реакция угольных столбов *3* и тяговое усилие электромагнита *1* уравновешиваются пружиной *4* независимо от положения якоря *2*. Поэтому регулятор имеет характеристику, близкую к астатической. Отклонения напряжения генератора от заданного значения вызывают перемещение якоря, что приводит к изменению давления в угольном столбе и, как следствие, к изменению электрического сопротивления столбов. В результате этого изменяется ток в цепи возбуждения, и напряжение генератора возвращается к своему первоначальному значению

При использовании регулятора в качестве автоматического реостата (рис. 26.1, *д*) угольное сопротивление включается в сеть последовательно с нагрузкой, а катушка электромагнита — параллельно нагрузке. При изменении напряжения в сети изменяется ток в катушке электромагнита, якорь перемещается, сопротивление угольного столба изменяется, в результате чего напряжение на нагрузке восстанавливается до заданного значения.

Изменение поддерживаемого значения напряжения в пределах 95—105% номинального значения в регуляторе РУН осуществляется с помощью регулировочного резистора $R_1$ или путем изменения натяга пружины *4*. Для увеличения номинального напряжения генератора необходимо увеличить сопротивление регулировочного резистора $R_1$. С целью устранения автоколебаний напряжения генераторов постоянного тока катушка электромагнита РУН шунтируется сопротивлением $R_2$ (см. рис. 26.1, *а*). Сопротивления $R_3$, $R_4$ и $R_5$ применяются при настройке регулятора. В генераторах переменного тока для этой же цели используется стабилизирующий трансформатор *ТС* (см. рис. 26.1, *в*). Для обеспечения параллельной работы генераторов переменного тока применяется компенсирующее сопротивление $R_7$ (см. рис. 26.1, *г*), которое получает питание от трансформатора тока и позволяет изменять статизм характеристики регулирования до 6%.

В случае выхода из строя регулятора РУН выходные клеммы угольного сопротивления шунтируются, и регулирование возбуждения генератора может осуществляться вручную с помощью шунтового реостата *ШР*.

Основные технические данные регуляторов типа РУН приведены в табл. 26.3.

Достоинствами регулятора являются простота конструкции, небольшие масса и габарит, невысокая стоимость. Из существенных его недостатков отметим следующие. Даже при сильном сжатии сопротивление угольного столба не снижается до нуля, поэтому невозможно добиться форсировки возбуждения. Регулятор имеет значительную инерционность, что приводит к увеличению провала напряжения и времени его восстановления. В условиях сильной тряски и вибрации работа угольного столбика нарушается, что приводит к нестабильности характеристики регулирования.

Мощность угольного реостата не должна превышать допустимого для данного типа регулятора значения (см. табл. 26.3), так как в случае длительного нагрева при температуре, превышающей допустимую, угольные шайбы постепенно разрушаются. Ввиду этого регуляторы необходимо устанавливать вдали от посторонних источников тепла. При установке регуляторов на судах следует применять амортизаторы.

В связи с указанными недостатками регуляторы типа РУН в настоящее время находят ограниченное применение. Все более широкое распространение на судах получают регуляторы напряжения с применением магнитных усилителей, дросселей и полупроводниковых элементов.

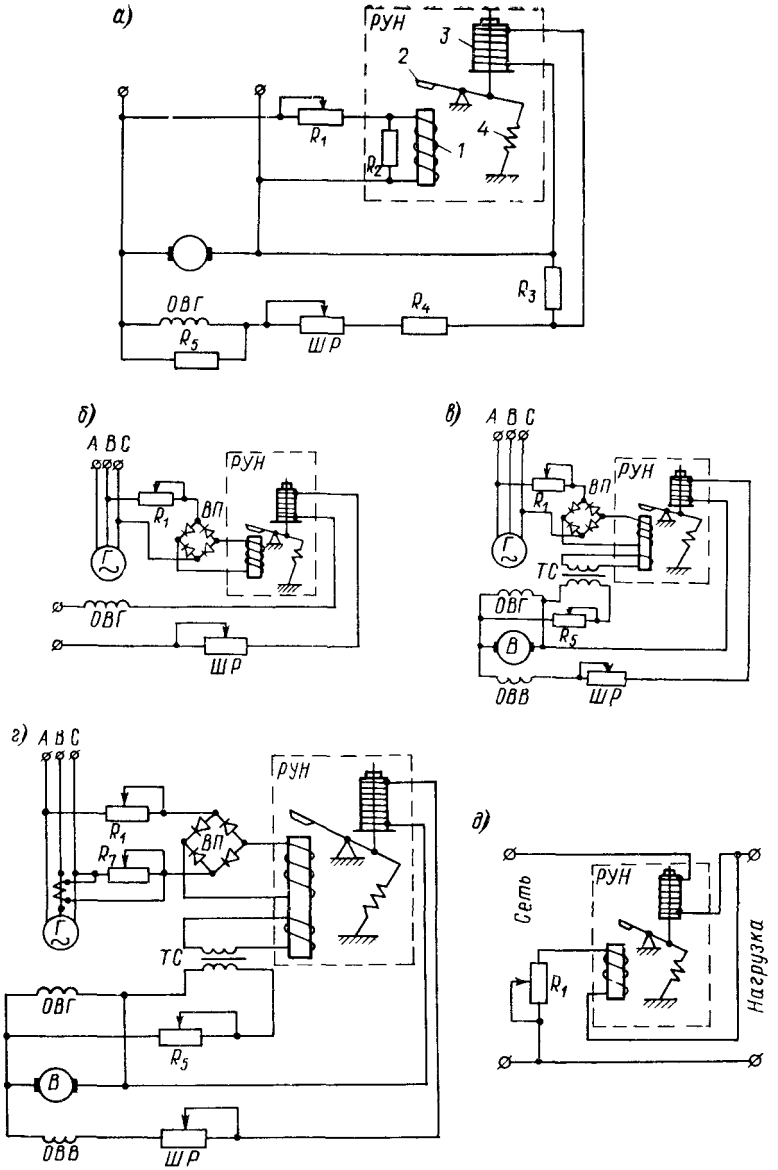



Рис. 26 1. Принципиальные схемы включения регулятора типа РУН: для генератора постоянного тока (*а*), для генератора переменного тока без стабилизирующего трансформатора (*б*) и со стабилизирующим трансформатором (*в*, *г*), при использовании регулятора в качестве автоматического реостата в цепи постоянного тока (*д*).

*В* — возбудитель, *ОВВ* — обмотка возбуждения возбудителя, *ОВГ* — обмотка возбуждения генератора *Г* — генератор, *ВП* — выпрямитель, *А*, *В*, *С* — фазы

*Таблица 26.3*

**Технические данные регуляторов типа РУН**

| Тип регулятора | Род тока | Номинальное напряжение, В | Ток в катушке, А | Потребляемая мощность, Вт | Схема включения |
|---|---|---|---|---|---|
| РУН-111, РУН-121 | Постоянный | 15—36<br>115<br>230 | 1,35<br>0,65<br>0,33 | 20—49<br>92<br>92 | Рис. 26.1, *а* |
| РУН-131, РУН-141 | | 15—36<br>115<br>230 | 1,35<br>0,65<br>0,33 | 20—49<br>92<br>92 | Рис. 26.1, *а* |
| РУН-111, РУН-121, РУН-131, РУН-131А, РУН-141 | | 25<br>230 | 0,65<br>0,15 | 17<br>35 | Рис. 26.1, *д* |
| РУН-111, РУН-121, РУН-131, РУН-131А, РУН-141 | Переменный | 115<br>230 | 0,65<br>0,33 | 75 | Рис. 26.1, *б* |
| | | 115<br>230 | 08<br>04 | 92 | Рис. 26.1, *в*, *г* |

**Регуляторы частоты вращения типа АЦР-4.** Автоматические центробежные регуляторы частоты вращения типа АЦР-4 предназначены для поддержания номинальной частоты вращения электрических агрегатов (преобразователей) серий АМГ-4, АЛП-3,5м и АМГ-17. Эти агрегаты используются в судовых электрических установках с номинальным напряжением 110 или 220 В. Регуляторы АЦР-4 выполняются нескольких модификаций, отличающихся друг от друга условиями использования (табл. 26 4).

Регулятор АЦР-4 *является регулятором прямого действия и состоит из* трех основных элементов (рис. 26.2). центробежного измерительного элемента *I*, специального коллектора *II* и регулировочного сопротивления *РС*. Центробежный измерительный элемент и коллектор представляют собой по существу датчик, который устанавливается на одном валу с электродвигателем. Центробежный измерительный элемент имеет три пары контактов ($K_1$, $K_2$ и $K_3$), состоящих из подвижных и неподвижных контактов. Подвижные контакты укреплены на стальных плоских пружинах, которые могут изгибаться под действием центробежных сил. Для точной регулировки зазоров между контактами предусмотрено перемещение подвижного контакта и стальной пружины. Предусмотрено также перемещение и *неподвижного контакта. Коллектор II состоит из* четырех зубчатых медных контактных колец, изолированных от корпуса и между собой миканитом Контактные кольца коллектора соединены с контактами измерительного элемента *I* (см. рис. 26.2) и с цепью возбуждения электродвигателя посредством семи угольных щеток. Для надежности связь цепи возбуждения с контактами измерительного элемента осуществляется двумя щетками (*1* и *2*, *3* и *4*, *5* и *6*) и только с неподвижным контактом $K_3$ связь осуществляется с помощью одной щетки *7*. При настройке добиваются последовательного замыкания контактов измерительного элемента при следующих скоростных режимах.

*Таблица 26.4*

**Модификация регуляторов АЦР-4**

| Тип регулятора | Условия использования | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Частота вращения, об/мин | | Исполнение | |
| | 1500—1700 | 2850—3300 | открытый | брызго-защищенный |
| АЦР-4,1 | × | — | × | — |
| АЦР-4,2 | — | × | × | — |
| АЦР-4,3 | × | — | — | × |
| АЦР-4,4 | — | × | — | × |

Примечание. Знаком × отмечены условия использования регулятора соответствующего типа.

а) контакты $K_1$ замыкаются при частоте вращения электродвигателя в диапазоне 97—99% номинального значения;

*б) контакты $K_2$ замыкаются при номинальной частоте вращения с отклонениями* ±5 об/мин;

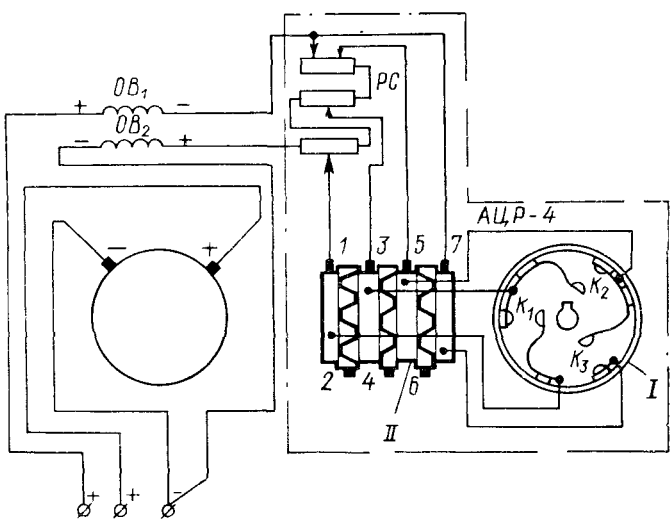



Рис. 26.2. Принципиальная схема регулятора АЦР-4.

в) контакты $K_3$ замыкаются при частоте вращения в диапазоне 101—103% номинального значения. Следовательно, при номинальной частоте вращения приводного электродвигателя контакты $K_1$ и $K_2$ замкнуты, а контакты $K_3$ разомкнуты. При снижении частоты вращения вследствие уменьшения центробежных сил происходит вначале размыкание контактов $K_2$, а при дальнейшем снижении частоты вращения — и контактов $K_1$. С увеличением частоты вращения электро-

двигателя выше номинального значения возрастают центробежные силы и вследствие этого замыкаются контакты $K_3$.

Размыкание или замыкание контактов $K_1$, $K_2$ и $K_3$ приводит к соответствующему изменению регулировочного сопротивления *РС*, включенного последовательно в цепь возбуждения приводного электродвигателя, которая состоит из двух встречно включенных обмоток $ОВ_1$ и $ОВ_2$. Это вызывает соответствующее изменение магнитного потока возбуждения и, следовательно, возвращение частоты вращения к своей номинальной величине.

Регуляторы типа АЦР-4 обеспечивают стабилизацию частоты вращения электродвигателя со следующей точностью:

а) ±0,5% — при изменении нагрузки от 100 до 70% номинального значения и стабильности напряжения в питающей сети;

б) +2% — при изменении нагрузки от 100 до 70% и повышении напряжения питающей сети на 45% номинального значения (220 В) или на 55% номинального значения (110 В);

в) +1% — при понижении напряжения питающей сети на 20% номинального значения и стабильной нагрузке 100%.

Регуляторы типа АЦР-4 обеспечивают указанную точность в течение 3000 ч работы, после чего следует произвести их проверку и настройку.

**Регуляторы непрямого действия. Регуляторы напряжения типа УБК.** Автоматический быстродействующий электромагнитный регулятор напряжения типа УБК (универсальное быстродействующее компаундирование) предназначен для стабилизации напряжения синхронных генераторов с заданным статизмом при холостом ходе и эксплуатационных режимах нагрузки, а также для форсировки возбуждения при снижении напряжения вплоть до короткого замыкания длительностью до 1 мин. Этот регулятор повышает устойчивость параллельно работающих генераторов, обеспечивая заданное распределение реактивной нагрузки между ними. Он применяется для генераторов низкого и высокого напряжения для электростанций различного назначения.

Регулятор УБК выпускается нескольких модификаций: УБК-0, УБК-1, УБК-М и УБК-У. Регулятор типа УБК-0 предназначен в основном для генераторов низкого напряжения мощностью до 100 кВт; УБК-1 и УБК-М — для генераторов низкого напряжения мощностью до 1000 кВт; УБК-У — для генераторов низкого и высокого напряжения мощностью до 12 000 кВт (для быстроходных генераторов) и до 1500 кВт (для тихоходных генераторов).

Регуляторы УБК имеют несколько исполнений, различающихся как по мощности, так и по вариантам сочетания напряжения и тока. Основные технические данные исполнений регуляторов типа УБК приведены в табл. 26.5.

Регуляторы обеспечивают стабилизацию напряжения во всех эксплуатационных режимах с точностью ±1—2% номинального значения при неизменной частоте тока в соответствии с уже установленным статизмом регулирования. Статизм может регулироваться в пределах ±(4—6)%. При изменении частоты тока в диапазоне ±4% напряжение изменяется не более чем на ±0,5% соответствующих номинальных значений. Изменение номинала напряжения генератора обеспечивается в диапазоне от +7 до —15%.

**Системы автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов с тиристорами.** *Тиристоры (управляемые вентили) отличаются большой* надежностью, высокой механической прочностью, простотой конструкции, бесшумностью, высокой вибростойкостью и малой инерционностью (порядка 25—35 мкс). Благодаря этим достоинствам тиристоры широко применяются в современных судовых системах автоматического регулирования напряжения синхронных генераторов, которые можно подразделить на три группы: системы, осуществляющие *принцип регулирования по отклонению напряжения*; *комбинированные* системы с токовым и амплитудно-фазовым компаундированием.

Система регулирования по отклонению напряжения (рис. 26.3, *а*) состоит из следующих основных элементов: трансформаторов напряжения $TH_1$ и $TH_2$, тиристоров *Т*, фазосмещающего устройства *ФУ* и корректора напряжения *КН*. Трансформатор $TH_1$ служит для питания обмотки возбуждения генератора, которое осуществляется через *тиристоты Т*, *управляемые током фазосмещающего* устройства *ФУ*. При отклонении напряжения генератора от заданного значения

*Таблица 26.5*

**Основные технические данные регуляторов типа УБК**

| Тип регулятора | Номер исполнения | Наибольшие выпрямленные значения на выходе регулятора | | Наибольшая мощность, Вт |
|---|---|---|---|---|
| | | напряжения, В | тока, А | |
| УБК-0 | 1 | 45 | 4,5 | 200 |
| УБК-1 | 1 | 20 | 8 | 160 |
| | 2 | 40 | 4 | 160 |
| | 3 | 40 | 8 | 320 |
| | 4 | 80 | 4 | 320 |
| УБК-У | 1 | 50 | 8 | 400 |
| | | 100 | 4 | 400 |

изменяется фаза сигналов, поступающих от *ФУ* на управляющие электроды тиристоров, что приводит к изменению тока возбуждения в направлении, соответствующем восстановлению напряжения. Сигнал об отклонении напряжения поступает от *КН*. Трансформатор $TH_2$ служит для питания *ФУ* и *КН*. Существенный недостаток данной схемы заключается в том, что при коротком замыкании генератор теряет возбуждение. Однако эта особенность системы при наличии быстродействующей защиты от токов короткого замыкания может играть положительную роль, уменьшая вредное влияние переходных токов на электрооборудование. Благодаря простоте схемы уменьшаются массогабаритные показатели и увеличивается надежность по сравнению со схемами токового и фазового компаундирования.

Система с токовым компаундированием (рис. 26, 3, *б*) включает в себя наряду с элементами предыдущей системы также трансформатор тока *ТТ*, предназначенный для дополнительного питания обмотки возбуждения генератора через выпрямитель *В* при нагрузке и коротких замыканиях. В режиме холостого хода возбуждение генератора обеспечивается только током трансформатора $TH_1$, регулируемого тиристорами *Т*. Поддержание номинального значения напряжения при работе генератора осуществляется с помощью корректора напряжения *КН* и фазосмещающего устройства *ФУ*, воздействующего на тиристоты *Т*.

В комбинированной схеме регулирования (рис. 26, 3, *в*) имеется трансформатор фазового компаундирования *ТФК*, на выходе рабочих обмоток которого включены тиристоры, управляемые током КН. Введение тиристоров вместо дросселя отбора существенно снижает массогабаритные показатели и повышает быстродействие схемы.

Рассмотренные системы обеспечивают точность стабилизации напряжения ±(1—2,5%) при изменении тока нагрузки от 0 до 125%, коэффициента мощности от 0,4 до 1 и частоты вращения первичного двигателя в пределах ±(2—3)% соответствующих номинальных значений.

**Регулятор возбуждения синхронных двигателей РВСД.** Регулятор типа РВСД предназначен для регулирования коэффициента мощности мощных синхронных двигателей с электромашинным возбудителем и различным характером изменения активной нагрузки (кроме ударно-цикличной с паузами между изменениями нагрузки менее 6 с). Он рассчитан для работы при температуре окружающего воздуха 5—40° С, относительной влажности не более 90% при температуре

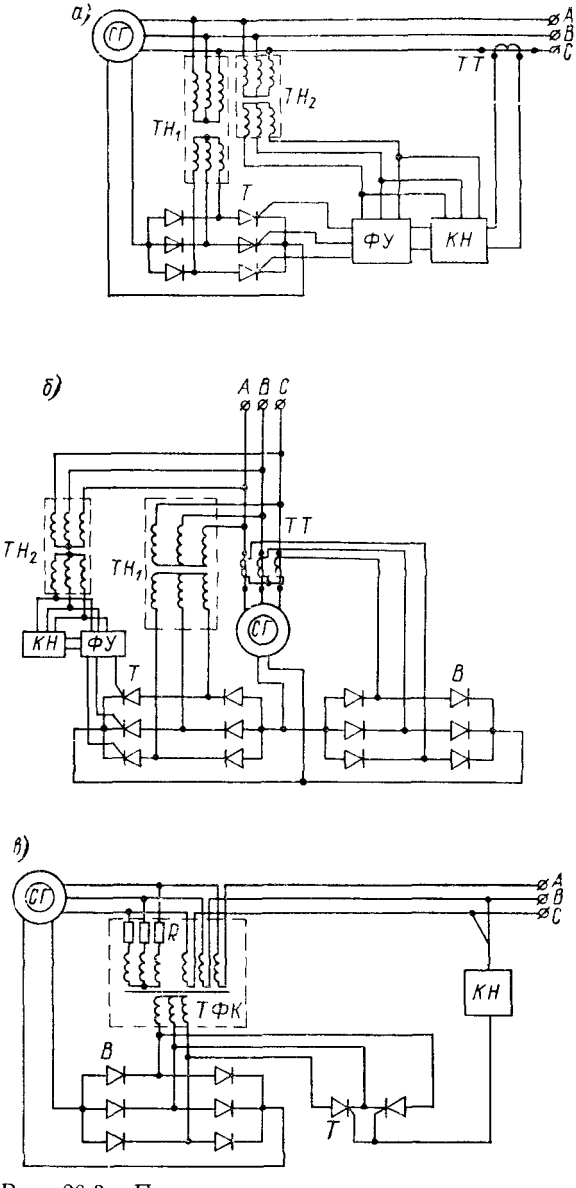



Рис. 26.3. Принципиальные схемы регулирования напряжения синхронных генераторов с применением тиристоров: по принципу регулирования по отклонению (*а*); по комбинированному принципу — с токовым (*б*) и с амплитудно-фазовым (*в*) компаундированием.

20° С и не более 50% при температуре 40° С. Рабочее положение регулятора — вертикальное.

Регулирование коэффициента мощности синхронного двигателя (*СД*) осуществляется путем соответствующего воздействия на возбуждение возбудителя двигателя. Основными возмущающими воздействиями здесь следует считать напряжение сети и момент сопротивления на валу двигателя. Поскольку коэффициент мощности синхронного двигателя определяется углом сдвига между напряжением и током статора, то условно в качестве регулируемой величины можно принять ток нагрузки. Поэтому функциональную схему системы регулирования коэффициента мощности синхронного двигателя с регулятором РВСД можно представить в виде, приведенном на рис. 26.4.

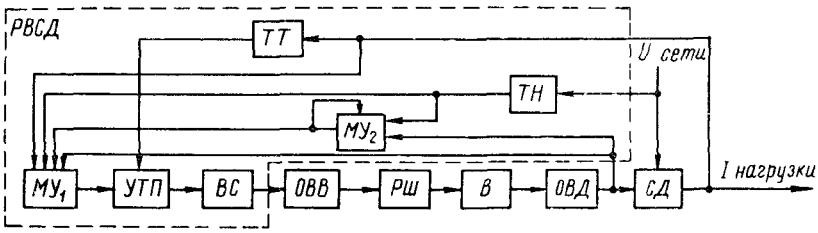



Рис. 26.4. Функциональная схема системы регулирования коэффициента мощности синхронного двигателя с регулятором типа РВСД.

Регулятор имеет следующие основные технические характеристики:

| | |
|---|---|
| Мощность возбуждения возбудителей в номинальном режиме (коэффициент мощности рабочего двигателя 0,9), Вт | Не более 400 |
| Наибольшее напряжение на выходе регулятора (на вторичной обмотке УТП), В | 100 |
| Регулирование возбуждения двигателей обеспечивается при изменении их активной нагрузки в пределах 25—100% номинальной | |

Из этой схемы видно, что система осуществляет комбинированный принцип регулирования. В системе имеется ряд внутренних корректирующих обратных связей, позволяющих регулятору выполнять следующие функции: поддерживать заданный коэффициент мощности двигателя при нормальном значении напряжения питающей сети; при изменении напряжения питающей сети менять возбуждение двигателя (с помощью шунтового реостата *РШ*, обмотки возбуждения двигателя *ОВД* и др.) для поддержания постоянного напряжения; ограничивать ток статора и напряжение питающей сети; ограничивать ток статора и напряжение возбуждения (на обмотке ротора двигателя) по достижении ими своих максимально допустимых значений; предотвращать снижение тока возбуждения двигателя ниже минимально допустимого значения. В режиме форсировки возбуждения двигателей регулятор обеспечивает увеличение тока на вторичной обмотке управляемого трансформатора подмагничивания (УТП) не менее чем в два раза по отношению к наибольшему рабочему току. При этом силовой выпрямитель *ВС* регулятора должен выдерживать напряжение не менее 200 В и ток не менее 25 А в течение 30 с.

Входные сигналы на регулятор по напряжению сети и току нагрузки поступают через трансформаторы тока *ТТ* и напряжения *ТН* с номинальными параметрами на выходе соответственно 5 А и 100 В. Напряжение на трансформаторе тока, питающем последовательную первичную обмотку *УТП*, в режиме максимальной нагрузки регулятора не должно превышать 150 В. Питание магнитных усилителей (*МУ*) регулятора осуществляется от *ТН*.

Регулятор в зависимости от соединения секций вторичной обмотки трансформатора УТП имеет два исполнения: исполнение 1 — длительно допустимый ток на выходе регулятора (на вторичной обмотке УТП) 4 А; исполнение 2 — длительно

допустимый ток на выходе регулятора 8 А. Все элементы регулятора размещаются в одном шкафу.

Общие технические требования к электрическим регуляторам как к одному из видов аналоговых электрических устройств государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП) определяются ГОСТ 13033—67 и ГОСТ 7191-69. Исполнительные механизмы электрических регуляторов должны удовлетворять требованиям ГОСТ 7192—74.

Регуляторы должны быть рассчитаны на диапазоны изменения входного сигнала, соответствующие значениям регулируемой величины согласно ГОСТ 9895—69, ГОСТ 6651—59 или ГОСТ 6616—61 при пределах измерения по ГОСТ 7164—71, и на диапазон изменения выходного регулирующего воздействия по ГОСТ 7192—74.

Требования по устойчивости регулятора к воздействиям окружающей среды (вибрация, температура, влажность и т. п.) и методика их испытаний определяются ГОСТ 12997—67. Габаритные и установочные размеры регуляторов должны соответствовать ГОСТ 5944—68, за исключением исполнительных механизмов, магнитных усилителей и других оперативных органов управления, габаритные и установочные размеры которых должны быть указаны в стандартах и технических условиях на эти блоки. Проверку регуляторов на надежность следует производить по ГОСТ 13216—74.

ГЛАВА VI

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

## § 27. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

В электронных лампах используются свободные электроны, полученные в результате термоэлектронной эмиссии. Источником свободных электронов являются катоды, выполненные из металлов, внешние электроны которых слабо связаны с атомами и легко от них отделяются под действием нагрева.

По способу нагрева катода различают лампы двух видов: прямого накала и косвенного подогрева. В лампах прямого накала катод нагревается электрическим током, проходящим непосредственно по катоду. В лампах косвенного подогрева катод нагревается от нити накала, по которой проходит ток.

Простейшей электронной лампой является *диод*, представляющий собой баллон из стекла, металла или керамики, внутри которого создан вакуум и помещены два электрода: анод и катод. При нагреве катод излучает электроны, которые образуют вокруг него электронное облако. Если к аноду лампы приложить положительный потенциал, то под действием электрического поля электроны начнут перемещаться к аноду. Промежуток между анодом и катодом замыкается электронным потоком, и во внешней цепи возникает так называемый анодный ток. Когда по диоду проходит ток, говорят, что диод открыт. Чем больше положительный потенциал на аноде, тем больше анодный ток и меньше электронное облако катода. Если на аноде отрицательный потенциал, то электроны отталкиваются от анода, анодный ток равен нулю, лампа закрыта.

*Триод* отличается от диода наличием третьего электрода — сетки, которая расположена между анодом и катодом. Изменяя величину и полярность напряжения на сетке, можно изменять величину анодного тока лампы. Чем больше отрицательное напряжение на сетке, тем меньше анодный ток.

Названия электронных приборов соответствуют числу главных электродов. Так, тетрод, пентод, гексод и гептод содержат кроме анода и катода две, три, четыре и пять сеток соответственно.

Для уменьшения размеров и массы электронной аппаратуры были разработаны комбинированные лампы, в которых в одном баллоне содержатся два электронных прибора.

Обозначение электронных приборов состоит из четырех знаков. Первая цифра обозначает (округленно) напряжение накала катода в вольтах. Второй знак — буква — обозначает вид прибора. Д — диоды, Х — двойные диоды, Г — диод-триоды, Б — дио,-пентоды, С — триоды, Н — двойные триоды, Ф — триод-пентоды, Э — тетроды, Ж и К — пентоды с короткой и удлиненной характери-

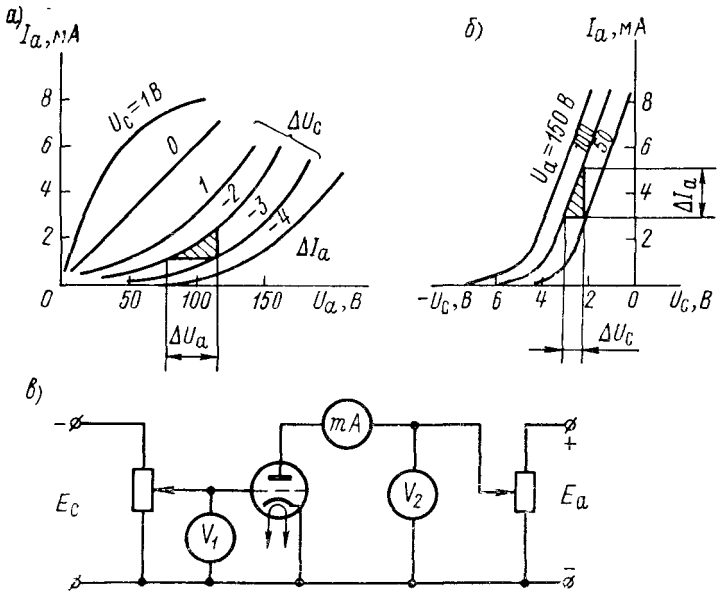



Рис. 27.1. Характеристики (*а*, *б*) и схема включения (*в*) триода.

стикой, Р — двойные тетроды и пентоды, П — выходные пентоды и лучевые тетроды, А — частотно-преобразовательные лампы, Е — электронно-светящиеся индикаторы, Ц — кенотроны.

Третий знак — цифра — обозначает порядковый номер типа прибора.

Четвертый знак — буква — обозначает конструктивное оформление прибора: С — стеклянный баллон, К — керамический баллон, П — миниатюрный баллон (диаметром 19 и 22,5 мм), сверхминиатюрный баллон Г (диаметром более 10 мм), Б (диаметром менее 10 мм), А (диаметром 6 мм), Р (диаметром 4 мм). Лампы, в обозначении которых нет четвертого знака, имеют металлический баллон.

Для выбора оптимального режима работы лампы и определения ее параметров используют анодные и анодно-сеточные характеристики (рис. 27.1, *а*, *б*). На рис. 27.1, *в* приведена схема включения триода, предназначенная для снятия статических характеристик этих ламп. Зная одну из характеристик, можно построить вторую, так как обе они устанавливают связь между анодным током $I_a$, анодным напряжением $U_a$ и сеточным напряжением $U_c$. Из характеристик видно, что при сравнительно большом отрицательном напряжении на сетке анодный ток небольшой, несмотря на значительное анодное напряжение. На этом участке на электроны катода кроме отрицательного потенциала на сетке действует отрицатель-

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6Н12С | 6,4 | 17 | 2,6 | 4,2 | 180 | 23 | 6,3 | 0,9 | — | — |
| 6Н13С | 5,5 | 2,5 | 0,46 | 13,0 | 90 | — | 6,3 | 2,5 | — | — |
| 6С51Н-В | 11,5 | 32 | — | 1 | 75 | 10 | 6,3 | 0,13 | — | — |
| 6С52Н-В | 10 | 64 | — | 1 | 110 | 8 | 6,3 | 0,13 | — | — |
| 6С53Н-В | 13 | 75 | — | 1 | 120 | 11 | 6,3 | 0,13 | — | — |
| 6С4С | 5,4 | 4,1 | 0,84 | 15 | 250 | 62 | 6,3 | 1,0 | —45 | — |
| 6С18С | 40 | 3,2 | 0,08 | 60 | 120 | 550 | 6,3 | 6,6 | — | — |
| 6С33С | 45 | 3,6 | 0,08 | 60 | 120 | 550 | 6,3 | 6,6 | — | — |
| 6Б2П | 2,7 | — | 700 | 1,1 | 250 | 6,5 | 6,3 | 0,3 | —1,5 | +100 |
| 6Ж32П | 1,8 | — | 2500 | 1 | 250 | 3 | 6,3 | 0,2 | —2 | +140 |
| 6П1П | 4,9 | — | 42,5 | 12 | 250 | 44 | 6,3 | 0,5 | —12 | 250 |
| 6П13С | 9,5 | — | 25 | 14 | 200 | 58 | 6,3 | 1,3 | —19 | 200 |
| 6П14П | 11,3 | — | 30 | 12 | 250 | 48 | 6,3 | 0,76 | — | 250 |
| 6П15П | 14,7 | — | 100 | 12 | 300 | 30 | 6,3 | 0,76 | — | 150 |
| 6П18П | 11 | — | 22 | 12 | 170 | 53 | 6,3 | 0,76 | — | 170 |
| 6П33П | 10 | — | — | 12 | 170 | 10 | 6,3 | 0,9 | —12 | 170 |
| 6К8П | 1,1 | — | 190 | 0,5 | 12 | 0,9 | 6,3 | 0,3 | — | 3,2 |
| 6К11Б | 4,8 | — | — | 1,3 | 120 | 8 | 6,3 | 0,2 | — | 120 |
| 6Ф3П | 7 | — | 15 | 8 | 170 | 41 | 6,3 | 0,8 | —11 | 170 |
| 6П31С | 12,5 | — | 4 | 10 | 100 | 80 | 6,3 | 1,3 | —9 | 100 |

*Таблица 27.1*

**Параметры электронных ламп**

| Тип лампы | $S$, мА/В | $\mu$ | $R_i$, кОм | $P_а$, Вт | $U_а$, В | $I_а$, мА | $U_н$, В | $I_н$, А | $U_{с1}$, В | $U_{с2}$, В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6С36К | 12 | 145 | 12 | 3 | 250 | — | 6,3 | 0,32 | —15 | — |
| 6С37Б | 16,5 | 13 | 0,78 | 4,5 | 80 | 40 | 6,3 | 0,44 | — | — |
| 6С40П | 0,2 | 1000 | $5 \cdot 10^3$ | 6 | 20 000 | | 6,3 | 0,17 | —17 | — |
| 6С41С | 21 | 3,15 | 0,15 | 25 | 90 | 250 | 6,3 | 2,7 | — | — |
| 6С2П | 11,5 | 48 | 4,2 | 2,5 | 150 | 14 | 6,3 | 0,4 | — | — |
| 6С3П | 19,5 | 50 | 2,5 | 3 | 150 | 16 | 6,3 | 0,3 | — | — |
| 6С4П | 20 | 50 | 2,5 | 3 | 150 | 16 | 6,3 | 0,3 | — | — |
| 6С15П | 45 | 52 | 1,1 | 7,8 | 150 | 40 | 6,3 | 0,44 | — | — |
| 6С19П | 7,5 | 3,1 | 0,3 | 11 | 100 | 95 | 6,3 | 1,0 | — | — |
| 6Н1П | 4,3 | 35 | 11 | 2,2 | 250 | 7,5 | 6,3 | 0,6 | — | — |
| 6Н2П | 2 | 97,5 | 47 | 1 | 250 | 2,3 | 6,3 | 0,35 | — | — |
| 6Н3П | 5,9 | 36 | 6,2 | 1,5 | 150 | 8,5 | 6,3 | 0,35 | — | — |
| 6Н5П | 4,2 | 27 | 6,5 | 2,2 | 250 | 8 | 6,3 | 0,6 | — | — |
| 6Н6П | 11 | 20 | 1,8 | 4,8 | 120 | 30 | 6,3 | 0,75 | —2 | — |
| 6Н14П | 6,8 | 25 | 3,2 | 1,5 | 90 | 10 | 6,3 | 0,35 | —1,3 | — |
| 6Н15П | 5,6 | 38 | 6,8 | 1,6 | 100 | 9 | 6,3 | 0,45 | —0,5 | — |
| 6Н7С | 3,2 | 35 | 11 | 6,0 | 294 | 6,7 | 6,3 | 0,81 | — | — |
| 6Н8С | 2,6 | 20 | 7,7 | 2,7 | 250 | 9 | 6,3 | 0,6 | — | — |
| 6Н9С | 1,6 | 70 | 44 | 1,1 | 250 | 2,3 | 6,3 | 0,3 | — | — |

ный объемный заряд электронного облака, находящегося между катодом и сеткой. По мере уменьшения отрицательного потенциала на сетке лампы электронное облако уменьшается и анодный ток увеличивается по закону

$$I_a = gU_a^{\frac{3}{2}},$$

где $g$ — постоянный коэффициент, зависящий от конструкции лампы.

Из этого выражения следует, что анодный ток растет быстрее, чем анодное напряжение.

Верхний участок анодно-сеточной характеристики называется участком насыщения. В этой области анодный ток не увеличивается из-за отсутствия электронного облака.

Из статических характеристик можно определить параметры, которые характеризуют свойства электронного прибора. Для этого необходимо воспользоваться прямолинейной (рабочей) частью характеристик.

Основные параметры ламп следующие.

1. *Крутизна характеристики* $S$, показывающая, на сколько миллиампер изменяется анодный ток лампы при изменении напряжения на сетке на 1 В:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{I_{a1} - I_{a2}}{U_{c1} - U_{c2}} \quad \text{при } U_a = \text{const}.$$

Чем гуще сетка и чем ближе она расположена к катоду, тем больше крутизна характеристики.

2. *Коэффициент усиления* $\mu$, показывающий, во сколько раз напряжение на сетке действует на анодный ток сильнее, чем напряжение на аноде:

$$\mu = -\frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \quad \text{при } I_a = \text{const}.$$

Минус означает, что $U_a$ и $U_c$ оказывают на ток различные действия. Статический коэффициент усиления лампы $\mu$ больше динамического коэффициента усиления $K$, который зависит еще и от анодной нагрузки:

$$K = \mu \frac{R_a}{R_a + R_i}.$$

3. *Внутреннее сопротивление лампы* $R_i$, определяющее сопротивление, которое оказывает лампа переменному току:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad \text{при } U_c = \text{const}.$$

Параметры электронной лампы связаны между собой внутренним уравнением

$$\mu = SR_i,$$

по которому определяют неизвестный параметр, если известны два других.

Числовые значения параметров широко применяющихся приемно-усилительных ламп приведены в табл. 27.1. Там же указаны другие важнейшие показатели: мощность, рассеиваемая на аноде, $P_a$; типовое напряжение на аноде $U_a$ и анодный ток $I_a$; типовое напряжение на сетках $U_{c1}$, $U_{c2}$; напряжение и ток накала $U_н$, $I_н$.

## § 28. ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Работа ионных приборов основана на прохождении электрического тока через газ, т. е. на явлении разряда, поэтому ионные приборы называются также газоразрядными лампами.

По способу возникновения разряда ионные приборы подразделяются на лампы с самостоятельным и несамостоятельным разрядом. Приборы с самостоятельным разрядом имеют холодный катод. Ток в этих приборах обеспечивается за счет разности потенциалов между электродами. В лампах с несамостоятельным разрядом

недостаточно иметь напряжение между электродами. Здесь необходимо ионизировать газовый промежуток при помощи внешних сил. Внешним ионизатором может быть нагрев, воздействие света или радиоактивного излучения.

По мощности разряда различают ионные приборы темнового, тлеющего и дугового разряда.

Рассмотрим некоторые ионные приборы, применяющиеся в современных схемах автоматики.

**Индикаторные лампы.** Неоновые лампы предназначены для визуального определения состояния устройств дискретного действия, для работы в качестве указателей напряжения и тока, для использования в простейших релаксационных генераторах.

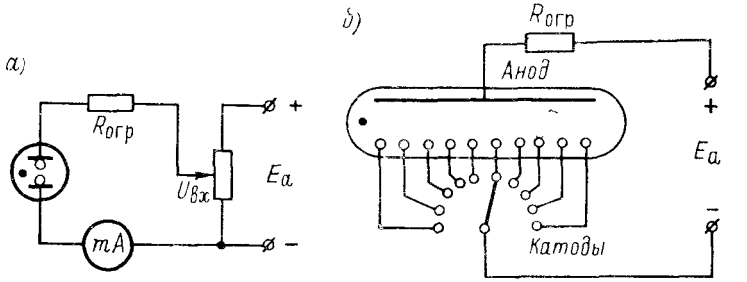



Рис. 28.1. Схемы включения неоновой лампы (*а*) и цифрового индикатора (*б*).

Неоновая лампа представляет собой стеклянный баллон, наполненный инертным газом. Внутри прибора имеются два электрода: анод и катод. На рис. 28.1, *а* показана схема включения неоновой лампы. При увеличении напряжения $U_{вх}$ от нуля до нескольких десятков вольт ток в лампе практически отсутствует (если не считать темнового микротока). При напряжении 50—150 В в неоновых лампах происходит ударная ионизация газа, т. е. образование массы свободных электронов, которые притягиваются к положительному аноду, в то время как положительные ионы направляются к отрицательному катоду.

В связи с этим сопротивление лампы уменьшается, а ток в цепи возрастает. Последовательно с лампой необходимо включать резистор $R_{орг}$, который ограничивает значение тока. При отсутствии резистора величина тока стремится к бесконечности и ионный прибор взрывается.

При ионизации происходит не только процесс отделения от атомов газа свободных электронов, но и процесс возбуждения атомов газа. Возбужденные электроны атома возвращаются с более высокого энергетического уровня на прежнюю орбиту. При этом запасенная энергия электронов выделяется в виде излучения волн видимой длины. Поэтому в лампе наблюдается ровное оранжевое свечение (тление) газа.

Основные параметры неоновых ламп следующие:

1) *напряжение зажигания* $U_{заж}$ — напряжение на электродах лампы, при котором возникает ударная ионизация и лампа начинает светиться;

2) *напряжение горения* $U_{гор}$ — напряжение, которое будет на лампе после возникновения разряда;

3) *наибольший рабочий ток* $I_{раб}$ — значение тока разряда, на которое рассчитан прибор.

Фактический ток лампы должен быть меньше рабочего тока. Для этого величину ограничивающего резистора определяют по формуле

$$R_{огр} = \frac{U_{вх} - U_{гор}}{I_{раб}}.$$

*Таблица 28.1*

**Основные параметры индикаторных ламп**

| Тип лампы | $U_{заж}$, В | $U_{гор}$, В | $I_{раб}$, мА | Род тока | Размеры, мм: Диаметр | Размеры, мм: Длина | Срок службы, ч | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Неоновые лампы* | | | | | | | | |
| ВМН-1 | 160 | — | 2 | — | 10 | 49 | — | Волномерная |
| ВМН-2 | 126 | — | — | — | 7 | 37 | — | |
| МН-3 | 48—65 | — | 1 | Постоянный | 15 | 35 | 300 | Шесть групп ламп |
| МН-4 | 80 | — | 2 | То же | 15 | 35 | 500 | — |
| МН-5; ТН-0,3 | 150 | 65 | 0,3 | » | 9 | 33 | 200 | — |
| МН-6 | 90 | — | 0,8 | » | 6,8 | 28 | 100 | — |
| МН-6А | 55 | — | 0,8 | » | 6,8 | 28 | — | — |
| МН-7 | 87 | — | 2 | » | 15 | 40 | 200 | — |
| МН-8; ТН-0,2 | 85 | 65 | 0,25 | » | 9 | 33 | 200 | — |
| МН-11 | 85 | — | 4 | » | 14,5 | 42 | — | — |
| МН-12 | 95 | — | 0,2 | » | 9,5 | 34,5 | — | — |
| МН-15 | 220 | — | 0,45 | — | 9,5 | 38 | — | — |
| ПН-1; ТН-0,9 | 200 | 150 | 0,9 | Постоянный | 16 | 45 | 300 | — |
| ПН-2 | 115 | — | 0,9 | — | 16 | 52 | — | — |
| ПН-3; ТН-0,5 | 90 | 55 | 0,5 | Постоянный | 15,5 | 45 | 300 | — |
| СН-1; ТН-20 | 150 | — | 20 | Переменный | 55 | 90 | 1000 | — |
| СН-2; ТН-30 | 82 | — | 30 | То же | 55 | 90 | 1000 | — |
| ТМН-2 | 200 | — | 30 | — | 30 | 77 | — | — |
| УВН-1 | 550 | — | — | Переменный | 9 | 70 | — | — |
| ФН-2; ТН-1 | 140 | 49 | 1 | То же | 9,2 | 24 | 100 | — |
| 95СГ9 | 95 | — | 3 | — | 11 | 36 | — | — |
| ТНИ-1,5 | 120 | 90 | 1,5 | Постоянный, переменный | — | — | 1000 | — |
| *Неоновые люминофорные лампы* | | | | | | | | |
| ТЛО-3-1 | 160 | 80 | 3 | — | 15 | 40 | 2000 | Оранжевое свечение |
| ТЛО-1-1 | 160 | 80 | 1 | — | 9 | 30 | 2000 | Оранжевое |
| ТЛЗ-3-1 | 160 | 80 | 3 | — | 15 | 40 | 2000 | Зеленое |
| ТЛЗ-1-1 | 160 | 80 | 1 | — | 9 | 30 | 2000 | » |
| ТЛЖ-3-1 | 160 | 80 | 3 | — | 15 | 40 | 2000 | Желтое |
| ТЛЖ-1-1 | 160 | 80 | 1 | — | 9 | 30 | 2000 | » |
| ТЛГ-3-1 | 160 | 80 | 3 | — | 15 | 40 | 2000 | Голубое |
| ТЛГ-1-1 | 160 | 80 | 1 | — | 9 | 30 | 2000 | » |

*Продолжение табл. 28.1*

| Тип лампы | $U_{заж}$, В | $U_{гор}$, В | $I_{раб}$, мА | Род тока | Размеры, мм: Диаметр | Размеры, мм: Длина | Срок службы, ч | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Цифровые индикаторы | | | | | | | | |
| ИН-1 | 200 | 130 | 3,0 | — | 30,5 | 65 | 1000 | — |
| ИН-2 | 200 | 130 | 2,0 | — | 17 | 28 | 5000 | — |
| ИН-4 | 200 | 160 | 3,0 | — | 29 | 53 | 1000 | — |
| ИН-8 | 200 | 140 | 3,5 | — | 17 | 55 | 5000 | — |
| ИН-8-2 | 200 | 140 | 3,5 | — | 17 | 55 | 5000 | Одна запятая |
| ИН-12А | 200 | 170 | 3,0 | — | 16 | 35 | 5000 | — |
| ИН-12Б | 200 | 170 | 3,0 | — | 18 | 35 | 5000 | Одна запятая |
| ИН-14 | 200 | 170 | 3,0 | — | 19 | 55 | 5000 | Две запятых |

В табл. 28.1 приведены основные параметры неоновых ламп. В обозначении неоновых ламп первая буква определяет вид разряда (Т — тлеющая), вторая (Н) — неоновое наполнение. Цифра соответствует наибольшему току разряда в миллиамперах, на который рассчитана лампа.

Люминофорные лампы. В некоторых сигнальных лампах внутренняя поверхность баллона покрыта люминофором. В таких лампах энергия тлеющего разряда воздействует на люминофор, который начинает светиться. Цвет свечения зависит от состава люминофора и газа и бывает оранжевым, зеленым, желтым и голубым. Основные параметры тлеющих (Т) люминофорных (Л) ламп приведены в табл. 28.1.

Ионные сигнальные лампы по сравнению с сигнальными лампами накаливания имеют следующие преимущества: малое потребление электроэнергии, отсутствие теплового излучения, значительный срок службы, малая стоимость, небольшие размеры.

Цифровые индикаторы. В последние годы стали широко применять индикаторные приборы, в которых представление светового сигнала осуществляется в знаковой форме — в виде цифр, букв, запятых. В баллоне цифрового индикатора имеется один анод, выполненный в виде сетчатой пластины, и десять катодов в виде цифр, отстоящих друг от друга на расстоянии 1 мм по глубине лампы. При подаче напряжения между анодом и выбранным катодом возникает разряд, и оранжевое свечение повторяет форму катода — цифры. На рис. 28.1, *б* приведена схема включения цифрового индикатора, а в табл. 28.1 — его основные параметры.

**Стабилитроны.** Стабилитроны — газонаполненные диоды, предназначенные для поддержания неизменным выходного напряжения на нагрузке при изменении тока нагрузки или постоянного напряжения питающей сети.

Стабилитрон представляет собой лампу, наполненную инертным газом, в которой находятся два электрода: анод в виде стержня и катод в виде цилиндра из никеля или молибдена. Схема включения стабилитрона приведена на рис. 28.2, *а*. При увеличении входного напряжения от нуля и выше будет увеличиваться напряжение $U_{вых}$ на выходе в соответствии со вторым законом Кирхгофа до тех пор, пока в стабилитроне не возникнет ударная ионизация газа. На некоторой части катода появляется свечение. После этого дальнейшее увеличение $U_{вх}$ приводит к увеличению тока стабилитрона, и свечение газа захватывает все бо́льшую часть

поверхности катода. Таким образом, при увеличении $U_{вх}$ внутреннее сопротивление $R_0$ лампы уменьшается, ток стабилитрона $I_{ст}$ увеличивается, а произведение тока на внутреннее сопротивление $U_{вых}$ остается практически постоянной величиной. Если свечение захватывает всю поверхность катода, то стабилизация прекращается и с ростом входного напряжения увеличивается выходное напряжение. Зависимость выходного напряжения от входного напряжения приведена на рис. 28.2, *б*.

Основные параметры стабилитронов следующие.

1. *Напряжение зажигания* $U_{заж}$ — напряжение, при котором возникает тлеющий разряд в лампе. Для снижения напряжения зажигания в некоторых лампах активируются катоды, в других с внутренней стороны катода приваривают шпырек, направленный в сторону анода.

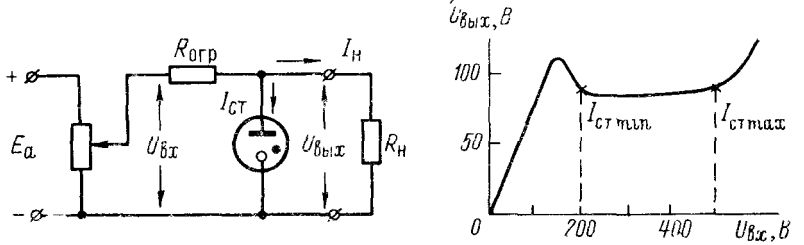



Рис. 28.2. Схема включения стабилитрона (*а*) и его выходная характеристика (*б*).

2. *Напряжение стабилизации* $U_{ст}$ — рабочее напряжение на стабилитроне после его зажигания, являющееся практически постоянной величиной. По напряжению стабилизации различают низковольтные стабилитроны ($U_{ст}$ = 70—200 В) и высоковольтные стабилитроны ($U_{ст}$ = 1—30 кВ).

3. *Минимальный* $I_{ст\,min}$ и максимальный $I_{ст\,max}$ ток стабилизации — диапазон изменения анодного тока диода, при котором $U_{ст}$ = const. При большом диапазоне ($I_{ст\,min}$ — $I_{ст\,max}$) диоды применяются для непосредственной стабилизации постоянного напряжения. При меньшем диапазоне токов стабилитроны используются в качестве источника эталонного напряжения в электронных компенсационных стабилизаторах напряжения.

4. *Наибольший ток стабилитрона* $I_{а\,max}$ — наибольший допустимый анодный ток лампы. Фактический анодный ток должен быть всегда меньше наибольшего тока. Для ограничения анодного тока последовательно со стабилитроном включают ограничивающий резистор, сопротивление которого можно определить по формуле

$$R_{огр} = \frac{U_{вх} - U_{вых}}{I_{ст} + I_н},$$

где

$$U_{вх} = \frac{U_{вх\,max} + U_{вх\,min}}{2};$$

$$I_{ст} = \frac{I_{ст\,max} + I_{ст\,min}}{2};$$

$$I_н = \frac{U_{вых}}{R_н} = \frac{U_{ст}}{R_н}.$$

5. *Изменение напряжения стабилизации* $\Delta U_{ст}$ — при изменении тока стабилизации от $I_{ст\ min}$ до $I_{ст\ max}$.

В табл. 28.2 приведены основные параметры низковольтных стабилитронов.

*Таблица 28.2*

**Основные параметры стабилитронов**

| Тип стабилитрона | $U_{заж}$, В | $U_{ст}$, В | $I_{ст\ min}$, мА | $I_{ст\ max}$, мА | $I_{а\ max}$, мА | $\Delta U_{ст}$, В | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| СГ1П | 175 | 143 | 5 | 30 | 40 | 3,5 | Миниатюрное (пальчиковое) оформление |
| СГ1П-В | 170 | 150 | 5 | 30 | 40 | 2,5 | |
| СГ1П-Е | 170 | 150 | 5 | 30 | 30 | 2,5 | |
| СГ2П | 150 | 108 | 5 | 30 | 40 | 2,5 | |
| СГ2С | 105 | 75 | 5 | 40 | 40 | 6 | — |
| СГ3С | 127 | 108 | 5 | 40 | 40 | 3,5 | — |
| СГ4С | 180 | 140 | 5 | 30 | 40 | 4 | — |
| СГ201С | 150 | 86 | 4 | 15 | 15 | 2 | Эталонный источник |
| СГ13П | 175 | 149 | 5 | 30 | 30 | 3,5 | — |
| СГ14П | 125 | 115 | 20 | 40 | 40 | — | Радиоактивен (0,2 мКюри) |
| СГ15П | 150 | 108 | 5 | 30 | 30 | 3 | — |
| СГ16П | 150 | 83 | 5 | 30 | 30 | 3 | — |
| СГ5Б | 180 | 149 | 5 | 10 | 10 | 4 | Сверхминиатюрное оформление (дробь) |
| СГ202Б | 135 | 8,3 | 1,5 | 5 | 5 | 4,5 | |

**Тиратроны с холодным катодом.** Тиратроны тлеющего разряда предназначены для работы в устройствах малой мощности, таких, как логические схемы, вычислительные устройства, релаксационные генераторы, бесконтактные реле, импульсные усилители.

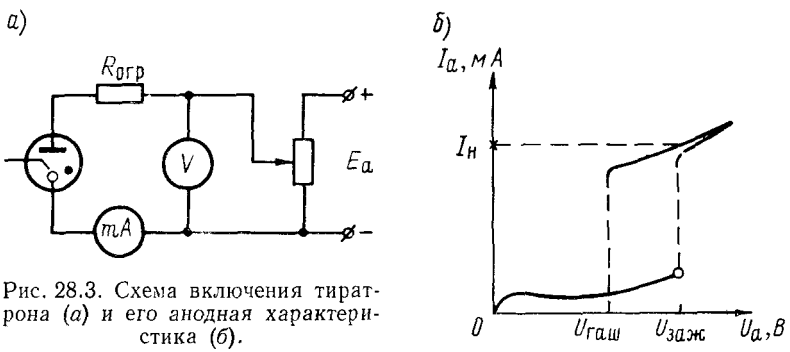



Рис. 28.3. Схема включения тиратрона (*а*) и его анодная характеристика (*б*).

В отличие от неоновых ламп тиратроны имеют одну или несколько сеток, при помощи которых можно управлять зажиганием тиратрона. На рис. 28.3, *а* приведена схема, при помощи которой можно снять вольт-амперную характеристику тиратрона на участке анод—катод при условии, что сетка отключена. Эта характеристика приведена на рис. 28.3, *б*. При увеличении анодного напряжения ток в лампе сначала увеличивается незначительно, так как имеет место несамостоятельный темновой разряд.

По достижении анодным напряжением значения $U_{заж}$ в лампе возникает тлеющий разряд. При этом ток увеличивается скачком до значения, определяемого величиной ограничивающего резистора $R_{огр}$. Дальнейшее повышение анодного напряжения нежелательно, так как ток, увеличиваясь, может достигнуть опасного значения. При уменьшении анодного напряжения ток уменьшается сначала плавно, а затем скачком почти до нуля. Таким образом, при напряжении $U_{гаш}$ тиратрон погаснет.

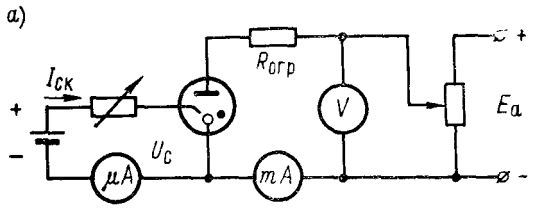



Рис. 28.4. Схема включения тиратрона (*а*) и его пусковая характеристика (*б*).

Анодное напряжение зажигания $U_{заж}$ можно уменьшить на несколько десятков вольт, если между сеткой и катодом тиратрона подключить напряжение $U_с$, которое возбудит подготовительный ток в цепи сетки $I_{ск}$. В результате сеточного разряда число электронов и ионов в лампе увеличится и разряд перейдет на главные электроды (анод, катод) при меньшем анодном напряжении. На рис. 28.4,*а* показана схема, при помощи которой можно получить пусковую характеристику тиратрона. Из рис. 28.4, *б* видно, что чем больше ток подготовки $I_{ск}$, тем меньше нужно анодное напряжение для зажигания тиратрона.

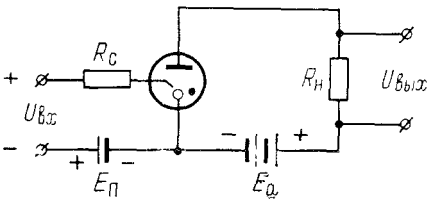



Рис. 28.5. Схема импульсного усилителя на тиратроне.

После загорания лампы сетка не влияет на ее работу. Нельзя, например, подавая отрицательное напряжение на сетку, уменьшить анодный ток или погасить лампу. Для гашения тиратрона необходимо или отключить анодное напряжение, или снизить его величину ниже напряжения гашения $U_{гаш}$.

На рис. 28.5 приведена схема импульсного усилителя на тиратроне с холодным катодом. В усилителе источники э. д. с. $E_а$ и $E_п$ включены постоянно. Величина этих э. д. с. недостаточна для зажигания тиратрона на участке анод—катод, но достаточна для поддержания разряда подготовки на участке сетка—катод. При подаче на вход постоянного напряжения $U_{вх}$ сеточный ток увеличивается, что приводит к возникновению разряда на участке анод—катод. Приращение сеточного тока от напряжения $U_{вх}$ в сотни раз меньше анодного тока, т. е. происходит усиление по току.

У газонаполненных тетродов с холодным катодом имеются две сетки. Первая сетка служит для создания разряда подготовки, а входной сигнал подается на вторую сетку. Работа многосеточных тиратронов более стабильна, чем односеточных приборов с холодным катодом.

Основные параметры тиратронов с холодным катодом следующие: *анодное напряжение зажигания* $U_{заж}$, *анодное напряжение после зажигания лампы* $U_{гор}$ — напряжение горения, *сеточное напряжение подготовки* $U_{ск}$, *ток зажигания в цепи сетки* $I_{пуск}$, *наибольший анодный ток* $I_а$, *импульсный анодный ток* $I_{а\,имп}$, *время деионизации газа* $t_{восст}$.

Числовые значения основных параметров тиратронов с холодным катодом приведены в табл. 28.3.

*Таблица 28.3*

**Основные параметры тиратронов с холодным катодом**

| Тип тиратрона | $U_{заж}$, В | $U_{гор}$, В | $U_{ск}$, В | $I_а$, мА | $I_{а\,имп}$, мА | $I_с$, мкА | $t_{восст}$, мкс | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| МТХ-90 | 85—200 | 50—65 | 65—90 | 7 | 35 | 2—10 | 200—800 | |
| ТХ1 | 90—225 | 70—80 | 75 | 10 | 30 | 5 | 500—1000 | Триоды |
| ТХ2 | 350—425 | 110—115 | — | 12 | 100 | — | 100—200 | |
| ТХ5Б | 175—275 | 130—150 | 150 | 0,25 | 1,5 | 12 | 00—150 | |
| ТХ3Б | 120—225 | 100—112 | 100 | 3,5 | 7 | 5—50 | 20—150 | |
| ТХ4Б | 125—250 | 110—125 | 100 | 3,5 | 7 | 10—50 | 10—100 | |
| ТХ11Г | 200—230 | 100—125 | 110 | 10 | 10 | 10—10 А | 40—160 | Тетроды |
| ТХ13Г | 150—250 | 120 | 110 | 0,5 | 5 | 5—50 | 5 | |
| ТХИ-2С | 180—300 | 140 | — | 38—48 | 200 А | — | — | |
| ТХ6Г | 270—300 | 120—150 | 115—130 | 1 | 2 | 50 | 100—150 | |
| ТХ7Г | 270—300 | 132—140 | 115—125 | 1 | 2 | 75 | 100—200 | |
| ТХ8Г | 270—300 | 130—140 | 140 | 1 | 2 | 100 | 100—200 | Пентоды |
| ТХ12Г | 160—275 | 130—150 | 160 | 10 | 100 | 10—50 | 200—350 | |
| ТХ16Б | 160—300 | 135—160 | — | 1 | 5 | 300—600 | 150—230 | |
| ТХИ-1Г | 205—275 | — | 20 | — | 25—60 А | 300 | — | |
| ТХ9Г | 270—300 | 130—140 | 140 | 1 | 2 | 100 | 100—200 | Гексод |

Лампы с холодным катодом успешно сочетаются с электронными и полупроводниковыми приборами и нередко конкурируют с ними. Такие лампы имеют следующие преимущества: небольшие масса, размеры и низкая стоимость; высокая экономичность ввиду отсутствия потребления энергии на нагрев катода; самосигнализация состояния (по интенсивности свечения можно определить, открыта лампа или нет, новая лампа или старая); возможность создания высоконадежных схем путем оптимального резервирования. При резервировании тиратроны включают параллельно, но работает из них только один. В случае выхода из строя основной лампы автоматически вступает в работу резервная лампа.

Применение ламп с холодным катодом иногда называют «третьим путем электроники».

## § 29. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

В соответствии с ГОСТ 10862—64 полупроводниковые диоды имеют четырехзначное обозначение.

Первый знак указывает материал, из которого выполнен диод: Г (или 1) — германий; К (или 2) — кремний; А (или 3) — арсенид галлия.

Второй знак (буква) обозначает группу, к которой относится прибор: Д — диоды выпрямительные, универсальные, импульсные; Ц — выпрямительные столбы и блоки; С — стабилитроны; Н — неуправляемые переключающие диоды;

У — управляемые переключающие диоды; Ф — фотоприборы; Л — светодиоды; И — импульсные диоды; В — варикапы; А — сверхвысокочастотные диоды.

Третий знак (грехзначная цифра) отражает электрические свойства диодов и их назначение (табл. 29.1).

*Таблица 29.1*

**Виды полупроводниковых диодов**

| Наименование диода | Третий знак обозначения | |
|---|---|---|
| | от | до |
| *Диоды низкой и высокой частоты:* | | |
| выпрямительные | 101 | 399 |
| универсальные | 401 | 499 |
| импульсные | 501 | 599 |
| варикапы | 101 | 999 |
| Выпрямительные столбы: | | |
| малой мощности | 101 | 199 |
| средней мощности | 201 | 299 |
| Выпрямительные блоки: | | |
| малой мощности | 301 | 399 |
| средней мощности | 401 | 499 |
| большой мощности | 501 | 599 |
| Стабилитроны малой мощности ($P \approx 0{,}3$ Вт) с напряжением стабилизации, В: | | |
| 0,1—9,9 | 101 | 199 |
| 10—99 | 210 | 299 |
| 100—199 | 300 | 399 |
| Стабилитроны средней мощности ($0{,}3 < P < 5$ Вт) с напряжением стабилизации, В: | | |
| 0,1—9,9 | 401 | 499 |
| 10—99 | 510 | 599 |
| 100—199 | 600 | 699 |
| Стабилитроны большой мощности ($P > 5$ Вт) с напряжением стабилизации, В: | | |
| 0,1—9,9 | 701 | 799 |
| 10—99 | 810 | 899 |
| 100—199 | 900 | 999 |
| Динисторы и тиристоры: | | |
| малой мощности | 101 | 199 |
| средней мощности | 201 | 299 |
| большой мощности | 301 | 399 |
| Фотодиоды | 101 | 199 |
| Светодиоды | 101 | 199 |
| Туннельные диоды | 101 | 499 |
| Сверхвысокочастотные диоды | 101 | 699 |

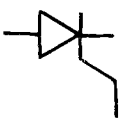
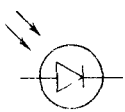
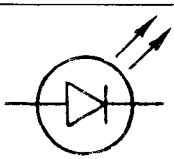
Четвертый знак (буква) указывает разновидность приборов данной группы. Например, выпрямительные диоды данной группы отличаются по наибольшей амплитуде обратного напряжения, стабилитроны — по напряжению стабилизации, тиристоры — по прямому напряжению включения, светодиоды — по яркости свечения.

Пример расшифровки марки диодов КД203А и КД203В: кремниевые диоды выпрямительные, имеющие одинаковое значение прямого тока (10 А по справочнику) и различные значения постоянного обратного напряжения (для подгруппы А — 600 В, для подгруппы В — 8000 В).

Условные графические обозначения полупроводниковых диодов, установленные ГОСТ 2.730—73, приведены в табл. 29.2.

*Таблица 29.2*

**Условные графические обозначения диодов**

| Обозначение | Наименование |
|---|---|
| | Диод полупроводниковый, выпрямительный столб |
| | *Стабилитроны* |
| | Динисторы |
|  | Тринисторы |
|  | Фотодиоды |
|  | Светодиоды |
| | Туннельные диоды |
| | Варикапы |

По сравнению с другими элементами, выполняющими те же функции, полупроводниковые диоды имеют следующие преимущества: небольшие размеры, масса и низкая стоимость, малое потребление электроэнергии, безынерционность высокая механическая прочность, значительный срок службы. Заводы изготовители гарантируют соответствие полупроводниковых приборов требованиям технических условий в течение 10 000 ч работы при соблюдении режимов и условий эксплуатации. Характеристики условий эксплуатации полупроводников, установленные ГОСТ 11630—70, приведены в табл. 29.3.

К основным недостаткам полупроводниковых приборов следует отнести разброс параметров внутри одного и того же типа приборов, сильную зависимость параметров от температуры, значительную чувствительность к перегрузкам.

**Выпрямительные диоды.** Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока в выпрямленный. Основой диода является кристалл

*Таблица 29.3*

**Характеристики условий эксплуатации полупроводниковых приборов**

| Полупроводниковый прибор | Окружающая атмосфера | | | Механические нагрузки | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Вибрации | | | |
| | Температура, °С | Относительная влажность, % | Давление, Па | Ускорение, м/с² | Диапазон частот, Гц | Ударные многократные нагрузки с ускорением $g$ | Линейные нагрузки с ускорением $g$ |
| Германиевый | —55, +70<br>—40, +55 | 98 при 40° С | $2{,}7 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^5$ | 98,1 | 10—600 | 735 | 245 |
| Кремниевый и арсенид-галлиевый | —55, +125<br>—40, +85<br>—25, —55 | | | | | | |

*полупроводника, состоящий из двух областей: электронной (область n-типа) и дырочной (область p-типа). Граница соединения областей называется электронно-дырочным переходом, или запорным слоем. Если к области p подключить положительный полюс, а к области n — отрицательный потенциал внешнего источника, то дырки и электроны устремляются в запорный слой, где происходит их рекомбинация. Уменьшение числа электронов области n от рекомбинации возмещается поступлением новых электронов из внешнего источника. Уменьшение дырок возмещается перемещением электронов области p полупроводника в источник. В результате в цепи источник—диод—нагрузка—диод будет протекать ток.*

*Если поменять полярность источника питания, то электроны области n диода направятся к положительному полюсу источника, минуя запорный слой. Ширина запорного слоя увеличивается, сопротивление диода сильно возрастает, так как зона p-n перехода обеднена основными носителями тока. Таким образом, диоды являются приборами односторонней проводимости: они хорошо пропускают ток в одном направлении и практически не пропускают его в другом. Графическая зависимость тока, проходящего через диод, от приложенного напряжения называется вольт-амперной характеристикой (ВАХ). На рис. 29.1, а приведены ВАХ диода, включенного в пропускном (прямом) направлении, и электрическая схема цепи, при помощи которой можно снять эту характеристику. На рис. 29.1, б представлены схема и ВАХ диода, включенного в обратном (непропускном) направлении. Штриховыми линиями показаны характеристики диода при температуре $t_1$, большей номинальной, и температуре $t_2$, меньшей номинальной. Из графиков видно, что при повышении температуры прямой и обратный токи увеличиваются. Известно, что при возрастании температуры на каждые 10° С обратный ток кремниевого диода увеличивается в 2,5 раза, а германиевого диода — в 2 раза.*

*Величина обратного тока незначительна и не зависит от сравнительно большого обратного напряжения. Величина прямого тока сильно зависит от сравнительно небольшого прямого напряжения. При помощи графика можно показать, что обратное сопротивление диода велико, а прямое незначительно. Причем на прямолинейном участке прямое сопротивление меньше, чем на криволинейном.*

*Ввиду значительного разброса параметров полупроводников ВАХ диодов являются усредненными. Поэтому точность расчетов по графикам не превышает 20%.*

Основные параметры выпрямительных диодов следующие.

1. *Максимальное значение прямого тока* $I_{пр}$ — наибольшее значение постоянного тока, который можно пропускать через диод в прямом направлении. Если фактический прямой ток будет больше максимального прямого тока $I_{пр}$, то диод выходит из строя.

2. *Максимальное обратное напряжение* $U_{обр}$ — наибольшее постоянное обратное напряжение, на которое рассчитан диод. Фактическое обратное напряжение должно быть меньше, чем напряжение $U_{обр}$.

Для увеличения надежности работы диодов можно рекомендовать брать фактический прямой ток и обратное напряжение на 30—50% меньше указанных в справочнике значений $I_{пр}$ и $U_{обр}$.

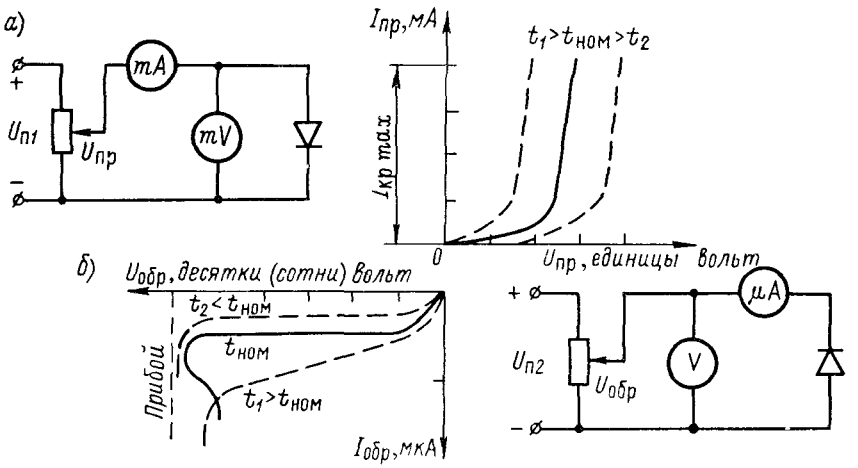



Рис. 29.1. Схемы включения выпрямительного диода и его характеристики.

3. *Прямое напряжение* $U_{пр}$ — падение напряжения на диоде, когда по нему проходит наибольший прямой ток. Для получения высокого к. п. д. выпрямителя необходимо выбирать диоды с минимальным значением прямого напряжения.

4. *Обратный ток диода* $I_{обр}$ — ток, который проходит через диод, находящийся под обратным напряжением. Чем меньше значение этого тока, тем лучше диод.

Числовые значения основных параметров выпрямительных диодов приведены в *табл.* 29.4.

**Стабилитроны (опорные диоды).** Опорные диоды предназначены для стабилизации постоянного напряжения на сопротивлении нагрузки.

На рис. 29.2, *а* показана схема включения стабилитрона, который включен в обратном направлении по отношению к полярности входного напряжения. При увеличении входного напряжения $U_{вх}$ потенциометром $R$ напряжение на сопротивлении нагрузки $R_н$ увеличивается до тех пор, пока не откроется стабилитрон $D$. Когда входное значение достигает определенной величины ($U_{вх} = U_{проб}$), стабилитрон пробивается и по нему протекает обратный ток $I_{ст}$. Если продолжать увеличивать входное напряжение, то напряжение на диоде и на сопротивлении $R_н$ почти не меняется. Это объясняется тем, что с ростом $U_{вх}$ обратное сопротивление диода уменьшается, а ток увеличивается. Увеличивать входное напряжение можно до тех пор, пока ток стабилитрона не достигнет максимального значения $I_{ст\ max}$, которое указывается в паспорте диода.

Стабилитрон при пробое не выходит из строя (как это происходит с выпрямительными диодами) благодаря массивному теплоотводу от электродов. Кроме того, мощность, рассеиваемая опорным диодом при пробое, незначительна, так

## Основные параметры диодов

| Тип диода | $I_{пр}$, А | $U_{обр}$, В | $I_{обр}$, мкА | $U_{пр}$, В | Тип диода | $I_{пр}$, А | $U_{обр}$, В | $I_{обр}$, мкА | $U_{пр}$, В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| КД102А | 0,1 | 250 | 0,1 | 1,0 | Д7А | 0,3 | 50 | 100 | 0,5 |
| КД102Б | 0,1 | 300 | 3,0 | 1,0 | Д7Б | 0,3 | 100 | 100 | 0,5 |
| КД103А | 0,1 | 50 | 1,0 | 1,0 | Д7В | 0,3 | 150 | 100 | 0,5 |
| КД103Б | 0,1 | 50 | 1,0 | 1,2 | Д7Г | 0,3 | 200 | 100 | 0,5 |
| КД202А | 3 | 50 | 1 | 1 | Д7Д | 0,3 | 300 | 100 | 0,5 |
| КД202Б | 1 | 50 | 1 | 1 | Д7Е | 0,3 | 350 | 100 | 0,5 |
| КД202В | 3 | 100 | 1 | 1 | Д7Ж | 0,3 | 400 | 100 | 0,5 |
| КД202Г | 1 | 100 | 1 | 1 | Д202 | 0,4 | 100 | 500 | 1 |
| КД202Д | 3 | 200 | 1 | 1 | Д203 | 0,4 | 200 | 500 | 1 |
| КД202Е | 1 | 200 | 1 | 1 | Д204 | 0,4 | 300 | 500 | 1 |
| КД202Ж | 3 | 300 | 1 | 1 | Д205 | 0,4 | 400 | 500 | 1 |
| КД202И | 1 | 300 | 1 | 1 | Д206 | 0,1 | 100 | 100 | 1 |
| КД202К | 3 | 400 | 1 | 1 | Д207 | 0,1 | 200 | 100 | 1 |
| КД202Л | 1 | 400 | 1 | 1 | Д208 | 0,1 | 300 | 100 | 1 |
| КД202М | 3 | 500 | 1 | 1 | Д209 | 0,1 | 400 | 100 | 1 |
| КД202Н | 1 | 500 | 1 | 1 | Д210 | 0,1 | 500 | 100 | 1 |
| КД202Р | 3 | 600 | 1 | 1 | Д211 | 0,1 | 600 | 100 | 1 |
| КД202С | 1 | 600 | 1 | 1 | Д217 | 0,1 | 800 | 50 | 1 |
| КД203А | 10 | 600 | — | — | Д218 | 0,1 | 1000 | 50 | 1 |
| КД203Б | 10 | 800 | — | — | Д226Б | 0,3 | 400 | 100 | 1 |
| КД203В | 10 | 800 | — | — | Д226В | 0,3 | 300 | 100 | 1 |
| КД203Г | 10 | 1000 | — | — | Д226Г | 0,3 | 200 | 100 | 1 |
| КД203Д | 10 | 1000 | — | — | Д226Д | 0,3 | 100 | 100 | 1 |
| КД104А | 0,01 | 300 | 100 | 1 | Д242 | 10 | 100 | 300 | 1,2 |
| КД105А | 0,3 | 200 | 300 | 1 | Д242А | 10 | 100 | 300 | 1 |
| КД105Б | 0,3 | 400 | 300 | 1 | Д242Б | 5 | 100 | 300 | 1,5 |
| КД105В | 0,3 | 600 | 300 | 1 | Д243 | 10 | 200 | 300 | 1,2 |
| КД105Г | 0,3 | 800 | 300 | 1 | Д243А | 10 | 200 | 300 | 1 |
| КД205А | 0,5 | 500 | 200 | 1 | Д243Б | 5 | 200 | 300 | 1,5 |
| КД205Б | 0,5 | 400 | 200 | 1 | Д245 | 10 | 300 | 300 | 1,2 |
| КД205В | 0,5 | 300 | 200 | 1 | Д245А | 10 | 300 | 300 | 1 |
| КД205Г | 0,5 | 200 | 200 | 1 | Д245Б | 5 | 300 | 300 | 1,5 |
| КД205Д | 0,5 | 100 | 200 | 1 | Д246 | 10 | 400 | 300 | 1,2 |
| КЦ401А | 0,4 | 500 | 100 | 2,5 | Д246А | 10 | 400 | 300 | 1 |
| КЦ401Б | 0,4 | 500 | 100 | 2,5 | Д246Б | 5 | 400 | 300 | 1,5 |
| КЦ401В | 0,4 | 400 | 100 | 2,5 | Д247 | 10 | 500 | 300 | 1,2 |
| КЦ402А | 1,0 | 600 | — | — | Д247Б | 5 | 500 | 300 | 1,5 |
| КЦ403А | 1,0 | 600 | — | — | Д248Б | 5 | 600 | 300 | 1,5 |
| КЦ404А | 1,0 | 600 | — | — | Д302 | 1 | 200 | 800 | 0,3 |
| КЦ405А | 1,0 | 600 | — | — | Д302А | 1 | 200 | 1200 | 0,3 |
| КЦ402И | 0,6 | 500 | — | — | Д303 | 3 | 150 | 1200 | 0,35 |
| КЦ403И | 0,6 | 500 | — | — | Д303А | 3 | 150 | 1000 | 0,35 |
| КЦ404И | 0,6 | 500 | — | — | Д304 | 5 | 100 | 2000 | 0,3 |
| КЦ405И | 0,6 | 500 | — | — | Д305 | 10 | 50 | 2500 | 0,35 |

как напряжение пробоя сравнительно небольшое. Ток стабилитрона необходимо ограничивать резистором $R_{огр}$, величину которого определяют по формуле

$$R_{огр} = \frac{U_{вх} - U_{ст}}{I_н + I_{ст}}.$$

Основные параметры стабилитрона следующие:

1) *напряжение стабилизации* $U_{ст}$ — обратное напряжение, при котором происходит пробой опорного диода;

2) *минимальный ток стабилизации* $I_{ст\ min}$ — наименьшее значение обратного тока диода, при котором возникает устойчивый пробой;

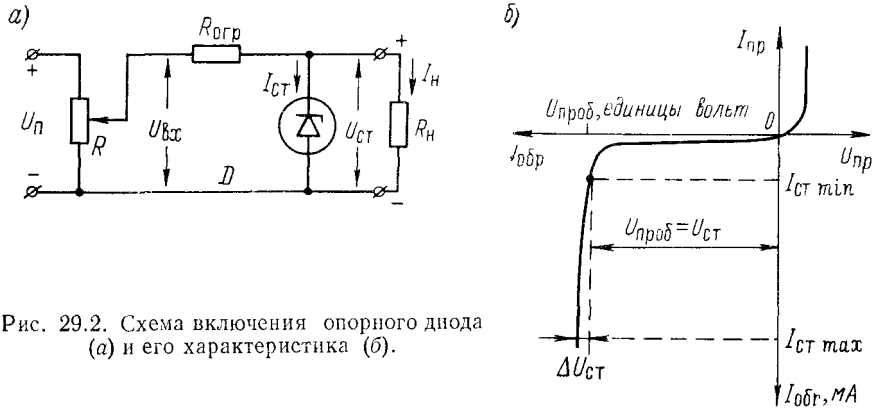



Рис. 29.2. Схема включения опорного диода (*а*) и его характеристика (*б*).

3) *максимальный ток стабилизации* $I_{ст\ max}$ — наибольшее допустимое значение обратного тока; фактический обратный ток стабилитрона должен быть меньше $I_{ст\ max}$, иначе диод выходит из строя;

4) *температурный коэффициент напряжения* (ТКН), определяющий изменение напряжения стабилизации при изменении температуры окружающей среды,

$$ТКН = \frac{\Delta U_{ст}}{U_{ст}} : \Delta T;$$

5) *динамическое сопротивление диода* $R_д$, определяющее изменение напряжения стабилизации при изменении тока диода,

$$R_д = \frac{\Delta U_{ст}}{\Delta I_{ст}}.$$

На рис. 29.2, *б* приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ) стабилитрона, отличающаяся от ВАХ выпрямительного диода сравнительно большим обратным током и небольшим обратным напряжением. Для большинства стабилитронов рабочей является обратная ветвь ВАХ. Однако в некоторых случаях для стабилизации используется прямая ветвь. Такие стабилитроны называются стабисторами, напряжение стабилизации у них составляет несколько долей вольта.

Кроме стабилизации напряжения опорные диоды применяются для формирования импульсов, для защиты электроэлементов от паразитных импульсов, в бесконтактных выключателях и для других целей.

Числовые значения основных параметров стабилитронов приведены в табл. 29.5.

**Тиристоры.** Тиристорами называются четырехслойные полупроводниковые диоды с *p-n-p-n* структурой. Тиристоры можно разбить на два вида: диристоры, имеющие два электрода, и тринисторы, имеющие три вывода.

*Таблица 29.5*

**Параметры стабилитронов**

| Тип диода | $U_{ст}$, В | $I_{ст\ min}$ — $I_{ст\ max}$, мА | ТКН, %/°С | $R_д$, Ом | Тип диода | $U_{ст}$, В | $I_{ст\ min}$ — $I_{ст\ max}$, мА | ТКН, %/°С | $R_д$, Ом |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| КС133А | 3,3 | 3—81 | — | 65 | КС191А | 9,1 | 3—15 | 0,06 | 18 |
| КС139А | 3,9 | 3—70 | — | 60 | КС196А | 9,6 | 11—20 | 0,005 | 18 |
| КС147А | 4,6 | 3—58 | — | 56 | КС210Б | 10 | 3—14 | 0,07 | 22 |
| КС156А | 5,6 | 3—55 | 0,05 | 46 | КС211Б | 11 | 5—33 | 0,02 | 15 |
| КС162А | 6,2 | 3—22 | 0,06 | 33 | КС213Б | 13 | 3—10 | 0,08 | 25 |
| КС168А | 6,8 | 3—45 | 0,06 | 28 | КС620А | 120 | 16—42 | 0,2 | 150 |
| КС168В | 6,8 | 3—20 | 0,05 | 28 | КС630А | 130 | 15—38 | 0,2 | 180 |
| КС170А | 7,0 | 3—20 | 0,01 | 20 | КС650А | 150 | 13—33 | 0,2 | 255 |
| КС175А | 7,5 | 3—18 | 0,04 | 16 | КС680А | 180 | 11—28 | 0,2 | 330 |
| КС182А | 8,2 | 3—17 | 0,05 | 14 | Д815Д | 12 | 25—650 | 0,11 | 3,0 |
| Д808 | 8 | 3—33 | 0,07 | 6 | Д815Е | 15 | 25—550 | 0,13 | 3,8 |
| Д809 | 9 | 3—29 | 0,08 | 10 | Д815Ж | 18 | 25—450 | 0,14 | 4,5 |
| Д810 | 10 | 3—26 | 0,09 | 12 | Д816А | 22 | 10—230 | 0,15 | 10 |
| Д811 | 11 | 3—23 | 0,095 | 15 | Д816Б | 27 | 10—180 | 0,15 | 12 |
| Д813 | 13 | 3—20 | 0,095 | 18 | Д816В | 33 | 10—150 | 0,15 | 15 |
| Д815И | 4,7 | 50—1400 | 0,056 | 0,9 | Д816Г | 39 | 10—130 | 0,15 | 18 |
| Д815А | 5,6 | 50—1400 | 0,056 | 0,9 | Д816Д | 47 | 10—110 | 0,15 | 22 |
| Д815Б | 6,8 | 50—1150 | 0,062 | 1,2 | Д817А | 56 | 5—90 | 0,18 | 52 |
| Д815В | 8,2 | 50—950 | 0,088 | 1,5 | Д817Б | 68 | 5—75 | 0,18 | 60 |
| Д815Г | 10 | 25—800 | 0,100 | 2,7 | Д817В | 82 | 5—60 | 0,18 | 65 |
| | | | | | Д817Г | 100 | 5—50 | 0,18 | 75 |

Динистор (переключающий неуправляемый диод) пропускает ток в прямом направлении в случае, если прямое напряжение достигнет сравнительно большой величины, называемой напряжением включения $U_{вкл}$. На рис. 29.3, *а* приведена схема включения динистора. При плавном увеличении входного напряжения $U_{вх}$ потенциометром $R$ (до значения $U_{вкл}$) вольтметры $V_1$ и $V_2$ дают почти одинаковые показания. Динистор закрыт, поэтому показания амперметра *mA* отсутствуют Когда $U_{вх}$ станет равным $U_{вкл}$, динистор откроется и в цепи потечет ток. Значение тока определяется значениями входного напряжения и сопротивления резистора $R_н$. Сопротивление открытого диода незначительно, поэтому показания вольтметра $V_2$ будут близки к нулю. Если после открытия динистора начать уменьшать прямой ток (например, путем увеличения сопротивления резистора $R_н$), то диод закроется при токе, меньшем тока выключения $I_{выкл}$ (точка *2* на рис. 29.3, *б*).

На рис. 29.3, *б* приведена рабочая (прямая) ветвь ВАХ динистора. В области отрезка *0—1* по диоду проходит небольшой ток утечки $I_{ут}$. В точке *1* происходит включение динистора. При этом напряжение на динисторе уменьшается от значения $U_{вкл}$ до $U_{ост}$, а ток возрастает от значения $I_{вкл}$ до номинального, определяемого сопротивлением $R_н$ и входным напряжением. Сопротивление нагрузки $R_н$ должно иметь достаточную величину, чтобы фактический прямой ток динистора был меньше прямого максимального тока $I_{пр\ max}$ (точка *3*). В импульсе ток тиристоров значительно больше $I_{пр\ max}$. Например, для диодов КН102 амплитуда импульса при его длительности $\tau_п = 10$ мс равна 2А, а при $\tau_п = 10$ мкс она равна 10 А. Из характеристики видно, что динистор является почти идеальным бесконтактным выключателем, поэтому он применяется в качестве коммутационного элемента в схемах судовой автоматики.

Если допускается работа тиристора на обратной ветви ВАХ, то нужно знать значения обратного напряжения $U_{обр}$ и обратного тока $I_{обр}$.

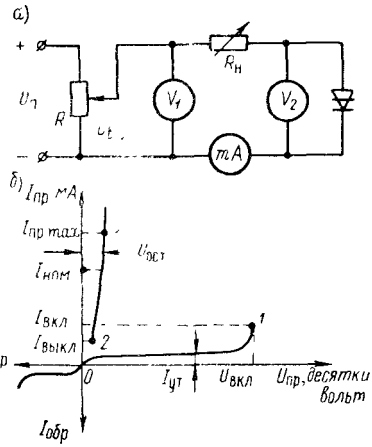



Рис. 29.3. Схема включения динистора (*а*) и его характеристика (*б*).

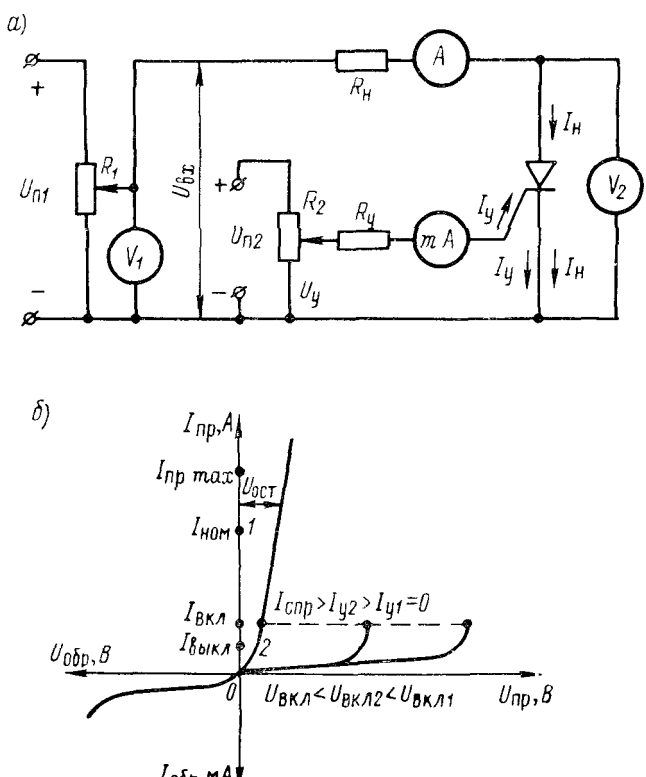



Рис. 29.4. Схема включения тринистора (*а*) и его характеристики (*б*).

*Таблица 29.6*

**Параметры динисторов**

| Тип | $U_{вкл}$, В | $U_{ост}$, В | $U_{обр}$, В | $I_{ут}$, мкА | $I_{выкл}$, мА | $I_{пр\,м}$, мА |
|---|---|---|---|---|---|---|
| КН102А | 20 | 1,5 | 10 | 2,5 | 0,1 | 200 |
| КН102Б | 28 | 1,5 | 10 | 2,5 | 0,1 | 200 |
| КН102В | 40 | 1,5 | 10 | 2,5 | 0,1 | 200 |
| КН102Г | 56 | 1,5 | 10 | 2,5 | 0,1 | 200 |
| КН102Д | 80 | 1,5 | 10 | 2,5 | 0,1 | 200 |
| КН102Ж | 120 | 1,5 | 10 | 2,5 | 0,1 | 200 |
| КН102И | 150 | 1,5 | 10 | 2,5 | 0,1 | 200 |

Основные параметры динисторов приведены в табл. 29.6.

Тринистор (управляемый диод) имеет управляющий электрод, с помощью которого можно изменять напряжение включения. На рис. 29.4, *а* приведена схема включения тринистора, из которой видно, что на управляющий электрод подают положительный потенциал напряжения управления $U_у$. Чем больше ток в цепи управления, тем при меньшем прямом напряжении $U_{вх}$ открывается тринистор. Это показано на ВАХ тринистора, приведенной на рис. 29.4, *б*. Ввиду того что ток управления $I_у$ в сотни раз меньше прямого тока $I_{пом}$ (точка *1*), получается значительный коэффициент усиления по току. Одним из параметров тринистора является ток спрямления $I_{спр}$ — ток в цепи управления, при котором спрямляется прямая ветвь управляемого диода, т. е. его ВАХ становится аналогичной характеристике выпрямительного диода. Ток спрямления всегда меньше наибольшего прямого тока управляющего электрода $I_у$.

Для закрытия тринистора необходимо или отключить прямое напряжение или уменьшить прямой ток до значения тока выключения $I_{выкл}$ при отсутствии тока в цепи управления. Отключать или изменять величину главного тока тринистора при помощи управляющего электрода нельзя.

*Мощность рассеивания тринистора незначительна, поэтому устройства,* выполненные на тринисторах, имеют высокий к. п. д.

На морских судах тиристоры применяются в схемах автоматики, измерительных приборах, регулируемых выпрямителях, преобразователях частоты и постоянного тока.

Числовые значения основных параметров тиристоров приведены в табл. 29.7 и 29.8.

*Таблица 29.7*

**Параметры тиристоров**

| Тип | $U_{ост}$, В | $I_{пр}$, А | $I_{ут}$, мА | $I_{упр}$, мА | $I_{спр}$, мА |
|---|---|---|---|---|---|
| КУ101 | — | 0,07 | 0,3 | 15 | 7,5 |
| КУ103 | 6,0 | — | 0,3 | 40 | 0,1—100 |
| КУ201 | 2,0 | 2,0 | 5,0 | 200 | 100 |
| КУ202 | 2,0 | 10,0 | 10,0 | 300 | — |
| КУ204 | 3,2 | 1,0 | 5,0 | 5,0 | — |
| КУ208 | 2,0 | 5,0 | 5,0 | 500 | — |

**Фотодиоды.** Значение обратного тока фотодиода зависит от освещенности его *p-n* перехода. На рис. 29.5 показаны схема включения фотодиода и его вольтамперные характеристики. Из ВАХ видно, что чем больше световой поток $Ф$, падающий на диод, тем больше обратный ток диода. Это объясняется тем, что

обратное сопротивление диода при освещении уменьшается. Из графика видно также, что фототок не зависит от обратного напряжения.

Основные параметры фотодиода следующие:

1) *обратное рабочее напряжение на диоде* $U_{раб}$;

2) *темновой ток* $I_{тем}$, который проходит по диоду при отсутствии освещенности;

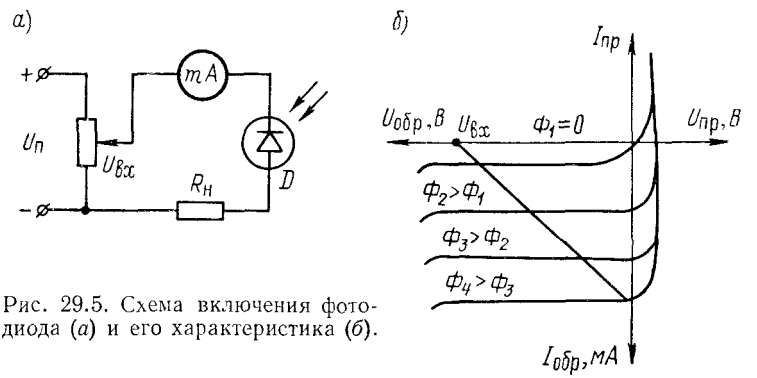



Рис. 29.5. Схема включения фотодиода (*а*) и его характеристика (*б*).

3) *световой ток* $I_{св}$ — наибольший обратный ток при освещении фотодиода;

4) *интегральная чувствительность* $S_и$ — отношение изменения фототока к изменению светового потока, направленного на фотодиод от источника белого света.

*Таблица 29.8*

**Параметры тринисторов**

| Тип | | Индекс диода | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | А | Б | В | Г | Д | Е | Ж | И | К | Л | М | Н |
| КУ101 | $U_{пр}$, В | 50 | 50 | 80 | 50 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| | $U_{обр}$, В | 10 | 50 | 80 | 150 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| КУ103 | $U_{пр}$, В | 150 | 150 | — | 250 | — | 250 | — | - | — | — | — | — |
| | $U_{обр}$, В | 150 | 150 | — | 250 | — | 250 | — | — | — | — | — | — |
| КУ201 | $U_{пр}$, В | 25 | 25 | 50 | 50 | 100 | 100 | 200 | 200 | 300 | 300 | — | — |
| | $U_{обр}$, В | — | 25 | — | 50 | — | 100 | — | 200 | — | 300 | — | — |
| КУ202 | $U_{пр}$, В | 25 | 25 | 50 | 50 | 100 | 100 | 200 | 200 | 300 | 300 | 400 | 400 |
| | $U_{обр}$, В | 0 | 25 | 0 | 50 | 0 | 100 | 0 | 200 | 0 | 300 | 0 | 400 |
| КУ204 | $U_{пр}$, В | 50 | 100 | 200 | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| КУ208 | $U_{пр}$, В | 100 | 200 | 300 | 400 | — | — | -- | — | — | — | — | — |

Фотодиоды обладают наибольшей интегральной чувствительностью по сравнению с другими фотодатчиками.

Числовые значения основных параметров фотодиодов приведены в табл. 29.9.

Фотодиоды обладают свойством работать и без внешнего источника напряжения. В этом случае при освещении диода на его зажимах появляется э. д. с. При освещенности в 7000 лк и сопротивлении нагрузки 1 кОм собственная э. д. с. фотодиода составляет около 0,1 В.

**Светодиоды.** Светодиод создает оптическое излучение при прохождении по нему тока в прямом направлении. На рис. 29.6 приведены схема включения

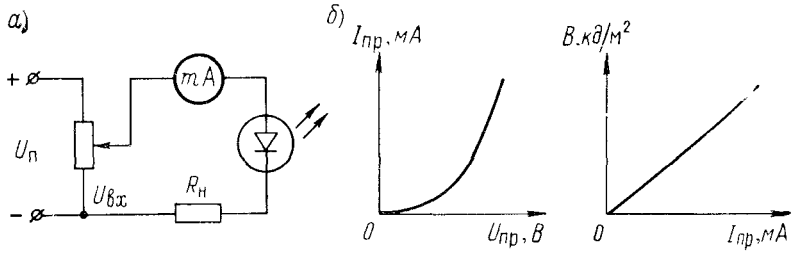



Рис. 29.6. Схема включения светодиода (*а*) и его характеристики (*б*).

светодиода, прямая ВАХ и световая характеристика. Из характеристик следует, что чем больше прямое напряжение, приложенное к диоду, тем больше ток и яркость излучения. Светодиоды выполняются из полупроводника, основой которого являются карбид кремния, арсенид галлия, фосфид галлия. В зависимости от материала светодиоды создают излучение в различных областях спектра (инфракрасной, видимой, ультрафиолетовой).

*Таблица 29.9*

**Основные параметры фотодиодов**

| Параметр | Тип диода | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ФД1 | ФД2 | ФД3 | ФДК |
| Рабочее напряжение, В | 15 | 30 | 10 | 20 |
| Темновой ток, мкА | 30 | 25 | 15 | 3 |
| Световой ток, мкА | 800 | — | 250 | — |
| Мощность диода, мВт | 15 | 15 | — | — |
| Чувствительность, мА/лм | 20 | 20 | 20 | 3 |
| Площадь чувствительного слоя, мм² | 5 | 1 | 1 | 2 |
| Масса, г | 0,9 | 1,0 | 0,3 | — |

Основными параметрами светодиодов являются яркость свечения при наибольшем прямом токе, наибольший прямой ток и прямое напряжение, при котором происходит преобразование электрической энергии в световой поток. Числовые значения основных параметров светодиодов приведены в табл. 29.10.

Положительные свойства светодиодов (небольшие размеры, высокая экономичность и надежность) определили их применение в следующих областях:

1) *для световой индикации состояния транзисторов в триггерах и других* схемах;

*Таблица 29.10*

**Основные параметры светодиодов**

| Тип диода | Цвет свечения | Прямой ток, мА | Прямое напряжение, В | Яркость, кд/м² |
|---|---|---|---|---|
| АЛ102А | Красный | 5 | 3,2 | 5 |
| АЛ102Б | » | 20 | 4,5 | 40 |
| АЛ102В | Зеленый | 30 | 5,0 | 50 |
| АЛ102Г | Красный | 20 | 4,5 | 10 |
| АЛ106А, В, Г | Инфракрасный | 100 | 1,7 | 0,2—0,6 |
| КЛ101А | Желтый | 10 | 5,5 | 10 |
| КЛ101Б | » | 20 | 5,5 | 15 |
| КЛ101В | » | 40 | 5,5 | 20 |
| КЛ104А | » | 15 | 6,0 | 15 |

2) в качестве цифровых индикаторов числа импульсов;

3) в качестве источников света в оптоэлектронных парах с фотодиодами, *фототриодами*, *фоторезисторами* и *фототиристорами*;

4) в индикаторах переменной яркости свечения;

5) в качестве элементов гальванической развязки и согласования схем автоматики.

Существенным недостатком светодиодов является большой разброс параметров от диода к диоду и значительная зависимость их работы от изменения температуры.

## § 30. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРИОДЫ

*Полупроводниковые триоды* (*транзисторы*) предназначены для работы в схемах различных генераторов, усилителей, бесконтактных коммутаторах и для других целей.

Транзисторы, разработанные после 1964 г., условно обозначаются по ГОСТ 10862—64. Первый знак обозначает материал транзистора и верхний предел допустимой температуры корпуса прибора Г — +60° С, 1 — +70° С; К — +85° С, 2 — +120° С.

Второй знак показывает класс транзистора: Т — транзистор биполярный с проводимостью *p-n-p* или *n-p-n*; транзистор называется биполярным, если в нем используются оба вида носителей тока, дырки и электроны; П — полевой транзистор с каналом *p* или *n*; этот транзистор называют также униполярным, так как в нем используется только один вид основных носителей заряда, дырки или электроны.

Третий знак (цифра) характеризует транзистор по мощности и частоте в соответствии с табл. 30.1.

Четвертый знак указывает на разновидность приборов данной группы, так как транзисторы могут отличаться по коэффициенту усиления $\beta$ и напряжению между эмиттером и коллектором $U_{эк}$.

Например, условное обозначение транзисторов ГТ402А и ГТ402Г расшифровывается так: *германиевые биполярные транзисторы средней мощности и низкой частоты*, предназначенные для работы при температуре не выше +60° С. Причем у транзистора ГТ402А $\beta$ = 30—80, $U_{эк}$ = 25 В, а у транзистора ГТ402Г $\beta$ = = 60—150 и $U_{эк}$ = 40 В.

Полупроводниковые приборы, разработанные до 1964 г., еще выпускаются промышленностью и широко применяются в разработках. Условное обозначение этих приборов не соответствует ГОСТ 10862—64.

*Таблица 30.1*

**Виды транзисторов по ГОСТ 10862—64**

| Частота | Мощность | | |
|---|---|---|---|
| | малая $P_к < 0{,}3$ Вт | средняя $P_к = 0{,}3 - 3{,}0$ Вт | большая $P_к > 3$ Вт |
| Низкая | 101—199 | 401—499 | 701—799 |
| Средняя | 201—299 | 501—599 | 801—899 |
| Высокая | 301—399 | 601—699 | 901—999 |

**Биполярные транзисторы.** Основой транзистора является пластина из германия или кремния, три слоя которой имеют различную проводимость (*p-n-p* или *n-p-n*) и называются эмиттером, базой и коллектором. Так как транзистор имеет три вывода, то при включении его в электрическую цепь один из выводов является общим для входной и выходной цепей. Характеристики транзистора существенно зависят от того, какой из электродов является общим. На рис. 30.1

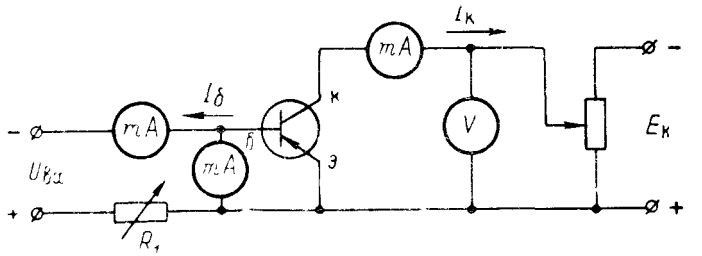



Рис. 30.1. Схема включения транзистора *p-n-p* с общим эмиттером.

приведена схема включения транзистора с общим эмиттером, применяющаяся наиболее часто ввиду большого коэффициента усиления по току и сравнительно большого входного сопротивления. Из схемы видно, что отрицательный потенциал входного напряжения подведен к базе (*б*), поэтому по цепи $+U_{вх}$, $R_1$, эмиттер (*э*), база, $-U_{вх}$ течет ток базы, который способствует протеканию тока коллектора $I_к$ в цепи $+E_к$, эмиттер, база, коллектор, $-E_к$. Это объясняется тем, что при отрицательном напряжении на базе потенциальный барьер перехода эмиттер — база снижается, в связи с чем концентрация дырок в базе у эмиттерного вывода увеличивается. В результате диффузии дырки базы подходят к коллектору (*к*). Поскольку потенциал коллектора для дырок базы является ускоряющим, дырки втягиваются в область коллектора, создавая коллекторный ток. Ток коллектора в $\beta$ раз больше тока базы ($\beta$ — коэффициент усиления по току). Если отрицательный потенциал на базе уменьшать, то ток коллектора транзистора уменьшается. При положительном потенциале на базе транзистор закрыт ($I_к = 0$).

На рис. 30.2 приведены характеристики транзистора, которые можно получить при помощи цепи, собранной по рис. 30.1. Входная характеристика (рис. 30.2, *а*), показывающая зависимость тока базы $I_б$ от прямого напряжения на базе $U_{бэ}$, аналогична характеристике диода. Выходная характеристика отражает зависимость тока коллектора $I_к$ от напряжения между эмиттером и коллектором $U_{эк}$ при определенном токе базы. Семейство этих характеристик показано на рис. 30.2, *б*. Из рисунка видно, что ток коллектора мало зависит от напряжения $U_{эк}$, но сильно зависит от тока базы. Чем больше ток базы, тем больше ток коллектора. Это видно и из проходной характеристики (рис. 30.2, *в*):

$$I_к = f(I_б).$$

К основным эксплуатационным параметрам транзисторов низкой частоты относятся следующие.

1. *Коэффициент усиления по току*

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} = \frac{I_{к1} - I_{к2}}{I_{б1} - I_{б2}}.$$

Значение $\beta$ в этом выражении можно определить из выходной или проходной характеристики. Значение коэффициента усиления зависит от качества изготовления транзистора и лежит в пределах 20—190. Иногда в справочниках приводится коэффициент усиления по току $\alpha$ для схемы с общей базой. Зная один коэффициент, другой можно определить по выражению

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

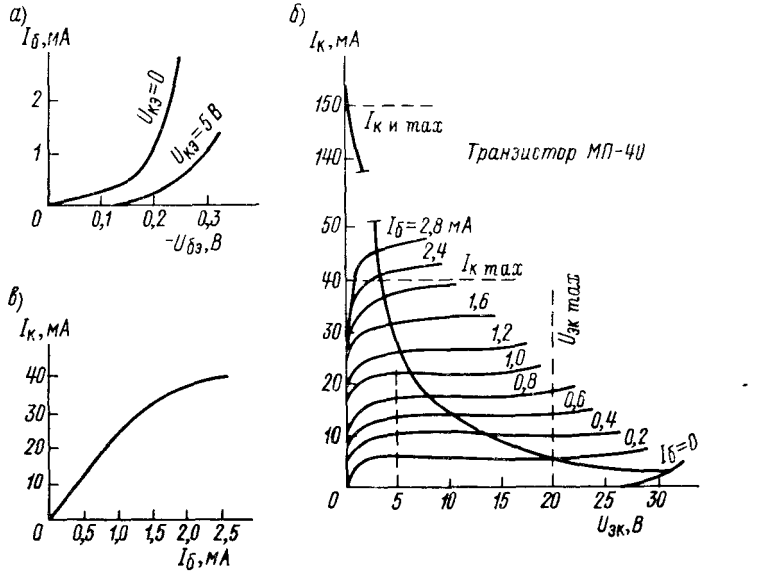



Рис. 30.2. Входная (*а*), выходная (*б*) и проходная (*в*) характеристики транзистора.

2. *Неуправляемый ток коллектора* $I_{к0}$. Чем меньше этот ток, тем лучше транзистор. Если $I_{к0}$ больше паспортного значения, транзистор считается плохим. На рис. 30.3, *а* приведена схема, с помощью которой можно определить значение $I_{к0}$. Неуправляемый ток $I_{к0}$ позволяет оценить качество только коллекторного перехода. О работоспособности всего транзистора судят по начальному току транзистора $I_{кн}$, который можно измерить по схеме, приведенной на рис. 30.3, *б*. При увеличении температуры транзистора на каждые 10° С $I_{к0}$ увеличивается в два раза. Это приводит к самопроизвольному увеличению начального тока в $(\beta + 1)$ раз в соответствии с формулой

$$I_{кн} = I_{к0}(\beta + 1).$$

Начальный ток коллектора $I_{кн}$ является управляемым током. Чем больше положительный потенциал на базе, тем меньше $I_{кн}$. Минимальное значение, до которого можно уменьшить начальный ток, равно $I_{к0}$.

3. *Наибольшая мощность, рассеиваемая на коллекторе*, $P_{к\ доп}$. Фактическая мощность $P_к = I_к U_{эк}$ должна быть меньше допустимой $P_{к\ доп}$. Кривая $P_{к\ доп}$ нанесена на выходной характеристике транзистора. Она показывает, что мощность рассеивания может достигнуть допустимой, как при большом токе $I_к$ с малым напряжением $U_{эк}$, так и при малом токе $I_к$ с большим напряжением $U_{эк}$.

4. *Наибольшее напряжение между эмиттером и коллектором* $U_{эк\ доп}$. Если фактическое напряжение будет больше допустимого, то транзистор выходит из строя. При повышении температуры транзистора значение $U_{эк}$ должно быть снижено. Промышленность выпускает транзисторы с $U_{эк\ доп} = 6—70$ В.

5. *Наибольший ток коллектора* $I_{к\ доп}$. Иногда в паспорте приводится два значения этого тока: меньшее для работы транзистора в режиме усиления, большее — при работе в режиме переключения.

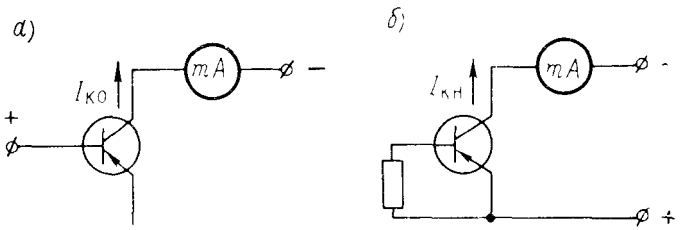



Рис. 30.3. Схемы определения неуправляемого и начального токов транзистора.

Наибольшие числовые значения основных параметров низкочастотных транзисторов малой, средней и большой мощности приведены в табл. 30.2.

**Униполярные транзисторы.** В униполярных транзисторах выходной ток регулируется не входным током (как в биполярных транзисторах), а электрическим напряжением входного сигнала. Под действием электрического поля входного сигнала происходит изменение проводимости тонкого слоя (канала) триода; Поэтому эти транзисторы называют полевыми, или канальными. Входная цепь полевого транзистора практически не потребляет тока, так как входное сопротивление составляет около 10—20 МОм.

Названия электродов униполярных транзисторов отличаются от названия электродов биполярных транзисторов. Электроды этих транзисторов — исток, затвор, сток — по назначению аналогичны эмиттеру, базе и коллектору или катоду, сетке и аноду электронной лампы. Такая двойная аналогия не случайна, так как полевые транзисторы имеют все преимущества полупроводниковых приборов (небольшие размеры, высокая надежность, малое потребление электроэнергии), а их вольт-амперные характеристики аналогичны характеристикам электронных пентодов.

Вольт-амперные характеристики полевого транзистора могут быть получены при помощи схемы, приведенной на рис. 30.4, *а*. *При отсутствии входного напряжения* $U_{зи}$ между затвором и истоком стоковый ток $I_с$ сначала увеличивается значительно, а затем почти не меняется при увеличении напряжения $U_{си}$ между стоком и истоком. При сравнительно большом напряжении $U_{си} = U_{проб}$ происходит пробой транзистора. Пробой *p-n* перехода полевого транзистора не приведет к выходу его из строя, если ток при пробое не достигнет опасной величины. Изменяя напряжение на затворе (например, потенциометром $R_1$), можно изменить ток стока. Чем больше положительное напряжение $U_{зи}$, тем меньше ток стока. Это видно из семейства ВАХ стока и характеристики передачи, приведенных на рис. 30.4, *б*, *в*.

Основные параметры полевых транзисторов следующие:

1) *ток стока в режиме насыщения* $I_{с\ нас}$ при $U_{зи} = 0$ и определенном значении $U_{си}$; этот ток характеризует переход ВАХ из омической области (*0—1*) в пентодную область (*1—2*) — рис. 30.4, *б*;

*Таблица 30.2*

## Основные параметры низкочастотных транзисторов

| Тип | β | $I_{к0}$, мкА | $I_{к\ доп}$, мА | $U_{эк\ доп}$, В | $P_{к\ доп}$, мВт |
|---|---|---|---|---|---|
| Германиевые *n-p-n* | | | | | |
| МП35 | 125 | 30 | 20 | 15 | 150 |
| МП36А | 45 | 30 | 20 | 15 | 150 |
| МП37 | 30 | 30 | 20 | 15 | 150 |
| МП37А | 30 | 30 | 20 | 30 | 150 |
| МП37Б | 50 | 30 | 20 | 30 | 150 |
| МП38 | 55 | 30 | 20 | 15 | 150 |
| МП38А | 100 | 30 | 20 | 15 | 150 |
| ГТ401А | 80 | 25 | 500 | 25 | 600 |
| ГТ401Б | 150 | 25 | 500 | 25 | 600 |
| ГТ401В | 80 | 25 | 500 | 40 | 600 |
| ГТ401Г | 150 | 25 | 500 | 40 | 600 |
| Германиевые *p-n-p* | | | | | |
| ГТ108А | 50 | 10 | 50 | 10 | 75 |
| ГТ108Б | 80 | 10 | 50 | 10 | 75 |
| ГТ108В | 130 | 10 | 50 | 10 | 75 |
| ГТ108Г | 250 | 10 | 50 | 10 | 75 |
| ГТ109А | 50 | 5 | 20 | 6 | 30 |
| ГТ109Б | 80 | 5 | 20 | 6 | 30 |
| ГТ109В | 130 | 5 | 20 | 6 | 30 |
| ГТ109Г | 250 | 5 | 20 | 6 | 30 |
| ГТ109Д | 70 | 5 | 20 | 6 | 30 |
| ГТ109Е | 100 | 5 | 20 | 6 | 30 |
| ГТ109Ж | 100 | 5 | 20 | 6 | 30 |
| ГТ109И | 80 | 5 | 20 | 6 | 30 |
| ГТ115А | 80 | 40 | 30 | 20 | 50 |
| ГТ115Б | 80 | 40 | 30 | 20 | 50 |
| ГТ115В | 150 | 40 | 30 | 20 | 50 |
| ГТ115Г | 150 | 40 | 30 | 20 | 50 |
| ГТ115Д | 250 | 40 | 30 | 20 | 50 |
| ГТ402А | 80 | 25 | 500 | 25 | 600 |
| ГТ402Б | 150 | 25 | 500 | 25 | 600 |
| ГТ403А | 60 | 50 | 1 250 | 30 | — |
| ГТ403Б | 150 | 50 | 1 250 | 30 | — |
| ГТ403В | 60 | 50 | 1 250 | 45 | — |
| ГТ403Г | 150 | 50 | 1 250 | 45 | — |
| ГТ403Д | 150 | 50 | 1 250 | 45 | — |
| ГТ403Е | 30 | 50 | 1 250 | 45 | — |
| ГТ403Ж | 60 | 50 | 1 250 | 60 | — |
| ГТ403И | 30 | 50 | 1 250 | 60 | — |
| ГТ403Ю | 60 | 50 | 1 250 | 30 | — |
| ГТ701А | 10 | 30 | 12 000 | 100 | 50 000 |
| МП25 | 25 | 75 | 300 | 40 | 200 |
| МП25А | 40 | 75 | 400 | 40 | 200 |
| МП25В | 80 | 75 | 400 | 40 | 200 |
| МП26 | 25 | 75 | 300 | 70 | 200 |
| МП26А | 40 | 75 | 400 | 70 | 200 |
| МП26Б | 80 | 75 | 400 | 70 | 200 |
| МП39 | 12 | 15 | 150 | 10 | 150 |
| МП39Б | 60 | 15 | 150 | 10 | 150 |

*Продолжение табл. 30.2*

| Тип | | $I_{к0}$, мкА | $I_{к\ доп}$, мА | $U_{эк\ доп}$, В | $P_{к\ доп}$, мВт | Тип | β | $I_{к0}$, мкА | $I_{к\ доп}$, мА | $U_{эк\ доп}$, В | $P_{к\ доп}$, мВт |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| МП40 | 40 | 15 | 150 | 10 | 150 | П302 | 10 | 100 | 500 | 35 | 1 Вт |
| МП40А | 40 | 15 | 150 | 30 | 150 | П303 | 6 | 100 | 500 | 60 | 1 Вт |
| МП41 | 60 | 15 | 150 | 10 | 150 | П303А | 6 | 100 | 500 | 60 | 1 Вт |
| МП41А | 100 | 15 | 150 | 10 | 150 | П304 | 5 | 100 | 500 | 80 | 1 Вт |
| МП42 | 35 | 25 | 150 | 15 | 200 | П306 | 30 | 100 | 400 | 60 | 1 Вт |
| МП42А | 50 | 25 | 150 | 15 | 200 | П306А | 50 | 100 | 400 | 80 | 1 Вт |
| МП42Б | 100 | 25 | 150 | 15 | 200 | | | | | | |
| МП213 | 50 | 200 | 5 А | 40 | 11 В·А | Кремниевые *n-p-n* | | | | | |
| П213А | 20 | 200 | 5 А | 30 | 10 В·А | МП111 | 25 | 3 | 20 | 20 | 150 |
| П213Б | 40 | 200 | 5 А | 30 | 10 В·А | МП111А | 30 | 1 | 20 | 10 | 150 |
| П214 | 60 | 300 | 5 А | 55 | 10 В·А | МП111Б | 55 | 3 | 20 | 20 | 150 |
| П214А | 150 | 300 | 5 А | 55 | 10 В·А | МП112 | 45 | 3 | 20 | 10 | 150 |
| П214Б | 150 | 150 | 5 А | 55 | 10 В·А | МП113 | 45 | 3 | 20 | 10 | 150 |
| П214В | 20 | 1,5 мА | 5 А | 55 | 10 В·А | МП113А | 105 | 3 | 20 | 10 | 150 |
| П214Г | 150 | 1,5 мА | 5 А | 55 | 10 В·А | | | | | | |
| П216А | 80 | 500 | 7,5 А | 40 | 30 В·А | Кремниевые *p-n-p* | | | | | |
| П216Б | 10 | 1,5 мА | 7,5 А | 35 | 24 В·А | — | — | — | — | — | — |
| П216В | 30 | 2,0 мА | 7,5 А | 35 | 24 В·А | — | — | — | — | — | — |
| П216Г | 5 | 2,5 мА | 7,5 А | 50 | 24 В·А | — | — | — | — | — | — |
| П216Д | 30 | 2 мА | 7,5 А | 50 | 24 В·А | — | — | — | — | — | — |
| П217 | 20 | 500 | 7,5 А | 60 | 30 В·А | — | — | — | — | — | — |
| П217А | 60 | 500 | 7,5 А | 60 | 30 В·А | — | — | — | — | — | — |
| П217Б | 150 | 500 | 7,5 А | 60 | 30 В·А | МП114 | 9 | 10 | 10 | 70 | 150 |
| П217В | 40 | 3 мА | 7,5 А | 60 | 24 В·А | МП115 | 45 | 10 | 10 | 40 | 150 |
| П217Г | 20 | 3 мА | 7,5 А | 60 | 24 В·А | МП116 | 100 | 10 | 10 | 20 | 150 |

2) *напряжение отсечки* $U_0$ — напряжение между затвором и истоком, при котором закрывается транзистор ($I_с = 0$);

3) *допустимое напряжение* $U_{доп\,си}$ между стоком и истоком; если фактическое напряжение $U_{си}$ будет больше допустимого, то транзистор может быть пробит;

4) *крутизна характеристики* $S$, определяемая по выражению

$$S = \frac{\Delta I_{ст}}{\Delta U_{зи}}.$$

Из рис. 30.4 видно, что крутизна имеет максимальное значение при нулевом напряжении на затворе транзистора.

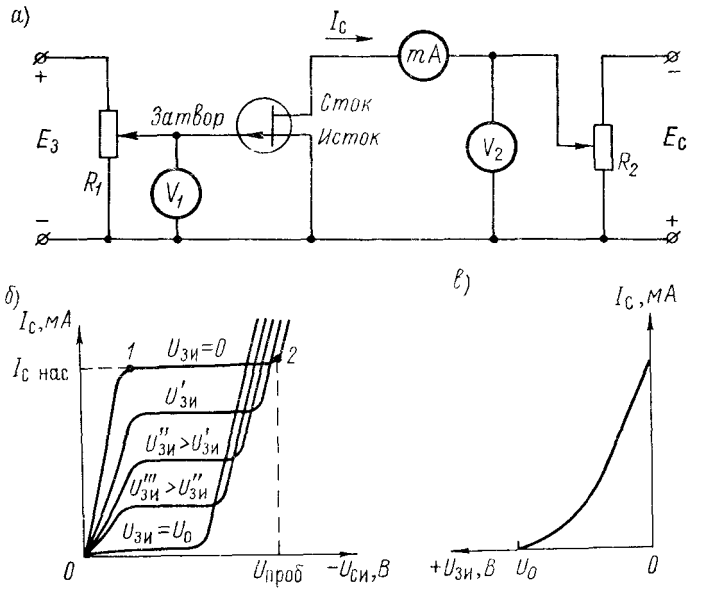



Рис. 30.4. Схема включения (*а*) и характеристики (*б*, *в*) полевого транзистора.

В справочниках на полевые транзисторы иногда приводятся рассеиваемая мощность $P$, напряжение $U_{зи}$, ток затвора $I_з$ и предельная частота $f_{доп}$.

Промышленность выпускает полевые транзисторы в металлическом и пластмассовом корпусе. Металлический корпус соединен с затвором транзистора. При необходимости можно менять местами выводы стока и истока. Это не нарушает работы, однако электрические параметры могут несколько измениться.

В табл. 30.3 приведены наибольшие значения основных параметров отечественных полевых транзисторов.

Такие преимущества полевых транзисторов, как большое входное сопротивление, малый уровень шума и небольшая зависимость параметров от температуры, определили область применения канальных триодов. Это входные каскады усилителей переменного тока, реле времени с большой выдержкой (более 30 мин), мультивибраторы сверхнизкой частоты (с периодом около 10 с), триггеры, стабилизаторы тока. При использовании полевых транзисторов в переключающих схемах следует учитывать, что они имеют сравнительно большое сопротивление в состоянии «включен», достигающее 300—3000 Ом. Кроме того, при монтаже поле-

*Таблица 30.3*

**Основные параметры полевых транзисторов**

| Тип | $I_{с\ нас}$, мА | $U_{о}$, В | $U_{доп\ ск}$, В | $S$, мА/В | $P$, мВт | $U_{зи}$, В | $I_{з}$, пА | $f_{доп}$, мГц |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| КП101Г | 2 | +5 | —10 | 0,15 | — | — | 10 | — |
| КП101Д | 5 | +10 | —10 | 0,30 | — | — | 50 | — |
| КП101Е | 5 | +10 | —10 | 0,30 | — | — | 50 | — |
| КП102Е | 0,55 | +2,8 | —15 | 0,70 | — | +10 | 1,5 | 3 |
| КП102Ж | 1,0 | +4,0 | —15 | 0,9 | — | +10 | 1,5 | 3 |
| КП102И | 1,8 | +5,5 | —15 | 1,0 | — | +10 | 1,5 | 3 |
| КП102К | 3,0 | +7,5 | —15 | 1,2 | — | +10 | 1,5 | 3 |
| КП102Л | 6,0 | +10,0 | —15 | 1,3 | — | +10 | 1,5 | 3 |
| КП103Е | 0,7 | +1,5 | —10 | 1,8 | 120 | — | 20 | 5 |
| КП103Ж | 1,2 | +2,2 | —10 | 2,1 | 120 | — | 20 | 5 |
| КП103И | 2,1 | +3,0 | —10 | 2,6 | 120 | — | 20 | 5 |
| КП103К | 3,8 | +4,0 | —10 | 3,5 | 120 | — | 20 | 5 |
| КП103Л | 6,6 | +6,0 | —10 | 3,8 | 120 | — | 20 | 5 |
| КП103М | 12,0 | +7,0 | —10 | 4,4 | 120 | — | 20 | 5 |
| КП301Б | 15,0 | —4,2 | —20 | 1,0 | 200 | —30 | 0,3 | 200 |
| КП302А | 24 | +5 | — | 5 | — | — | — | 50 |
| КП302Б | 43 | +7 | — | 7 | — | — | — | 50 |
| КП302В | 33 | +10 | — | 10 | — | — | — | 50 |
| КП303А | 5 | +1 | — | 4 | — | — | — | 100 |
| КП303Б | 20 | +8 | — | 6,5 | — | — | — | 100 |
| КП303В | 20 | +8 | — | 6,5 | — | — | — | 100 |
| КП303Г | | +8 | — | — | — | — | — | 100 |
| КП303Д | 5 | +4 | — | 4 | — | — | — | 100 |
| КП350А | 20 | +1 | — | 8 | — | — | — | 300 |

вых транзисторов необходимо принимать меры, предохраняющие транзистор от статического электричества (паять заземленным паяльником, руки монтажника и инструмент должны находиться на заземленной металлической подложке, до подачи напряжения электроды транзистора закорачивают несколькими витками тонкой проволоки).

## § 31. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РЕЗИСТОРЫ

Полупроводниковые резисторы не имеют *p-n* перехода. Их работа основана на физических процессах, происходящих в полупроводниковом материале. Электрическое сопротивление полупроводниковых резисторов изменяется под действием температуры (у термисторов и позисторов), излучения (у фоторезисторов), электрического напряжения (у варисторов), магнитного поля (у болометров), деформаций (у тензорезисторов).

К положительным свойствам полупроводниковых резисторов следует отнести высокую чувствительность к входному воздействию, небольшую инерционность, малые размеры, массу и низкую стоимость, большой срок службы (3000—5000 ч). К недостаткам этих приборов относятся значительный разброс параметров внутри одного типа приборов, нелинейность основной характеристики, влияние на сопротивление различных физических воздействий.

**Полупроводниковые терморезисторы.** Различают два вида терморезисторов: *термисторы* и *позисторы*. При увеличении температуры сопротивление термисторов уменьшается, а сопротивление позисторов увеличивается.

По конструкции терморезисторы подразделяются на приборы прямого (рис. 31.1, *а*) и косвенного (рис. 31.1, *б*) подогрева. *Терморезисторы прямого подогрева* имеют токопроводящий элемент в виде стержня, диска, шайбы или бусинки

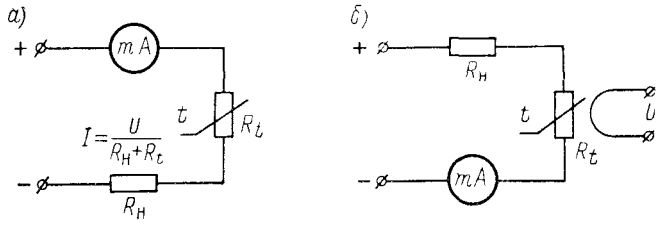



Рис. 31.1. Схемы включения термисторов.

из полупроводника. *В термисторах косвенного подогрева* нагрев рабочего тела полупроводника производится от специального нагревательного элемента, подобного нити накала электронных ламп.

Принцип действия термисторов основан на свойстве полупроводников увеличивать число свободных электронов при возрастании температуры. Этим они отличаются от металлических терморезисторов, в которых число свободных элек-

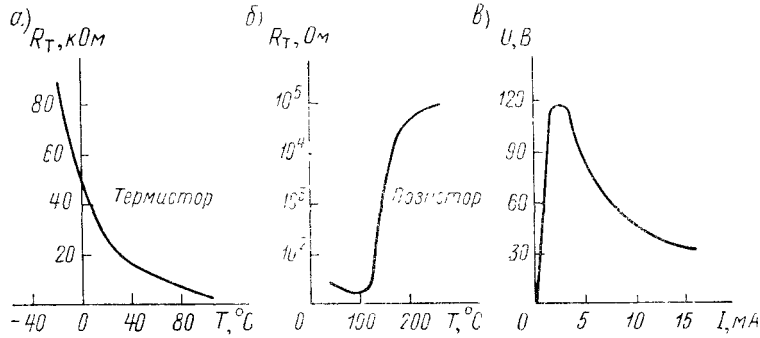



Рис. 31.2. Температурные характеристики термистора (*а*) и позистора (*б*); вольт-амперная характеристика термистора (*в*).

тронов с изменением температуры не меняется. При отрицательных температурах в термисторах имеется небольшое число свободных электронов. При значительных положительных температурах проводимость полупроводников приближается к проводимости металлов.

В зависимости от используемого материала терморезисторы можно разбить на группы: медно-марганцевые ММТ и СТ2, кобальто-марганцевые КМТ и СТ1, медно-кобальтовые оксидные СТ3, титанато-бариевые СТ6 (позисторы).

По способу защиты от воздействия окружающей среды различают терморезисторы для работы в сухих помещениях, в местах с повышенной влажностью, в жидкостях.

Важнейшими характеристиками терморезисторов являются температурная зависимость сопротивления (рис. 31.2, *а*, *б*) и вольт-амперная характеристика (рис. 31.2, *в*).

К основным параметрам терморезисторов нужно отнести следующие.

1. *Номинальное сопротивление* $R_{ном}$ — сопротивление терморезистора при температуре окружающей среды $T_0 = 293$ К. Наибольшие допустимые отклонения от номинального сопротивления для большинства резисторов составляют $\pm 10$, $\pm 20\%$. Изменение сопротивления термистора в зависимости от температуры определяется формулой

$$R_T = R_{ном} e^{\frac{B(T_0 - T)}{T_0 T}},$$

где $R_T$ — сопротивление терморезистора при температуре $T$, К, которая должна лежать в диапазоне рабочих температур $\Delta$; $e$ — основание натуральных логарифмов; $B$ — постоянная полупроводникового материала.

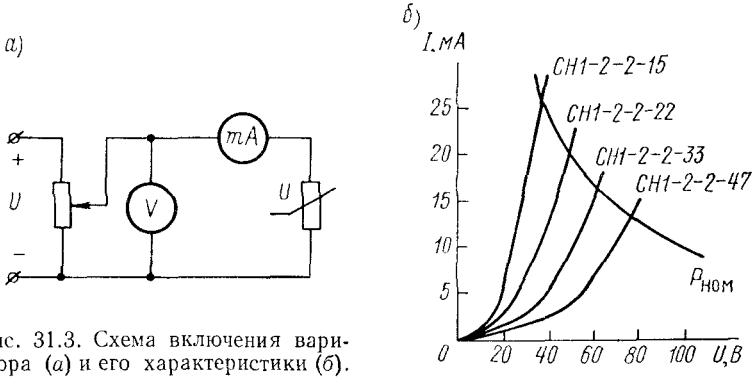



Рис. 31.3. Схема включения варистора (*а*) и его характеристики (*б*).

2. *Температурный коэффициент сопротивления* (ТКС), показывающий, на сколько процентов изменится сопротивление терморезистора при изменении температуры на один градус,

$$ТКС = -\frac{B}{T^2},$$

где $T$ — температура, при которой определялся ТКС, К.

3. *Постоянная времени* $\tau$, характеризующая инерционность терморезистора. Это время в секундах, в течение которого температура терморезистора становится равной 63° С с момента перенесения его из воздушной среды с температурой 0° С в воздушную среду с температурой 100° С.

4. *Минимальная мощность рассеивания* $P_{min}$ — мощность, при которой терморезистор при прохождении через него тока не нагревается выше температуры окружающей среды, и поэтому сопротивление его практически не изменяется. Считают, что нагрев от действия тока отсутствует, если сопротивление термистора уменьшается не более чем на 1%.

5. *Максимальная мощность* $P_{max}$ — мощность разогрева терморезистора до предельной температуры в воздушной среде от температуры 20° С. Предельной температурой является наибольшая температура диапазона $\Delta$.

Числовые значения основных параметров терморезисторов и позисторов приведены в табл. 31.1—31.3.

Терморезисторы широко используются в качестве тепловых датчиков для измерения и регулирования температуры, для температурной стабилизации транзисторных, электронных и измерительных устройств. Они применяются в схемах релейной сигнализации предельных температур и в схемах стабилизации напряжения. Кроме того, терморезисторы могут быть использованы для измерения влажности воздуха, скорости ветра и жидкости, давления и теплопроводности газа, в качестве реле времени и для других целей.

**Основные параметры термисторов с прямым подогревом**

| Тип | Пределы $R_{ном}$, кОм | $B$, К | ТКС, %/°С | Δ, °С | $P_{min}$, мВт | $P_{max}$, мВт | τ, с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| КМТ-1 | 22—1000 | 3600—7200 | 4,2—8,4 | —60÷+180 | 1000 | 0,3 | 85 |
| ММТ-1 | 1—220 | 2060—4300 | 2,4—5,0 | —60÷+125 | 600 | 0,4 | 85 |
| КМТ-4 | 22—1000 | 3600—7200 | 4,2—8,4 | —60÷+125 | 800 | 0,3 | 115 |
| ММТ-4 | 1—220 | 2060—4300 | 2,4—5,0 | —60÷+125 | 700 | 0,5 | 115 |
| ММТ-6 | 10—100 | 2060 | 2,4 | —60÷+120 | 50 | 0,1 | 35 |
| КМТ-8 | 0,1—10 | 3600—7200 | 4,2—8,4 | —40÷+70 | 600 | 1 | — |
| ММТ-8 | 0,001—1,0 | 2060—3430 | 2,4—4,0 | —40÷+70 | 600 | 2 | — |
| ММТ-9 | 0,01—4,7 | 2060—4300 | 2,4—5,0 | —60÷+125 | — | 2 | — |
| КМТ-10 | 100—3300 | 3600 | 4,2 | 0÷+120 | — | — | 75 |
| КМТ-11 | 100—3300 | 3600 | 4,2 | 0÷+120 | — | — | 10 |
| КМТ-12 | 0,1—10 | 3600 | 4,2 | —40÷+120 | — | 0,3 | — |
| ММТ-12 | 0,0047—1,0 | 2060—3430 | 2,4—4,0 | —60÷+120 | — | 0,5 | — |
| ММТ-13 | 0,01—2,2 | 2060—4300 | 2,4—5,0 | —60÷+125 | — | 0,3 | — |
| КМТ-14 | 0,51; 0,91; 160; 200; 330; 4300; 7500 при 150° С | 4100—7000 | 2,3—3,9 | —10÷+300 | 100 | 0,03 | — |
| КМТ-17 | 0,3—20 | 3600 | 4,2 | —60÷+155 | 500 | 0,1 | 30 |
| СТ1-17 | 0,3—22 | 3600—6000 | 4,2—7,0 | —60÷+100 | 500 | 0,1 | 30 |
| СТ3-17 | 0,033; 0,047; 0,068; 0,01; 0,15; 0,22; 0,33 | 2580—3860 | 3,0—4,5 | —60÷+100 | 500 | 0,2 | 30 |
| СТ1-18 | 1,5; 2,2; 22; 33; 1500; 2200 при 150° С | 4050—9000 | 2,25—5,0 | —60÷+300 | 45 | 0,03 | 1 |
| СТ3-18 | 0,68; 1; 1,5; 2,2; 3,3 | 2250—3520 | 2,6—4,1 | —90÷+125 | 15 | 0,02 | 1 |
| СТ1-19 | 3,3; 4,7; 6,8; 10; 100; 150; 1500; 2200; при 150° С | 4230—7200 | 2,3—4,0 | —60÷+300 | 60 | 0,05 | 3 |
| СТ3-19 | 2,2; 10; 15 | 2900—3850 | 3,4—4,5 | —90÷+125 | 45 | 0,04 | 3 |
| СТ3-22 | 1 | 2700—3700 | 3—4,15 | —60÷+85 | — | — | 15 |
| СТ3-23 | 0,0022; 0,0027; 0,0033; 0,0039; 0,0047 | 2600—3200 | 3,0—3,7 | 0÷+125 | — | — | — |
| СТ3-24 | 0,68; 1; 1,5; 2,2; 3,3 | 2250—3520 | 2,6—4,1 | —60÷+85 | — | — | — |
| СТ3-25 | 1,5; 2,2; 3,3 | 2260—3200 | 3—3,7 | —100÷+125 | 8 | 0,01 | 0,4 |
| СТ2-26 | 1—100 | 2060—4300 | 2,4—5 | —60÷+125 | — | — | — |
| СТ3-26 | 0,1—0,68 | 2060—4300 | 2,4—5 | —60÷+125 | — | — | — |

*Таблица 31.2*

**Основные параметры термисторов с косвенным подогревом**

| Тип | $R_{ном}$, кОм | $B$, К | $\Delta$, °С | $P_{max}$, мВт | $\tau$, с | $R_{min}$ при $t = t_{max}$, Ом | Подогреватель | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | $R$, Ом | $I_{max}$, мА |
| СТ1-21 | 10; 33; 100 | 3700—4100 | —60÷÷+85 | 60 | 15—40 | 50; 150; 300 | 100 | 25 |
| СТ3-21 | 0,68; 1; 1,5; 10; 15 | 3100—3600 | —60÷÷—85 | 60 | 15—40 | 10 | 100 | 25 |

*Таблица 31.3*

**Основные параметры позисторов**

| Тип | $R_{ном}$, Ом | $\frac{R_{гор}}{R_{хол}}$ | $\Delta$, °С | $P_{max}$, мВт | $\tau$, с | ТКС, %/°С | Температурный интервал с положительным ТКС |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| СТ5-1 | 20—150 | $10^3$ | —20÷+200 | 1600 | 20 | 20 | 100—200 |
| СТ6-1А | 40—400 | $10^3$ | —60÷+155 | 1100 | 20 | 10 | 40—155 |
| СТ6-1Б | 100—700 | $10^4$ | —60÷+125 | 800 | 20 | 15 | 20—125 |
| СТ6-2Б | 10—100 | $10^4$ | —60÷+125 | 1300 | — | 15 | 0—125 |
| СТ6-3Б | $10^3$—$10^4$ | $10^4$ | —60÷+125 | 200 | 5 | 15 | 10—125 |
| СТ6-4Б | 100—400 | $10^4$ | —60÷+125 | 800 | 40 | 15 | 20—125 |
| СТ6-5Б | 3—20 | $10^3$ | —60÷125 | 2500 | 10 | 15 | 20—125 |
| СТ6-4В | $5 \cdot 10^2$ | $10^5$ | —60÷—125 | 800 | 40 | 10 | 0—125 |
| СТ6-4Г | $10^2$ | 5—80 | —60÷+125 | 800 | 40 | 2—8 | —20÷+125 |

**Варисторы.** Варисторами называются полупроводниковые объемные приборы, активное сопротивление которых значительно уменьшается при увеличении напряжения. При этом варисторы практически безынерционны. Материалом варисторов является карбид кремния.

На рис. 31.3, *а* представлена электрическая схема, при помощи которой снимается вольт-амперная характеристика варистора, а на рис. 31.3, *б* — ВАХ для четырех видов варисторов. Вольт-амперные характеристики варисторов симметричны для токов различных направлений и в широком диапазоне описываются уравнениями

$$U = CI^{\beta}, \quad I = BU^{\beta},$$

где $C$ — постоянное напряжение, при котором через прибор проходит ток в 1 А; $\beta$ — коэффициент нелинейности ВАХ; $B$ — постоянный коэффициент.

Основные параметры варисторов следующие.

1. *Классификационное напряжение* $U_{кл}$ — напряжение варистора, при котором через него проходит ток заданной (классификационной) величины $I_{кл}$. Следует иметь в виду, что классификационное напряжение нельзя длительное время прикладывать к прибору, поскольку произведение $U_{кл}I_{кл}$ больше допустимой мощности, рассеиваемой варистором, $P_{доп}$.

2. *Номинальная мощность рассеивания* $P_{доп}$. Фактическая мощность прибора должна быть всегда меньше допустимой. Кривая допустимой мощности приведена на рис. 31.3, *б*.

3. *Статическое* $R_{ст}$ и *динамическое* $R_д$ сопротивления, определяемые по формулам

$$R_{ст} = \frac{U}{I}, \quad R_д = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

4. *Коэффициент нелинейности* вольт-амперной характеристики $\beta$, определяемый по формуле

$$\beta = \frac{R_{ст}}{R_д}.$$

Основные параметры варисторов приведены в табл. 31.4.

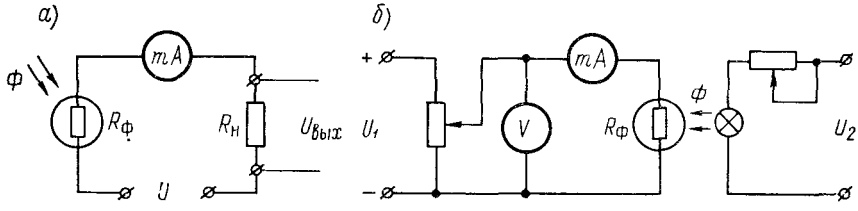



Рис. 31.4. Схемы включения фоторезистора.

Диапазон рабочих температур варисторов лежит в пределах от —40 до +100° С, срок службы составляет 3000 ч.

Варисторы применяют для стабилизации напряжений в сеточных цепях электронных ламп, в схемах защиты элементов от перегрузок по напряжению, для преобразования электрических величин.

**Фоторезисторы.** Работа фоторезисторов основана на явлении внутреннего фотоэффекта, состоящего в том, что в результате поглощения света в полупроводнике появляются дополнительные свободные электроны. Под действием приложенного напряжения первичные электроны приходят в движение и сталкиваются с атомами кристаллической решетки, вызывая дополнительный вторичный поток электронов. Таким образом, при освещении фоторезистора его проводимость значительно увеличивается. Это приводит к увеличению тока в цепи (рис. 31.4, *а*, *б*) и возрастанию напряжения на нагрузке в соотьетствии с выражениями

$$I = \frac{U}{R_Ф + R_н}; \quad U_{вых} = IR_н,$$

где $R_н$ — сопротивление нагрузки; $R_Ф$ — сопротивление фоторезистора.

К основным характеристикам фоторезисторов относится вольт-амперная характеристика (рис. 31.5, *а*) и световая (рис. 31.5, *б*). Эти характеристики можно получить при помощи схемы, приведенной на рис. 31.4, *б*.

Основные параметры фоторезисторов следующие:

1) *интегральная чувствительность* $S_и$ — отношение разности между током $I_с$ при освещении и током $I_т$, который проходит по резистору при его затемнении, к потоку белого света $Ф$, падающего на фоторезистор,

$$S_и = \frac{I_с - I_т}{Ф};$$

2) *удельная чувствительность* $K$, определяемая по выражению

$$K = \frac{S_и}{U},$$

где $U$ — напряжение, приложенное к фоторезистору.

*Таблица 31.4*

**Основные параметры варисторов**

| Тип | $P_{доп}$, Вт | $U_{кл}$, В | $I_{кл}$, мА | β |
|---|---|---|---|---|
| СНГ-1 1 | 1 | 560<br>680<br>820<br>1000<br>1200<br>1300<br>1500 | 10 | 3,6<br>4,0<br>4,0<br>4,0<br>4,0<br>4 5<br>4,5 |
| СН1-1-2 | 0,8 | 560<br>680<br>820<br>1000<br>1200<br>1300<br>1500 | 10 | 3,5<br>4,0<br>4,0<br>4,0<br>4,0<br>4 5<br>4,5 |
| СН1-2-1 | 1 | 56—270 | 2 | 3,5 |
| СН1-2-2 | 1 | 15—33<br>47—100 | 3 | 3,0<br>3,5 |
| СН1 3<br>СН1-6 | 0,1<br>2,5 | 5—27<br>33 | 5<br>20 | 2,0<br>4,0 |

3) *темновое сопротивление* $R_т$ — активное сопротивление при полном отсутствии освещения, величина $R_т$ может иметь значительный разброс.

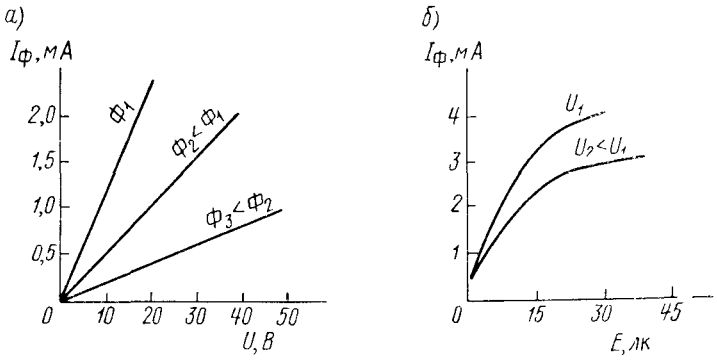



Рис 31.5. Вольт-амперные и световые характеристики фоторезистора.

4) *кратность изменения сопротивления* $R_т/R_{св}$, где $R_{св}$ — сопротивление фоторезистора при определенной освещенности;

5) *рабочее напряжение* $U_р$ и допустимая мощность рассеивания $P_{доп}$; необходимо следить за тем, чтобы при освещении мощность на фоторезисторе была меньше допустимой;

6) *рабочая область спектра*, показывающая, при какой длине волны освещения чувствительность фотодатчика наибольшая, например, сернисто-свинцовые фоторезисторы (ФСА) сильно реагируют на инфракрасные лучи с длиной волны $\lambda = 2{,}1$ мкм, сернисто-кадмиевые (ФСК) и сернисто-висмутовые (ФСБ) фоторезисторы наиболее чувствительны к видимому свету ($\lambda = 0{,}4$—$0{,}8$ мкм), у селенисто-кадмиевых (СФЗ, ФСД) максимум чувствительности относится к излучению с длиной волны $\lambda = 0{,}75$ мкм.

Основные параметры фоторезисторов приведены в табл. 31 5.

Достоинствами фоторезисторов являются высокая чувствительность к свету, значительная мощность выходного сигнала, возможность работы от сети постоянного и переменного тока.

*Таблица 31.5*

**Основные параметры фоторезисторов**

| Тип | $S_и$, А/лм | $K$, мкА/(лм. В) | $R_т/R_с$ | $U_р$, В | $R_т$, мОм | $I_т$, мкА | $I_{св}$, мкА | $P_{доп}$, Вт |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ФСА-0 | — | 500 | 1,2 | 100 | 0,4—1 | — | — | 0,01 |
| ФСА-1 | — | 500 | 1,2 | 100 | 0,4—1 | — | — | 0,01 |
| ФСА-Г1 | — | 500 | 1,2 | 40 | 0,05—0,5 | — | — | 0,01 |
| ФСА-Г2 | — | 500 | 1,2 | 40 | 0,04—1,0 | — | — | 0,01 |
| ФСА-6 | — | 500 | 1,2 | 30 | 0,03 | — | — | 0,01 |
| ФСК-0 | 1,4 | 7 000 | 200 | 50 | 5 | 10 | 2000 | 0,125 |
| ФСК-1 | 1,4 | 7 000 | 200 | 50 | 5 | 10 | 2000 | 0,125 |
| ФСК-2 | — | 1 500 | 80 | 100 | 10 | 10 | 800 | 0,125 |
| ФСК-4 | 1,4 | 7 000 | 200 | 50 | 5 | 10 | 2000 | 0,125 |
| ФСК-5 | 1,2 | 6 000 | 100 | 50 | 5 | 10 | 1000 | 0,05 |
| ФСК-6 | 1,8 | 9 000 | — | 50 | 3,3 | 15 | 2000 | 0,2 |
| ФСК-7А | — | 1 500 | — | 50 | 1 | 50 | 350 | 0,35 |
| ФСК-7Б | 1,2 | 6 000 | — | 50 | 0,1 | 50 | 800 | 0,35 |
| ФСК-Г7 | 0,7 | 12 000 | 200 | 50 | 5 | 10 | 2000 | 0,35 |
| ФСК-Г1 | 1,2 | 4 000 | 150 | 50 | 5 | 10 | 1500 | 0,12 |
| ФСК-Г2 | 2,4 | 400 000 | 400 | 50 | 5 | 10 | 4000 | 0,2 |
| ФСК-П1 | — | 75 000 | 1 000 | 100 | 1000 | 0,01 | 2000 | 0,1 |
| СФ2-1 | — | — | 2 000 | 15 | 30 | 0,5 | 1000 | 0,01 |
| СФ2-2 | — | — | 3 000 | 10 | 4 | 0,5 | 1500 | 0,05 |
| СФ2-4 | — | — | 200 | 15 | 15 | 1,0 | 750 | 0,01 |
| СФ2-5 | — | — | 400 | 1,3 | 1 | 1,3 | 500 | 0,025 |
| СФ2-8 | — | — | 1 000 | 100 | 100 | 1,0 | 1000 | 0,125 |
| СФ2 9 | — | — | 33 | 25 | 3,3 | — | 900 | 0,125 |
| СФ2-12 | — | — | 600 | 15 | 15 | 0,3 | 1200 | 0,01 |
| СФ2-16 | — | — | 100 | 10 | 3,3 | — | 300 | 0,01 |
| ФСД-0 | — | 40 000 | 2 000 | 20 | 20 | 1 | 2000 | 0,05 |
| ФСД-1 | — | 40 000 | 2 000 | 20 | 20 | 1 | 2000 | 0,05 |
| ФСД-Г1 | — | 40 000 | 2 000 | 20 | 20 | 1 | 2000 | 0,05 |
| СФ3-1 | — | 600 000 | 150 000 | 15 | 1500 | 0,01 | 1500 | 0,01 |
| СФ3-5 | — | — | 500 | 2 | 2 | 1 | 500 | 0,05 |
| СФ3-8 | — | — | 500 | 25 | 20 | 1 | 750 | 0,050 |

# § 32. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Электронно-лучевыми трубками (ЭЛТ) называют приборы, преобразующие электрические сигналы в световые с помощью управляемого электронного луча. В зависимости от способа управления лучом ЭЛТ подразделяются на трубки с электростатической системой управления, трубки с электромагнитной системой управления и трубки с комбинированным управлением.

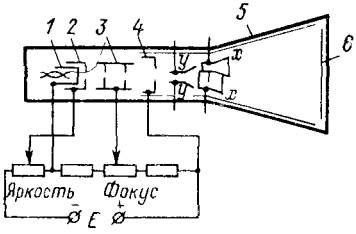



Рис. 32.1. Устройство электронно-лучевой трубки с электростатическим управлением.

Электронно-лучевые трубки используются для наблюдения и фотозаписи с экрана переходных электрических процессов (осциллографические трубки), для регистрации электрических сигналов (индикаторные трубки) и для хранения информации в ЭВМ (запоминающие трубки).

На рис. 32.1 представлена принципиальная схема осциллографической трубки с электростатической системой управления. Рассмотрим кратко назначение ее основных элементов.

Электронная пушка состоит из нескольких электродов и предназначена для получения узкого пучка электронов. К ним относятся подогревный катод *1*, управляющий электрод *2* (модулятор) и два анода *3* и *4*. На модулятор подается отрицательное смещение, изменяя величину которого, можно менять яркость светящейся точки на экране трубки. Аноды *3* и *4*, выполненные в виде полых металлических цилиндров, обеспечивают дальнейшую фокусировку луча на пути

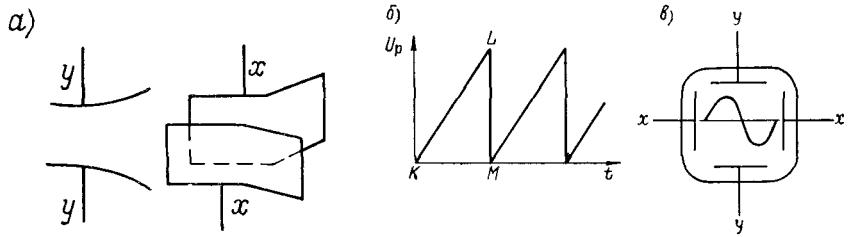



Рис. 32.2. Развертка исследуемого напряжения: *а* — отклоняющие пластины ЭЛТ; *б* — пилообразное напряжение развертки; *в* — принцип образования развертки.

к управляющим пластинам *xx* и *yy* (рис. 32.2, *а*). Пройдя через систему отклоняющих пластин, луч попадает на экран *6* (рис. 32.1), покрытый тонким слоем люминофора. Внутренняя поверхность колбы покрыта электропроводящим графитовым слоем *5*, служащим для отвода накапливающихся на экране ЭЛТ электронов.

Рассмотрим принцип получения на экране ЭЛТ изображения. Допустим, что к вертикальным отклоняющим пластинам подведено некоторое напряжение $U_c = U_m \sin \omega t$. Для его развертки и получения на экране синусоиды необходимо подвести к горизонтальным пластинам так называемое напряжение развертки $U_p$, имеющее обычно пилообразную форму (рис. 32.2, *б*). Участок *KL* обеспечивает развертку изображения по горизонтали и при снижении $U_p$ (участок *LM*) происходит мгновенное возвращение луча в исходное положение. При одновременной подаче исследуемого напряжения $U_c$ на пластины *yy* и напря-

жения развертки $U_р$ на пластины *xx* электронный луч будет вычерчивать на экране развернутую во времени диаграмму исследуемого напряжения (рис. 32.2, *в*).

Для того чтобы изображение на экране оставалось неподвижным, необходимо произвести операцию синхронизации, которая состоит в том, что период развертки $\tau_р$ устанавливается равным целому числу периодов исследуемого напряжения $\tau_с$: $\tau_р = m\tau_с$.

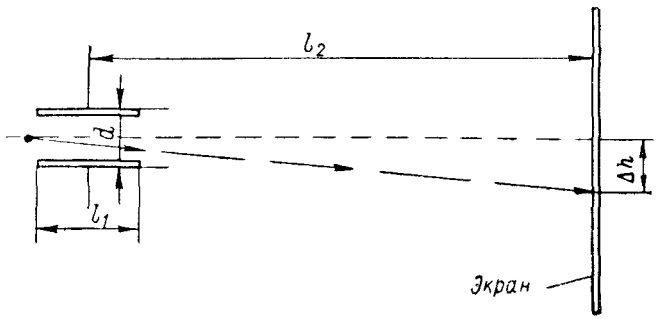



Рис. 32.3. К определению зависимости чувствительности ЭЛТ от ее конструктивных размеров.

Одним из основных параметров ЭЛТ является чувствительность трубки $S$, мм/В. Она представляет собой отношение величины отклонения луча на экране к приращению напряжения на отклоняющих пластинах (рис. 32.3):

$$S = \frac{\Delta h}{\Delta U} = \frac{l_1 l_2}{2U_{а2} d},$$

где $\Delta h$ — *отклонение луча*; $l_1$ — *длина отклоняющих пластин*, мм; $l_2$ — расстояние от середины пластины до экрана, мм; $d$ — расстояние между пластинами, мм; $U_{а2}$ — напряжение на втором аноде, В.

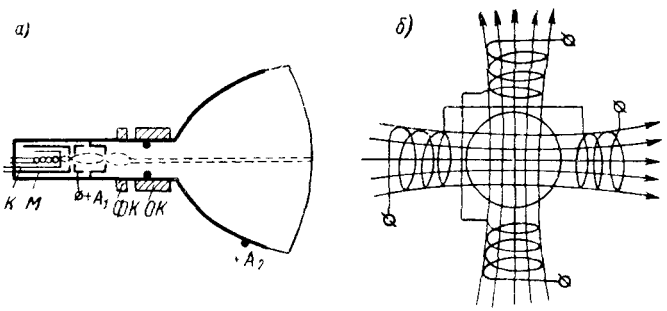



Рис. 32.4. Устройство ЭЛТ с магнитным управлением (*а*), отклоняющие катушки (*б*).

Значение $S$ колеблется в пределах 0,1—1,0 мм/В. Наряду с чувствительностью к основным параметрам ЭЛТ относятся: яркость свечения и длительность послесвечения. Длительность послесвечения колеблется в пределах от $10^{-5}$ до 16 с.

Осциллографические трубки получили наиболее широкое распространение в электронных осциллографах.

В индикаторных трубках применяют электромагнитную систему управления, которая обеспечивает большую яркость свечения экрана и более качественную фокусировку луча. На рис. 32.4, *а* показано устройство такой ЭЛТ.

Электронная пушка, как и ранее, состоит из катода $K$, модулятора $M$ и двух анодов $A_1$ и $A_2$. Фокусирующая катушка $ФК$ создает неоднородное магнитное поле. Отклоняющие катушки $ОК$ расположены перпендикулярно одна к другой и к оси трубки и создают взаимно перпендикулярные магнитные поля (рис. 32.4, *б*). К числу особенностей работы индикаторных трубок относится повышенная яркость отметки и длительное послесвечение экрана. Координаты отметки на экране используют для определения параметров объекта в радиолокации и в других целях.

Обозначение ЭЛТ строится из нескольких располагаемых последовательно цифровых и буквенных элементов. Вначале стоит число, обозначающее диаметр или диагональ экрана в сантиметрах. Далее следует буквенное сочетание, которое характеризует тип трубки: ЛО — с электростатическим, ЛМ — с электромагнитным отклонением. Затем ставится порядковый номер прибора и, наконец, буква, обозначающая тип экрана и цвет его свечения: А — синий; Б или В — белый; Г — фиолетовый и т. д.

Приведем основные данные двух трубок — типовой осциллографической трубки *8ЛО29И* и типовой индикаторной 35ЛМ1С.

**Основные данные трубки 8ЛО29И**

| | |
|---|---|
| Напряжение накала, В | 6,3 ±0,6 |
| Ток накала, мА | 600 ±60 |
| *Напряжение на первом аноде*, В | 280—516 |
| Напряжение на втором аноде, В | 1500 |
| Напряжение на модуляторе, В | —45 ±22,5 |
| Наибольший ток в цепи первого анода, мкА | 15 |
| Наибольший ток в цепи модулятора, мкА | 5 |
| Яркость свечения, нт | 16 |
| Послесвечение экрана | Среднее |
| $S_{верт}$, мм/В | 0,17 |
| $S_{гор}$, мм/В | 0,23 |
| Долговечность, ч | 1000 |
| Габарит, мм: | |
| $L$ | 261 |
| $D$ | 78 |
| Масса, кг | 0,45 |

**Основные данные трубки 35ЛМ1С**

| | |
|---|---|
| Напряжение накала, В | 6,3 ±0,6 |
| Ток накала, мА | 520 ±70 |
| $U_{a1}$ (фокусирующее), В | 0—250 |
| $U_{a1}$ (предельное), В | 500 |
| $U_{a2\ min}$, кВ | 10 |
| $U_{a2\ max}$, кВ | 16 |
| Запирающее напряжение на модуляторе, В | —60 ±30 |
| Яркость свечения экрана, нт | 22 |
| Долговечность, ч | 750 |
| Послесвечение экрана | Длительное |
| *Цвет послесвечения* | Оранжевый |
| Размер экрана, мм | 217×288 |
| Габарит, мм: | |
| $L$ | 430 |
| $D$ | 325 |
| Масса, кг | 5 |

# ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

## § 33. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ

Технической основой современной судовой электронной автоматики являются логические и линейные интегральные микросхемы. Наряду с интегральными микросхемами в ряде логических и особенно в линейных (аналоговых) функциональных устройствах широко применяются миниатюрные дискретные электрорадиоэлементы (ЭРЭ) в виде транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов, индуктивностей и др.

Разработка миниатюрных функциональных узлов на базе интегральной электроники (микроэлектроники) стала возможной только благодаря достижениям в областях физики твердого тела, пленочной технологии, химии полимерных веществ.

Микроэлектроника — новая область науки и техники — охватывает все области радиоэлектроники и развивается в направлении совершенствования своих технических средств, создавая последовательно микроэлементы и микромодули и интегральные схемы различного уровня интеграции, являющиеся элементной базой третьего поколения.

В сочетании с миниатюрными элементами автоматики и электротехники средства микроэлектроники на основе методов рационального конструирования и внедрения новых схематических решений обеспечивают успешную реализацию проблемы комплексной миниатюризации устройств судовой автоматики. Наряду с повышением эксплуатационной надежности устройств автоматики комплексная миниатюризация улучшает показатели быстродействия и помехоустойчивости, обеспечивает резкое снижение габарита, массы, энергопотребления

и стоимости, упрощает решение проблемы унификации и стандартизации. Элементная база третьего поколения радиоэлектронных и вычислительных устройств судовой автоматики — интегральные схемы — развивается в двух направлениях.

Первое направление — гибридно-пленочные микросхемы. Характерной особенностью технологии изготовления гибридных микросхем является формирование пассивных электрических элементов схемы и соединений между ними посредством нанесения на изоляционную подложку тонких пленок из различных проводящих материалов. Активные элементы (диоды и транзисторы) в бескорпусном виде подпаиваются к пассивным элементам и соединениям.

Второе направление — полупроводниковые микросхемы. В отличие от гибридной полупроводниковая микросхема имеет все (активные и пассивные) элементы и соединения, выполненные на поверхности или в объеме полупроводниковой подложки.

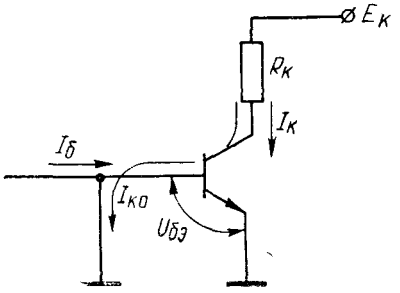


Рис. 33.1. Схема транзистора с общим эмиттером.

В гибридно-пленочном и полупроводниковом исполнении разработано и серийно выпускается значительное количество функционально полных серий (комплексов) интегральных схем, обеспечивающих построение любых дискретных и линейных функциональных устройств систем автоматики.

Серия микросхем представляет собой совокупность функциональных элементов, изготовляемых на одной конструктивно-технологической основе, выполняющих различные функции и имеющих согласованные электрические параметры и другие признаки совместного применения в аппаратуре.

По характеру выполнения электрических функций микросхемы подразделяются на классы (усилители, генераторы, преобразователи, модуляторы, триггеры, логические схемы и т. д.), состоящие из групп (усилители синусоидальные, усилители постоянного тока, видеоусилители, усилители импульсные, повторители и пр.).

По конструкции и расположению внешних выводов, определяющих способ подключения к соединительной печатной плате, микросхемы имеют корпуса: с планарными выводами, расположенными параллельно монтажной плоскости корпуса и подключаемыми к плате внахлест при помощи пайки или сварки; со штырьковыми выводами, расположенными перпендикулярно монтажной плоскости корпуса и подключаемыми, как правило, путем запайки в металлизированных монтажных отверстиях соединительной печатной платы.

Микросхемы различаются также по ряду других электрических и конструктивных признаков: функциональным рядам, классификационным электрическим параметрам, типам, обозначениям, размерным рядам и материалу корпусов; форме и размерам выводов и пр. Классификация по указанным признакам, условные обозначения и перечень различительных признаков на микросхемы устанавливаются нормативно-техническими документами отрасли (нормали, технические условия и стандарты).

Основным активным элементом этих серий микросхем является бескорпусный транзистор типов *p-n-p* или *n-p-n*. Для более четкого представления о работе линейного и логического элементов рассмотрим работу транзистора типа *n-p-n*, собранного по схеме с общим эмиттером (рис. 33.1). При наличии сигнала смещения — тока базы $I_б$ — транзистор открыт. Выходная вольт-амперная характеристика $I_К = f(U_б, I_б)$ имеет вид, представленный на рис. 33.2. При закрытом транзисторе $U_{бэ} = 0$ и $I_К = 0$; $U_К \approx E_К$. Равенство $U_К$ и $E_К$ полностью не выполняется из-за наличия тока обратно смещенного перехода коллектор — база $I_{к0}$. Следовательно, при закрытом транзисторе $I_К = I_{к0}$ и $U_К = E_К - I_{к0}R_К$. Подавая на базу токи $I_б > 0$ и тем самым приоткрывая транзистор, получаем семейство статических характеристик. Динамическая характеристика транзистора опреде-

*ляется по двум точкам* $E_к$ *и* $I_{к\,max}$. *Значение* $I_{к\,max}$ *приближенно определяется* по соотношению

$$I_{к\,max} \approx \frac{E_к}{R_к}. \qquad (33\ 1)$$

Пересечение динамической характеристики с семейством статических характеристик определяет характерные зоны работы транзистора. Зона $OA'$ — насы-

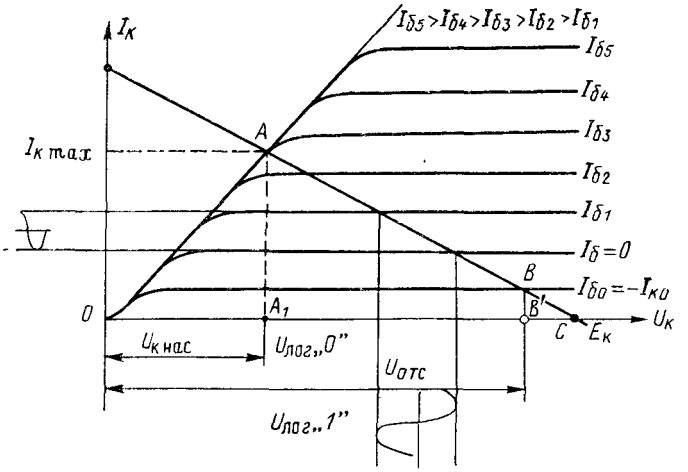



Рис. 33.2. Вольт-амперная характеристика транзистора с об щим эмиттером.

щение, условие нахождения в ней определяется соотношением

$$I_б \geqslant \frac{I_к}{\beta}. \qquad (33.2)$$

Существенным параметром этой зоны является напряжение насыщения коллектора $U_{к\,нас}$, принимаемое за напряжение логического «0» в схемах дискретной автоматики.

Зона $OA$ — линейная рабочая часть характеристики, используемая в схемах аналоговой автоматики. Зона $CC$ — характеристика отсечки ($I_б = -I_{к0}$). Напряжение отсечки $U_{отс} = R_к I_{к0}$ в логических схемах принимается за напряжение логической «1» (зона $OB'$).

## § 34. ЛОГИЧЕСКИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Противоречивые требования, предъявляемые к функциональным устройствам дискретной автоматики, привели к возникновению значительного количества разработок разнообразных типовых логических схем и конструктивно-технологических методов их изготовления. Такой подход обоснован с научно-технических позиций, но совершенно не отвечает требованиям технико-экономической целесообразности и унификации элементной базы. К настоящему времени определились основные схематические варианты построения логических интегральных микросхем (ИМС).

Различные классы радиоэлектронной аппаратуры конструируют с использованием функционально полных и приемлемых для их построения серий логи-

ческих схем. В основу каждой серии положен определенный тип логики, а сама серия оценивается по следующим основным параметрам: задержка распространения сигнала (быстродействие), потребляемая мощность, помехоустойчивость, коэффициенты объединения по входу и разветвления по выходу, рабочий диапазон температур, работоспособность в условиях механических, климатических и радиационных воздействий.

В зависимости от предпочтительности параметров определяется тип логики и состав серии интегральных схем. Каждая серия интегральных схем должна быть функционально полной (см. § 3), чтобы на ее основе можно было создать любое логическое устройство автоматики. Наибольшее распространение получили логические схемы следующих типов: диодно-транзисторной логики (ДТЛ); транзи-

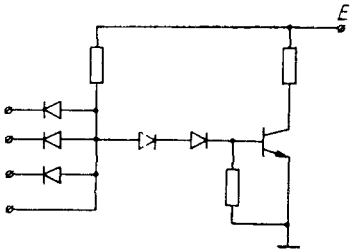



Рис. 34 1. Схема логического элемента диодно-транзисторной логики И-НЕ/ИЛИ-НЕ.

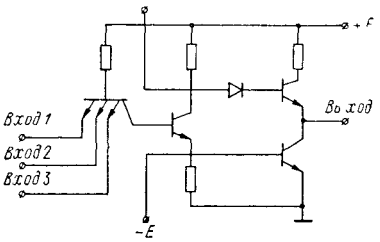



Рис. 34.2. Схема транзисторно-транзисторной логики И-НЕ/ИЛИ-НЕ.

сторно-транзисторной логики (ТТЛ); транзисторные логические схемы с непосредственными связями (ТЛНС); логические схемы переключения тока (ЛСПТ). Каждый из перечисленных типов логических схем обладает характерными особенностями.

Схема диодно-транзисторной логики (ДТЛ) разработана в целях решения проблемы, связанной с неравномерным распределением базовых токов в каскадах транзисторов, подключенных к выходу. В схемах ДТЛ (рис. 34.1) ток в базу каждого транзистора подается отдельным источником тока. Входы развязаны входными диодами. Нагрузочный множитель по выходу ограничивается способностью транзистора, находящегося в открытом состоянии, пропускать максимальные токи нагружающих каскадов, оставаясь в состоянии насыщения. Напряжение сигналов «0» и «1» определяется падением напряжения на переходах диода и транзистора и не зависит от сопротивления резистора и напряжения источника питания. Основным недостатком схем ДТЛ является медленное рассасывание заряда, накопленного в транзисторе, через базу, когда диоды связи в процессе запирания первоначально открытого транзистора срабатывают слишком быстро. Главным достоинством данных схем является хорошее сочетание основных параметров, приведенных в табл. 34.1. К элементам ДТЛ относятся серии 105, 121, 125, 152, 202, 203, 217 и др. Все они получили распространение благодаря повышенной помехоустойчивости и среднему быстродействию.

Схема транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ) образуется путем замены в вентиле ДТЛ группы входных диодов (вместе с первым диодом связи) на многоэмиттерный транзистор. Такая замена уменьшает емкостную нагрузку и, как результат, увеличивает быстродействие. В схемах ТТЛ (рис. 34.2) предусматривается выходная цепь с низким сопротивлением, благодаря чему для базового тока создается низкоомный путь, необходимый при работе на высокой частоте. Чтобы ток заряда емкостной нагрузки в равной мере обеспечивался как в момент включения, так и в момент выключения схемы, на ее выход обычно включают двухэтажный каскад. К недостаткам схем ТТЛ (по сравнению с ДТЛ) можно отнести несколько меньший коэффициент объединения по входу, обусловленный ограниченным числом эмиттеров входного транзистора.

*Таблица 34.1*

**Основные параметры различных типов логических интегральных схем**

| Тип логики | Задержка распространения сигнала, нс | Потребляемая мощность, мВт | Нагрузочная способность | Помехоустойчивость, В |
|---|---|---|---|---|
| ДТЛ | 8—50 | 10—30 | 6—16 | 0,2—0,8 |
| ТТЛ | 6—60 | 5—35 | 10—30 | 0,3—0,8 |
| ТЛНС | 200—400 | 0,9—17 | 4—8 | 0,15—0,35 |
| ЛСПТ | 5—10 | 30—70 | 10—15 (100) * | 0,15—0,2 |

* — для схем триггеров с раздельным запуском и схем ЗИЛИ серии 137.

В последние годы выпуск схем ТТЛ значительно увеличивается. К группе схем ТТЛ относятся серии интегральных схем 106, 130, 133, 134, 136 и другие, являющиеся в настоящее время наиболее перспективными.

Транзисторные логические схемы с непосредственными связями (ТЛНС) имеют две модификации, отличающиеся друг от друга наличием во входных базовых цепях резисторов (РТЛ) или резистивно-емкостных (РСТЛ) контуров

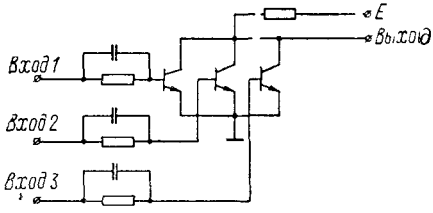



Рис. 34 3. Схема логического элемента транзисторной логики с резистивно-емкостными связями.

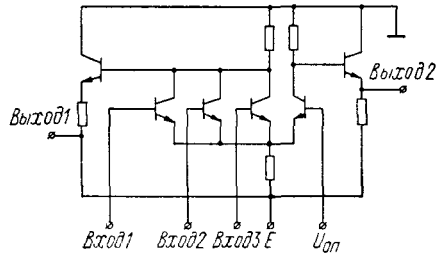



Рис.34.4. Схема логического элемента, работающего на принципе переключения тока (ЛСПТ).

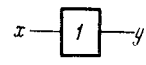
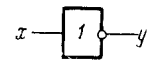
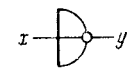
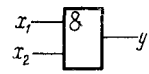
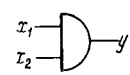
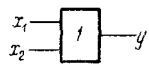
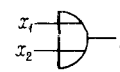
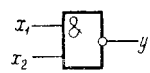
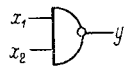
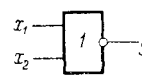
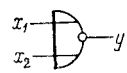
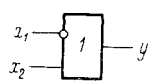
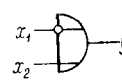
(рис. 34.3). Схемы РТЛ являются основой для разработок микромощных логических устройств дискретной автоматики. К их недостаткам следует отнести небольшую нагрузочную способность и низкие показатели помехоустойчивости.

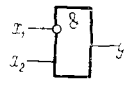
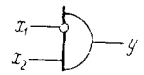
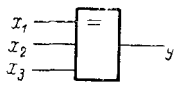
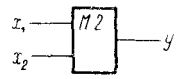
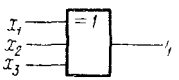
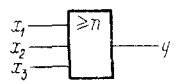
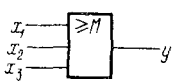
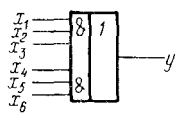
Логические схемы переключения тока (ЛСПТ) предназначены для применения в быстродействующих устройствах ЦВМ и дискретной автоматики. Существенной особенностью этих схем является ограниченный перепад уровней сигналов, поскольку режим работы этих схем таков, что они не заходят ни в область насыщения, ни в область отсечки. В исходную схему ЛСПТ (рис. 34.4) входят дифференциальный усилитель и генератор тока. К недостаткам этих схем следует отнести высокую потребляемую мощность, сравнительно низкую помехоустойчивость и ограниченный диапазон рабочих температур (0—70° С вместо —60÷+125° С для всех остальных типов схем на кремниевом кристалле). Ограничением в применении схем ЛСПТ служит их несовместимость со всеми типами логических схем, в которых транзисторы работают с насыщением. К числу схем ЛСПТ относятся элементы серий 137, 139 и 223.

Основой логических схемотехнических построений устройств дискретной автоматики является функциональный узел — инвертор, выполняющий логические функции И-НЕ, ИЛИ-НЕ, И-ИЛИ-НЕ и различные комбинации с расширением логики на входе (табл. 34.2) путем подключения логических диодных расширите-

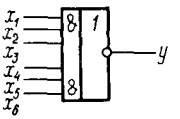
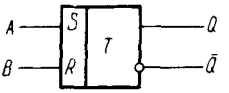
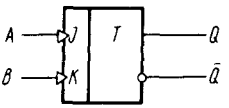
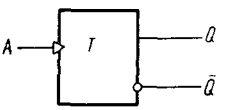
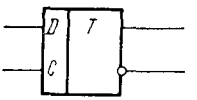
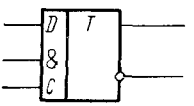
*Таблица 34 2*

**Обозначения элементов, реализующих логические функции**

| Элемент | Реализуемая функция | Таблица истинности | Обозначение | |
|---|---|---|---|---|
| | | | форма 1 (новая) | форма 2 (старая) |
| Повторитель | Повторение $y = x$ | $x$ $y$<br>0 0<br>1 1 |  | |
| Инвертор (НЕ) | Отрицание (инверсия) $y = \overline{x}$ | $x$ $y$<br>0 1<br>1 0 |  |  |
| Конъюнктор И | Конъюнкция $y = x_1 x_2$ | $x_1$ $x_2$ $y$<br>0 0 0<br>0 1 0<br>1 0 0<br>1 1 1 |  |  |
| Дизъюнктор ИЛИ | Дизъюнкция $y = x_1 + x_2$ | $x_1$ $x_2$ $y$<br>0 0 0<br>0 1 1<br>1 0 1<br>1 1 1 |  |  |
| Элемент Шеффера (И-НЕ) | Отрицание конъюнкции (штрих Шеффера) $y = \overline{x_1 x_2}$ | $x_1$ $x_2$ $y$<br>0 0 1<br>0 1 1<br>1 0 1<br>1 1 0 |  |  |
| Элемент Пирса (ИЛИ НЕ) | Отрицание дизъюнкции (стрелка Пирса) $y = \overline{x_1 + x_2}$ | $x_1$ $x_2$ $y$<br>0 0 1<br>0 1 0<br>1 0 0<br>1 1 0 |  |  |
| Импликатор | Импликация $y = x_1 \to x_2 = \overline{x_1} + x_2$ | $x_1$ $x_2$ $y$<br>0 0 1<br>0 1 1<br>1 0 0<br>1 1 1 |  |  |

| Элемент | Реализуемая функция | Таблица истинности | Обозначение | |
|---|---|---|---|---|
| | | | форма 1 (новая) | форма 2 (старая) |
| Запрет | Запрет<br>$y = \bar{x}_1 x_2$ | $x_1$ $x_2$ $y$<br>0 0 0<br>1 0 1<br>1 0 0<br>1 1 0 |  |  |
| Эквивалентность | Эквивалентность<br>$y = x_1 \equiv x_2$ | $x_1$ $x_2$ $y$<br>0 0 1<br>0 1 0<br>1 0 0<br>1 1 1 |  | |
| Сложение по модулю 2 | Сложение по модулю<br>$y = x_1 + x_2$ | $x_1$ $x_2$ $y$<br>0 0 0<br>0 1 1<br>1 0 1<br>1 1 0 |  | |
| Исключающее ИЛИ | Исключающее ИЛИ | |  | |
| Элемент пороговый | Пороговая функция: $n$ — минимальное число входов, при возбуждении которых функция принимает значение «1» | |  | |
| Элемент мажоритарный | Мажоритарность. Число входов должно быть нечетным | |  | |
| И ИЛИ | Дизъюнктивная нормальная форма<br>$y = x_1x_2x_3 + x_4x_5x_6x_7$ | |  | |

*Продолжение табл. 34.2*

| Элемент | Реализуемая функция | Таблица истинности | Обозначение: форма 1 (новая) | Обозначение: форма 2 (старая) |
|---|---|---|---|---|
| И-ИЛИ-НЕ | $y = \overline{x_1x_2x_3 + x_4x_5x_6x_7}$ | |  | |
| RS-триггер с прямыми входами | | $A$ $B$ $Q$<br>0 0 $Q$<br>0 1 0<br>1 0 1<br>1 1 н/о |  | |
| J-k-триггер | | $A$ $B$ $Q$<br>0 0 $Q$<br>0 1 0<br>1 1 $\bar{Q}$ |  | |
| T-триггер (со счетным входом) | | $A$ $Q$<br>0 $Q$<br>1 $\bar{Q}$ |  | |
| D-триггер | | |  | |
| DV-триггер (управляющие входы связаны по И) | | |  | |

лей по И (ИЛИ). Логическим функциональным узлом (элементом) условимся считать устройство, описываемое какой-либо простой булевой функцией.

Логическим устройством (схемой) будем называть совокупность логических функциональных узлов, соединенных между собой так, что выполняется заданный закон функционирования. Задача создания сложных логических устройств (схем, цепей, структур) эквивалентна математической задаче представления сложных булевых функций простыми функциями, описывающими работу элементов (см. § 33). Одной из практических задач синтеза является выбор серии элементов, из которых должны компоноваться логические устройства. Набор элементов серии должен обеспечивать построение любой сколь угодно сложной структуры, т. е. представлять функционально полную систему операций. В качестве примера рассмотрим работу схемы двухвходового инвертора диодно-транзисторной логики, представленной на рис. 34.5.

Логическая операция И реализуется на диодах $Д_1$ и $Д_2$ и характеризуется таблицей истинности (табл. 34.3).

Сигнал с выхода схемы И поступает на два последовательно соединенных диода $Д_3$, $Д_4$, суммарная вольт-амперная характеристика которых имеет вид,

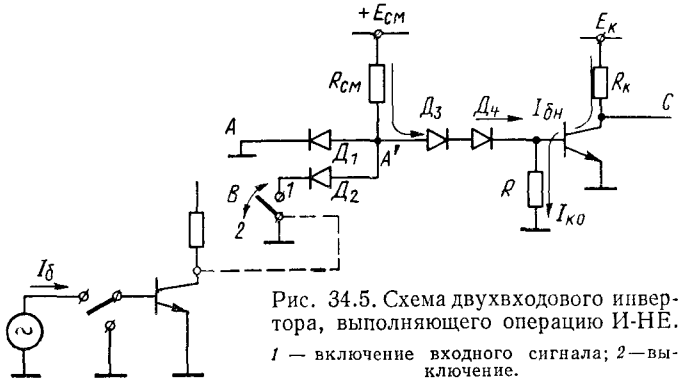



Рис. 34.5. Схема двухвходового инвертора, выполняющего операцию И-НЕ.

*1* — включение входного сигнала; *2*—выключение.

представленный на рис. 34.6. Эти диоды обеспечивают смещение уровня потенциала точки $A'$ (рис. 34.5) и создают запас помехоустойчивости логической схемы. Переключательная булевая функция выходного сигнала имеет вид

$$C = \overline{AB} = \overline{A} + \overline{B}. \qquad (34.1)$$

Тогда полная таблица истинности логической схемы И-НЕ для двухвходовой схемы имеет вид, представленный в табл. 34.4.

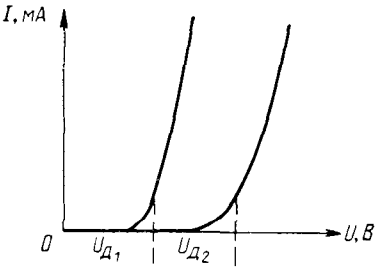



Рис. 34.6. Вольт-амперная характеристика двух последовательно соединенных диодов.

Рассмотрим работу логического элемента, выполняющего функцию И-ИЛИ-НЕ. Электрическая схема такого элемента приведена на рис. 34.7. Схемы, реализованные на парах диодов $Д_1Д_2$ и $Д_3Д_4$, выполняют операции И. Операция ИЛИ выполняется на диодах $Д_5Д_6$. Если на точках *1* и *2* имеем логические «1», то в точке *3* будет также логическая «1». Сигнал, пройдя через инвертор, в точке *4*

*Таблица 34.3*

| Вход А | Вход В | Выход И |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

*Таблица 34.4*

| Вход А | Вход В | Выход И | Выход И-НЕ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |

*Таблица 34.5*

| Выход *1* (И) | Выход *2* (И) | Выход *3* (ИЛИ) | Выход *4* (НЕ) |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |

дает логический «0». Общая таблица истинности для схемы И-ИЛИ-НЕ будет иметь вид, представленный в табл. 34.5.

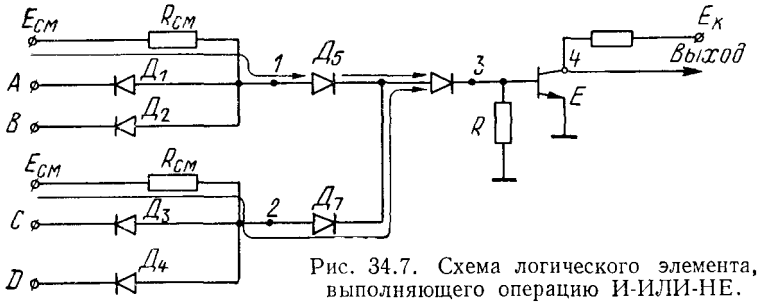



Рис. 34.7. Схема логического элемента, выполняющего операцию И-ИЛИ-НЕ.

Переключательная функция выходного сигнала имеет вид

$$E = \overline{AB} \dotplus \overline{СД} = \overline{AB} \times \overline{СД} = (\overline{A} + \overline{B})(\overline{C} + \overline{Д}). \qquad (34.2)$$

В логических построениях дискретной автоматики широко используются триггерные элементы. В качестве примера рассмотрим схему триггера со счетным

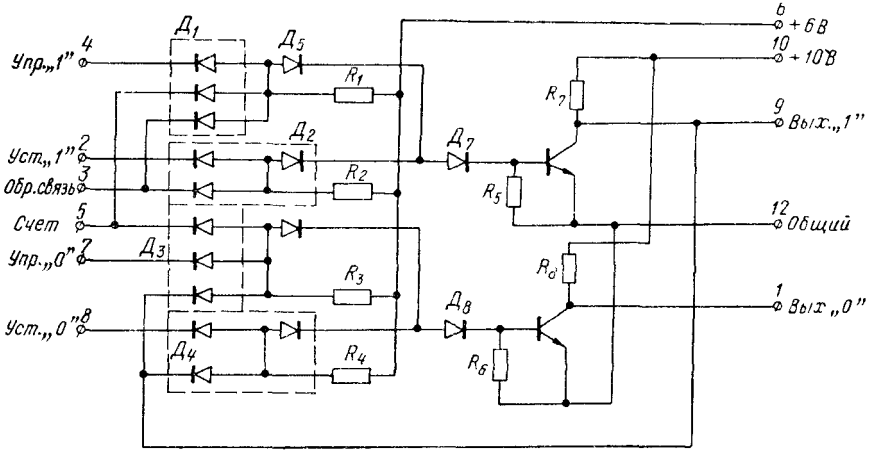



Рис. 34.8. Электрическая схема триггера со счетным входом.

входом (типа J-K). Такие элементы выполняют функцию запоминания двоичной информации. Электрическая схема триггера представлена на рис. 34.8, его прин-

ципиальная блок-схема — на рис. 34.9. Условно примем, что на выходе инвертора *7* (*9*) — логическая «1», а на выходе *8* (*1*) соответственно логический «0». Тогда при подаче счетных импульсов на вход «Счет» (5) схема работает следующим образом. Импульс положительной полярности с амплитудой, соответствующей логической «1», поступает на *1* и *3* ячейки И. На выходе ячейки *1* сигнал приобретает значение логического «0». Это преобразование обусловлено поступлением с входа «Упр.» «1» (*4*) логической «1», а по цепи обратной связи — логического «0». *На выходе ячейки 3 соответственно возникает сигнал логической «1». На выходе* ячейки *2* возникает логический «0», что обусловлено поступлением по цепи обратной связи сигнала логического «0» и на вход «Уст.» «1» (*2*) сигнала логической «1». На выходе ячейки *4* возникает соответственно сигнал логической «1». Согласно таблице истинности на выходах ячеек *5* и *6* (после инвертирования) возникают сигналы логической «1» и логического «0» соответственно.

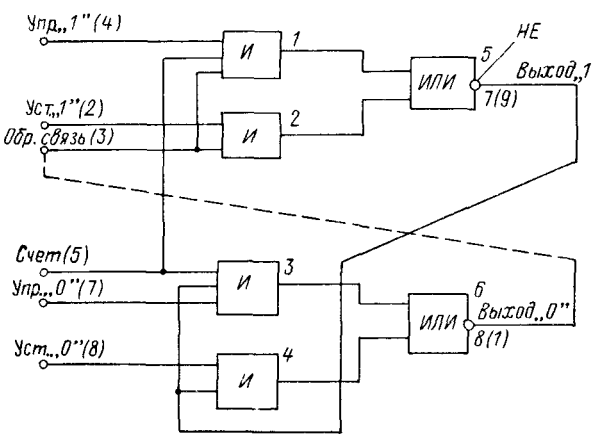



Рис. 34.9. Блок-схема триггера со счетным входом.

**Логические интегральные микросхемы гибридного исполнения серий 217 и 202 ДТЛ.** *Из значительного числа гибридных интегральных* микросхем типа ДТЛ наибольшее распространение получили функционально полные серии 217 и 202.

Все рассмотренные выше варианты логических построений, выполняющих функции И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ и другие, относятся к типовым функциональным узлам ДТЛ. Принципы их построения и работа конкретных схем, таблицы истинности, методы согласования и компоновки более сложных функциональных модулей ЦВМ и устройств дискретной автоматики независимо от комплекса интегральных микросхем и технологии их производства остаются общими не только для схем ДТЛ, но также и для схем ТТЛ и их различных модификаций. Эта особенность всех видов и типов интегральных схем позволяет при рассмотрении многочисленных комплексов не повторять общие положения логических построений и оттенять только характерные особенности.

*Комплекс логических интегральных микросхем серии 217* («Посол»). Полный состав функциональных элементов серии и основные электрические параметры микросхем приведены в табл. 34.6.

Принципиальная электрическая схема основного логического элемента серии 217 — двухвходового инвертора 2ЛБ171, выполняющего логическую функцию *И-НЕ*, была приведена на рис. 34.5. На рис. 34.7 была представлена схема инвертора, выполняющего операцию И-ИЛИ-НЕ с раздельными выходами: мощным выходом на базе эмиттерного повторителя и обычным выходом на базе элементарного усилителя. Схемы одного из основных логических счетных элементов серии — триггер со счетным входом типа 2ТК171 — имеют вид, представленный на рис. 34.8 и 34.9. Описание работы этих элементов приведены выше.

**Основные технические параметры микросхем ДТЛ серии 217 («Посол»)**

*Таблица 34.6*

| Условное обозначение | Реализуемая логическая функция (назначение) | Напряжение питания, В ± 10% | Потребляемая мощность (не более), мВт | Выходное напряжение логической «1» (не менее), В | Выходное напряжение логического «0» (не более), В | Время задержки распространения сигнала, нс | Помехоустойчивость (не более), В | Коэффициент объединения по входу (не более) | Коэффициент разветвления по выходу (не более) | Частота работы, МГц |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2ЛБ171 | Логическая схема И-НЕ | +6 | 20,3 | 2,6 | 0,3 | 23,5 | 0,5 | 8 | 4—6 | — |
| 2ЛБ172 | Две логических схемы И-НЕ | +6 | 40,6 | 2,6 | 0,3 | 23,5 | 0,5 | 3 | 4—6 | — |
| 2ЛБ173 | Логическая схема И-НЕ с повышенной нагрузочной способностью | +3 | 40 | 2,6 | 0,3 | 27,5 | 0,5 | 6 | 8 | — |
| 2ЛБ174 | | | | | | | | | | |
| 2НТ171 | Транзисторная матрица | $\alpha_1 = 15 \div 17$ | $I_к \leqslant 20$ мА; $k_v = 16 \div 280$; $I_{к0} \leqslant 1$ мкА | | | | | | | |
| 2НТ172 | То же | $\alpha_2 = 50 \div 150$ | | | | | | | | |
| 2НТ173 | » | $\alpha_3 = 70 \div 280$ | | | | | | | | |
| 2ЛП171 | Двойной расширитель | +6 | 16,5 | — | — | 6 | — | — | — | — |
| 2ЛП172 | Расширитель | +6 | 9 | — | — | — | — | — | — | — |
| 2ЛП173 | Диодная сборка (двойная) | — | $U_{обр} = 4$ В; $I_{обр} \leqslant 1$ мкА; $I_{пр} = 1$ мА | | | | | | | |
| 2ЛР171 | Низкочастотная логическая схема И-ИЛИ-НЕ | +6 | 37 | 2,6 | 0,3 | 30—100 | 0,5 | 8 | 8 | — |
| 2ТК171 | Триггер со счетным и раздельным входами | +3 | 60 | 2,6 | 0,3 | — | 0,5 | — | 4 | 3—5 |
| 2ТР171 | Триггер с раздельными входами | +3 | 40 | 2,6 | 0,3 | — | 0,5 | — | 2—6 | 6 |

По освоенности технологии серийного производства и массовости внедрения в системы судовой и промышленной автоматики функционально полная серия диодно-транзисторной логики 217 занимает одно из ведущих мест по сравнению с другими сериями, выполненными на основе гибридно-пленочной технологии. Существенным недостатком серии является наличие двух видов питания (+6 и +3 В) и нестандартный шаг выводов (3 мм), что не позволяет размещать микросхемы на стандартных соединительных платах с шагом координатной сетки 1,25 и 2,5 мм. Микросхемы размещаются в прямоугольном металлостеклянном корпусе 2МС13-1 с жесткими выводами вниз («Посол»).

Логические интегральные микросхемы серии 202 («Тропа-3»). Функционально полная серия микросхем 202 содержит логиче-

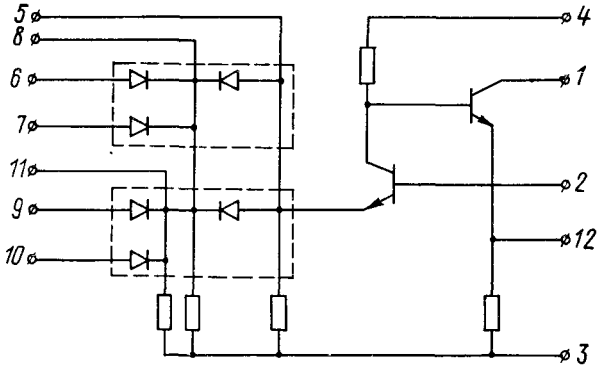



Рис. 34.10. Схема логического элемента 2ЛСО21.

ские построения, выполняющие функции И-ИЛИ, НЕ, диодные матрицы, усилители мощности и диодные сборки. На основе серии 202 проектируются малогабаритные ЦВМ и устройства дискретной автоматики. Серия широко применяется в устройствах обработки радиолокационной информации. Состав серии и основные электрические параметры интегральных микросхем приведены в табл. 34.7. Как и у серии 217, элементы серии 202 выполнены по гибридно-пленочной технологии и размещаются в прямоугольном металлополимерном корпусе 2МП12-1 («Тропа») с 12 штырьковыми выводами вниз. Шаг выводов нестандартный — 3 мм. По внешнему виду корпус мало чем отличается от корпуса «Посол» (окрашен в синий цвет). Серия 202 является потенциальной системой микросхем с двухступенчатой ДТЛ, работающих от входных сигналов отрицательной полярности. Вся серия выполнена на единой конструктивно-технологической основе «Тропа» с использованием транзисторов 2Т319 и кремниевых планарных диодных матриц типа КД901. Основными логическими элементами этой серии являются микросхемы типов 2ЛСО21—2ЛСО28, реализующие логические построения И-ИЛИ.

Микросхема 2ЛСО21 (рис. 34.10) содержит две двухвходовые схемы И, выполненные на диодных матрицах КД901В и объединенные схемой ИЛИ, и усилитель. В целях расширения логических возможностей микросхемы на входах в схемах И и ИЛИ можно подключать к вспомогательным контактам микросхемы (*5*, *8*, *11*) дополнительные диодные сборки. Микросхемы 2ЛСО23 и 2ЛСО24 содержат одинаковые функциональные узлы И-ИЛИ, отличающиеся друг от друга только коэффициентом разветвления по выходу (*3* и *5* соответственно).

Микросхемы 2ЛСО25 и 2ЛСО26 содержат дополнительные диодные схемы в выходном каскаде усилителя, расширяющие логические возможности. Оба типа используются в логических построениях дискретной автоматики только совместно с микросхемами 2ЛСО21—2ЛСО24 и 2ЛСО27—2ЛСО28. Микросхемы 2ЛСО27—2ЛСО28 по логической структуре полностью соответствуют микросхемам 2ЛСО21, но обладают повышенным быстродействием.

*Таблица 34.7*

**Основные электрические параметры микросхем ДТЛ серий 202, 121, 152 (156)**

| Тип микросхем | Выполняемая логическая функция (назначение) | Напряжение питания, В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение выходного сигнала, В | | Коэффициент разветвления по выходу (не более) | Коэффициент объединения по входу | Время задержки (не более), нс | Напряжение помехи (не более), В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Логика «1» | Логика «0» | | | | |
| | | | Серия 202 («Тропа-3») | | | | | | |
| 2ЛС021-22 | 2 (2И)-ИЛИ | ±4 | 22 | —1,35 | —0,33 | 3 (5) | 8 | 250 | 0,3 |
| 2ЛС023-24 | 2 (2И-ИЛИ) | ±4; —0,25 | 30 | —1,35 | —0,33 | 3 (5) | 8 | 250 | 0,3 |
| 2ЛН021-22 | 2НЕ | ±4; —0,25 | 32 | —1,35 | —0,33 | 3 (5) | 8 | 250 | 0,3 |
| 2УИ021 | Усилитель мощности | ±4; —0,25 | 48 | —1,35 | —0,33 | 15 | 8 | 250 | 0,3 |
| 2ЛС025 | 3 (2И-ИЛИ) | —4 | 23 | —1,35 | —0,33 | 3 | 8 | 250 | 0,3 |
| 2ЛС026 | 2 (3И-ИЛИ) | —4 | 16 | —1,35 | —0,33 | 5 | 8 | 250 | 0,3 |
| 2ЛС027-28 | 2 (2И-ИЛИ) | ±4; —0,25 | 21 | —1,35 | —0,33 | 3 (5) | 8 | 250 | 0,3 |
| 2НД021<br>2НД022 | Диодная матрица | $I_{обр} \leqslant 0{,}5$ мкА; $U_{обр} \leqslant 10$ В; $I_{пр} = 1$ мА. Время восстановления обратного сопротивления — не более 20 нс | | | | | | | |
| | | | Серия 121 («Логика») | | | | | | |
| 1ЛБ211А | И-НЕ (ИЛИ-НЕ) | 5 (3) | 12 | 2,5 | 0,35 | 12 | ≥ 6 | 35 | 0,9 |
| 1ЛБ211Б | | | 12 | | 0,35 | 10 | | 35 | |
| 1ЛБ211В | | | 12 | | 0,35 | 8 | | 35 | |
| 1ЛБ211Г | | | 12 | | 0,35 | 5 | | 35 | |
| 1ЛБ212А | | | 19 | | 0,40 | 20 | | 50 | |
| 1ЛБ212Б | | | 19 | | 0,40 | 16 | | 50 | |
| 1ЛП211 | Логический расширитель | Падение напряжения на диоде 0,85 В; $I_{обр} = 1{,}5$ мкА. Время рассасывания 5 нс | | | | | | | |

Серии 152 и 156 («Логика-1»)

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1ЛБ521А<br>1ЛБ561А<br>1ЛБ521Б<br>1ЛБ561Б<br>1ЛБ521В<br>1ЛБ561В | Шестивходовая схема И-НЕ с расширением по И | +3±10%<br>+5±10% | 23 | 2,5 | 0,3 | 6<br>4<br>2 | 10 | 30—60 | 0,4 |
| 1ЛБ522<br>1ЛБ562 | То же, с повышенной нагрузочной способностью | +5±10% | 34 | 2,5 | 0,3 | 16 | 10 | 30—60 | 0,4 |
| 1ЛБ523А<br>1ЛБ563А<br>1ЛБ523Б<br>1ЛБ563Б<br>1ЛБ523В<br>1ЛБ563В | Две трехвходовые (две четырехвходовые) схемы И-НЕ | +3±10%<br>+5±10% | 23 | 2,5 | 0,3 | 6<br>4<br>2 | 4 | 30—60 | 0,4 |
| 1ЛБ524А<br>1ЛБ564А<br>1ЛБ524Б<br>1ЛБ564Б<br>1ЛБ524В<br>1ЛБ564В | Два трехвходовых (два четырехвходовых) расширителя по ИЛИ | +3±10%<br>+5±10% | 23 | 2,5 | 0,3 | 6<br>4<br>2 | 4 | 30—60 | 0,4 |
| 1ЛП521А<br>1ЛП561А<br>1ЛП521Б<br>1ЛП561Б | Три двухвходовых (четыре двухвходовых) расширителя по И (диодная сборка) | $U_{обр} = 5$ В; $I_{обр} \leqslant 5$ мкА; $I_{пр} \leqslant 1{,}5$ мА. Емкость диода $\leqslant 2{,}2$ пФ | | | | | | | |

Все микросхемы серии 202 имеют две модификации А и Б, отличающиеся между собой по коэффициенту разветвления на выходе (*3* и *5* соответственно).

При построении логических устройств дискретной автоматики (генераторы импульсов, задержки сигналов и т. п.) могут широко использоваться дополнительные интегральные схемы, содержащие сборки диодов и транзисторов типов 2Т319 (А, Б, В) и КД901 (А, В).

**Логические полупроводниковые интегральные схемы серий 121 («Логика»), 152 и 156 («Логика-1»).** В основу разработки серий 121, 152 и 156 диодно-транзисторных логических микросхем на полупроводниковой основе (кристалл кремния) положен планарно-эпитаксиальный метод с изоляцией компонентов схемы обратно смещенными переходами *p-n*.

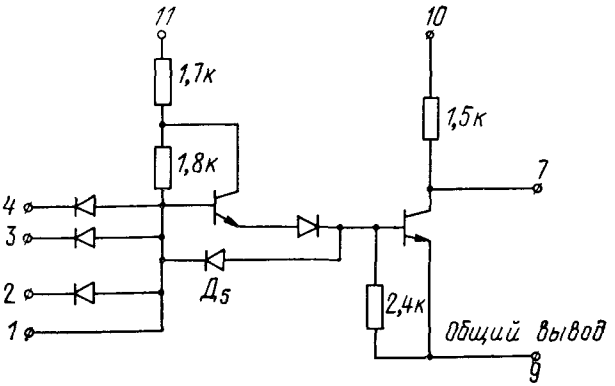



Рис. 34.11. Основной логический элемент серии 121 (1ЛБ211).

Серийное изготовление и широкое применение микросхем серий 121, 152 и 156 обусловлено большой универсальностью их применения и относительно низкой стоимостью. В отличие от других серий логических схем, применяющихся в основном для логических устройств ЦВМ, схемы ДТЛ широко используются и в схемах дискретной автоматики. Интегральные микросхемы данных серий характеризуются средней рассеиваемой мощностью 15 мВт и средним быстродействием 50 нс. Состав серий и электрические параметры микросхем приведены в табл. 34.7.

Основной элемент серии 121 (1ЛБ211), выполняющий логическую функцию И-НЕ для положительных сигналов, построен на основе модифицированной диодно-транзисторной логики, что обеспечивает надежное переключение при отрицательных температурах. Диод $Д_5$ (рис. 34.11) находится под обратным напряжением смещения и обеспечивает рассасывание заряда при выключении выходного транзистора. Это особенно важно при высоких температурах, когда время рассасывания возрастает. Микросхемы типа 1ЛБ211 выпускаются в модификациях А, Б, В, Г, отличающихся между собой только коэффициентом разветвления по выходу. Серия 121 содержит микросхему 1ЛБ212 в модификациях А и Б, обладающую повышенной нагрузочной способностью (допускается подключение к выходу до 16 входов схем данной серии). Микросхемы серии выпускаются в круглых (401МС12-1) и плоских металлостеклянных корпусах (101СТ14-1).

Серии 152 и 156 интегральных микросхем отличаются между собой только типом корпуса (401МС12-1 и 101СТ14-1 соответственно). В состав серий входят пять логических элементов, технические параметры и условные обозначения которых приведены в табл. 34.7. Шестивходовой логический элемент 1ЛБ521 (в модификациях А, Б, В) выполняет логическую функцию И-НЕ и является основным логическим элементом серии. На рис. 34.12 приведена его электрическая схема. Вывод *8* схемы служит для подключения дополнительных диодов и увеличения

числа диодных входов. Отдельный вывод от сопротивления нагрузки позволяет обеспечивать объединение выходов аналогичных микросхем в целях увеличения быстродействия логического устройства, выполняющего функцию И-ИЛИ-НЕ.

Микросхемы 1ЛБ523 и 1ЛБ524 (каждая из которых представляет схемное объединение двух четырехвходовых логических элементов, выполняющих функцию И-НЕ) за счет внешних связей могут составить функциональную схему триггера. В серийном производстве микросхемы этих типов выпускаются в трех модификациях (А, Б, В), отличающихся между собой только коэффициентом разветвления по выходу (*6*, *4* и *2* соответственно). В состав обеих серий входят также шестивходовые логические элементы И-НЕ с мощным выходом (1ЛБ522 и 1ЛБ562), которые могут управлять 16 входами микросхем данных серий.

**Логические интегральные полупроводниковые микросхемы серий 106 и 134 ТТЛ.** Микросхемы серии 106 разработаны на основе логики типа ТТЛ, и их серийный выпуск стал возможен благодаря совершенствованию технологических процессов (например, повышение точности процесса фотолитографии), а также вследствие учета требований соединения микросхем с помощью многослойных печатных плат и минимизации площади, занимаемой микросхемой на поверхности кремниевой полупроводниковой подложки. В настоящее время принято считать микросхемы ТТЛ наиболее перспективной элементной базой для создания микросхем среднего и высокого уровня интеграции (от 100 до 1000 компонентов на корпус), построенных на основе биполярных транзисторов.

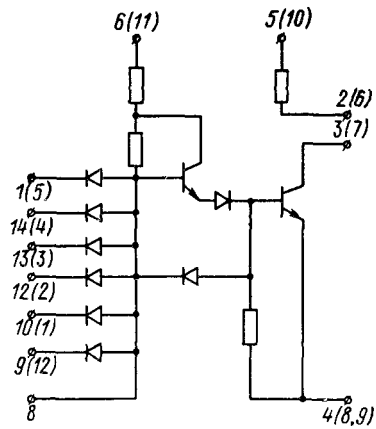



Рис. 34.12. Основной логический элемент серий 152 и 156 (1ЛБ521 и 1ЛБ561).

Разработка микросхем ТТЛ (см. рис. 34.2) реализует особенности технологии монолитных элементных структур. Для уменьшения влияния емкостной нагрузки в схеме ТТЛ выходная цепь инвертора (в которой осуществляются логические операции ИЛИ, И) выполнена достаточно низкоомной путем замены в вентиле типа ДТЛ (рис. 34.1) группы входных диодов вместе с первым диодом связи на многоэмиттерный транзистор *n-p-n*. В целях быстрого рассасывания заряда неосновных носителей, накопленного в базе входного многоэмиттерного транзистора при его насыщении, инвертор основного логического элемента ТТЛ делают достаточно мощным, чем и обеспечивается его нормальная работа на низкоомный вход ячейки ТТЛ.

Схемотехнические и технологические особенности производства схем ТТЛ позволяют создавать три базовые модификации микросхем, отличающиеся друг от друга задержкой распространения логического сигнала и потребляемой мощностью. Сравнительные показатели модификаций приведены в табл. 34.8. Модификации схем ТТЛ имеют схемные и топологические различия, но выходные логические характеристики совпадают полностью, что позволяет использовать микросхемы различных модификаций в едином функциональном устройстве.

Серия 106 логических микросхем типа ТТЛ («Таран») содержит 26 типов функциональных узлов, составляющих функционально полный потенциальный комплекс, реализующий построение любых логических устройств ЦВМ и дискретной автоматики. Кристаллы микросхем расположены в миниатюрных металлостеклянных плоских корпусах с 14 планарными выводами типа 101 СТ14-1. В основу комплекса положена логическая микросхема, реализующая функцию И-НЕ/ИЛИ-НЕ с возможностью расширения по ИЛИ путем подсоединения логических схем И-ИЛИ. Номенклатура микросхем серии 106 и их основные электрические параметры приведены в табл. 34.9.

*Таблица 34.8*

**Сравнительные данные модификаций микросхем ТТЛ**

| Модификация микросхем ТТЛ | Задержка распространения логического сигнала, нс | Потребляемая мощность, мВт |
|---|---|---|
| Пониженной мощности, пониженного быстродействия, повышенной помехоустойчивости | 40—60 | 1—10 |
| Среднего быстродействия, средней потребляемой мощности | 15—40 | 10—30 |
| Повышенного быстродействия и повышенной мощности | 6—15 | ≥30 |

В зависимости от принципиальной электрической схемы, назначения, числа входов на схему И и рассеиваемой мощности микросхемы подразделяются на 6 групп: 1ЛБО31 (*2, 3, 4*); 1ЛБО35 (*6—15*), 1ЛРО31 (*2, 3, 4*), 1ЛПО31 (*2, 3, 4*); 1ЛПО65 (*6, 7, 8*) и 1ТРО61 (*2, 3, 4*). Основными логическими элементами серии являются первая, вторая, третья и шестая группы микросхем, реализующих логическую функцию И-НЕ. Для образования схемы И-ИЛИ-НЕ каждый инвертор имеет два вывода, которые соединяются с соответствующими выводами микросхем четвертой и пятой групп. Микросхемы четвертой и пятой групп самостоятельного применения не имеют. Их основным назначением является увеличение числа входов ИЛИ основных групп элементов. Микросхемы второй группы реализуют логическую функцию И-ИЛИ-НЕ. Электрическая схема типовых логических элементов первой группы 1ЛБО61—1ЛБО64 представлена на рис. 34.13.

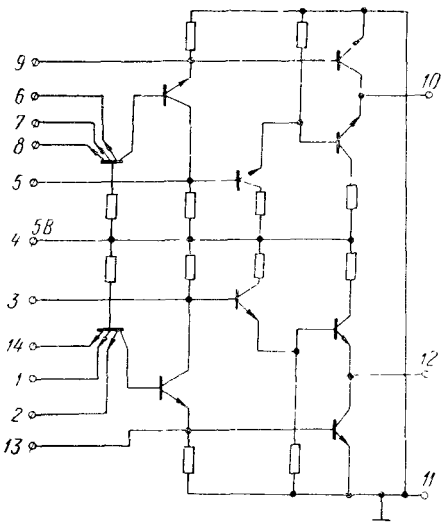



Рис. 34.13. Электрическая схема логических элементов 1ЛБО61—1ЛБО64.

Серия 134 логических микросхем типа ТТЛ («Тур»), как серия 106, является функционально полной. Незначительное потребление мощности и среднее быстродействие (задержка распространения сигнала не превышает 100 нс) позволяют на основе серии 134 интегральных микросхем создавать логические устройства автономного типа с питанием от аккумуляторных батарей небольшой мощности и сверхминиатюрные маломощные логические устройства судовой дискретной автоматики. Элементы серии 134 конструктивно и схемно совместимы с элементами серии 106 и не требуют при этом согласования уровней сигналов и напряжений источников питания. Основные электрические параметры логических элементов серии приведены в табл. 34.9. В настоящее время серия 134 развивается по номенклатуре элементов и совершенствуется по технологии изготовления.

**Логические интегральные полупроводниковые микросхемы типа ТТЛ серий 133 («Логика-2»), 130 («Индекс») и 136 («Изумруд»).** Микросхемы се-

*Таблица 34.9*

**Основные электрические параметры микросхем серий 106 («Таран») и 134 («Тур»)**

| Тип микросхем | Выполняемая логическая функция | Напряжение питания, В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение выходного сигнала, В | | Коэффициент разветвления (не более) | Коэффициент объединения по входу И (ИЛИ) | Время задержки сигнала (не более), нс | Напряжение помехи (не более), В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Логика «1» | Логика «0» | | | | |
| | | | Серия 106 («Таран») | | | | | | |
| 1ЛБ061 | Две логические схемы И-НЕ с возможностью расширения по ИЛИ | 5 | 18 | 2,3 | 0,30 | 10 | 3 | 40 | 0,6 |
| 1ЛБ062 | | | 7 | | 0,25 | | 3 | 100 | |
| 1ЛБ063 | | | 18 | | 0,30 | | 2 | 40 | |
| 1ЛБ064 | | | 7 | | 0,25 | | 2 | 100 | |
| 1ЛБ065 | Логическая схема И-НЕ с возможностью расширения по ИЛИ | 5 | 18 | 2,3 | 0,30 | 10 | 8 | 45 | 0,6 |
| 1ЛБ066 | | | 7 | | 0,25 | | 8 | 110 | |
| 1ЛБ067 | | | 18 | | 0,30 | | 6 | 45 | |
| 1ЛБ068 | | | 7 | | 0,25 | | 6 | 110 | |
| 1ЛБ069 | | | 18 | | 0,30 | | 4 | 45 | |
| 1ЛБ0610 | | | 7 | | 0,25 | | 4 | 110 | |
| 1ЛР061 | Логическая схема И-ИЛИ-НЕ с расширением по ИЛИ | 5 | 24 | 2,3 | 0,30 | 10 | 8 | 45 | 0,6 |
| 1ЛР062 | | | 10 | | 0,25 | | 8 | 110 | |
| 1ЛР063 | | | 24 | | 0,30 | | 4 | 45 | |
| 1ЛР064 | | | 10 | | 0,25 | | 4 | 110 | |
| 1ЛП061 | Восьмиходовой расширитель по ИЛИ | 5 | — | — | — | — | 8 | 6 | — |
| 1ЛП062 | | | | | | | 8 | 10 | |
| 1ЛП063 | | | | | | | 6 | 6 | |
| 1ЛП064 | | | | | | | 6 | 10 | |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1ЛР341А<br>1ЛР341Б | Сдвоенная схема 2И-2ИЛИ-НЕ<br>Сдвоенная схема 4И-ИЛИ-НЕ | 5 | 2,5×2 | 2,3 | 0,25 | 10 | — | 80 | 0,5 |
| 1ЛР342А<br>1ЛР342Б | Сдвоенная схема 2И-3ИЛИ-4И<br>Схема ИЛИ-НЕ | | 2×2 | | | | | | |
| 1ЛР343А<br>1ЛР343Б | Счетверенная схема 4И-2ИЛИ-НЕ | | 2,5×24 | | | | | | |
| 1ЖЛ341 | Многофункциональная логическая схема | 5 | 4×2 | 2,3 | 0,25 | 10 | | 100 | 0,5 |
| 1ТК341 | *J*-к-триггер со счетным входом | 5 | 10 | 2,3 | 0,25 | 10 | — | 100 | 0,5 |
| 1ТК342 | Два *J*-к-триггера со счетным входом | | 20 | | | | | | |
| 1ТК343 | Двойной *D*-триггер | | 3×2 | | | | | | |

*Продолжение табл. 34 9*

| Тип микросхем | Выполняемая логическая функция | Напряжение питания, В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение выходного сигнала, В | | Коэффициент разветвления (не более) | Коэффициент объединения по входу И (ИЛИ) | Время задержки сигнала (не более), нс | Напряжение помехи (не более), В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Логика «1» | Логика «0» | | | | |
| 1ЛП065<br>1ЛП066<br>1ЛП067<br>1ЛП068 | Два четырехвходовых расширителя по ИЛИ | 5 | — | — | — | — | 4<br>4<br>3<br>3 | 6<br>10<br>6<br>10 | — |
| 1ТР061<br>1ТР062<br>1ТР063<br>1ТР064 | Триггер с раздельными входами | 5 | 36<br>14<br>36<br>14 | 2,3 | 0,30<br>0,30<br>0,30<br>0,30 | 10 | 3<br>3<br>2<br>2 | 40<br>100<br>40<br>100 | 0,6 |
| | | | Серия 134 («Тур») | | | | | | |
| 1ЛБ341А<br>1ЛБ341Б | Четыре логические схемы 2И-НЕ | 5 | 4×2 | 2,3 | 0,25 | 10 | — | 100 | 0,5 |
| 1ЛБ342А<br>1ЛБ342Б | Две логические схемы 4И-НЕ и схема НЕ | | 3×2 | | | | | | |
| 1ЛБ343А<br>1ЛБ343Б | Четыре вентиля с открытыми коллекторными выходами | | 4×2 | | | | | | |
| 1ЛБ344А<br>1ЛБ344Б | Восьмивходовая схема И-НЕ | | 2 | | | | | | |

*Таблица 34.10*

**Основные электрические параметры интегральных микросхем серий 133, 130 и 136**

| Тип микросхем | Выполняемая логическая функция (назначение) | Напряжение питания, В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение выходного сигнала, В | | Коэффициент разветвления по выходу (не более) | Коэффициент объединения по входу И (ИЛИ) | Время задержки сигнала (не более), нс | Напряжение помехи (не более), В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Логика «1» | Логика «0» | | | | |
| | | | Серия 133 («Логика-2») | | | | | | |
| 1ЛБ331<br>1ЛБ339 | Сдвоенная четырехвходовая схема И-НЕ | 5 | 15 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 4 | 15 | 1,0 |
| 1ЛБ332<br>1ЛБ3310 | Восьмивходовая схема И-НЕ | 5 | 15 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 8 | 18 | 1,0 |
| 1ЛБ333<br>1ЛБ3311 | Счетверенная двухвходовая схема И-НЕ | 5 | 15 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 2 | 15 | 1,0 |
| 1ЛБ334<br>1ЛБ3312 | Строенная трехвходовая схема И-НЕ | 5 | 15 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 3 | 15 | 1,0 |
| 1ЛБ335<br>1ЛБ3313 | Логическая схема 4И-НЕ | 5 | 15 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 4 | 15 | 1,0 |
| 1ЛБ336<br>1ЛБ3314 | Сдвоенная четырехвходовая схема И-НЕ с большим коэффициентом разветвления (буфер) | 5 | 30 | 2,6 | 0,35 | 30<br>15 | 4 | 18 | 1,0 |
| 1ЛБ337 | Сдвоенная четырехвходовая схема И-НЕ с повышенной нагрузочной способностью | 5 | 20 | 2,6 | 0,35 | 10 | 4 | 18 | 1,0 |
| 1ЛБ338 | Счетверенная двухвходовая схема И-НЕ с открытым коллекторным выходом | 5 | 15 | 2,6 | 0,35 | 10 | 2 | 15 | 1,0 |

рий 133, 130 и 136 представляют собой самостоятельные комплексы логических полупроводниковых микросхем типа ТТЛ, отличающиеся между собой быстродействием и потребляемой мощностью. Серия 133 характеризуется средним быстродействием (70 МГц) и средним потреблением мощности (15 мВт); серия 130— повышенным быстродействием (150 МГц) и повышенным потреблением мощности (до 25 мВт на одинарную *n*-входовую схему И-НЕ), серия 136 — пониженным быстродействием (15 МГц), пониженной потребляемой мощностью (1—5 мВт) и повышенной помехоустойчивостью ($\geqslant$1 В).

Все три серии микросхем совместимы по конструкции корпуса (плоский металлостеклянный, с планарным расположением 14 выводов типа 101МС14-1), напряжению питания (5 В) и по логическим уровням, образуя единый функцио-

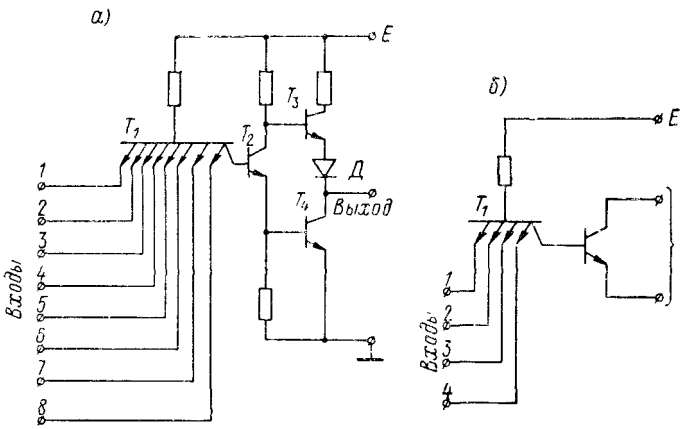



Рис. 34.14. Электрические схемы основных логических элементов серии 133: *а* — восьмивходовая схема И-НЕ (1ЛБ332); *б* — схема расширителя го ИЛИ (1ЛП331).

нально полный комплекс элементов типа ТТЛ, обеспечивающий возможность конструирования ЦВМ и устройств дискретной автоматики с высокими технико-экономическими показателями. Базовой серией данного комплекса логических микросхем является серия 133, содержащая в настоящее время 29 типов микросхем и являющаяся наиболее развитой в отношении логической мощности. Серия 130 содержит 19 типов микросхем, серия 136 — только 14 типов микросхем. Номенклатура микросхем данных серий и их основные электрические параметры приведены в табл. 34.10. Указанные показатели с течением времени будут корректироваться.

Микросхемы серии 133 (кроме буферных элементов 1ЛБ336 и 1ЛБ3314) образуются путем комбинирования двух основных логических элементов: восьмивходовой схемы И-НЕ (1ЛБ332 и 1ЛБ3310) и схем расширителей по ИЛИ (1ЛП331—1ЛП3311). Электрические схемы этих элементов приведены на рис. 34.14. Все логические элементы серии обладают большим коэффициентом разветвления, что позволяет конструировать функциональные модули более компактными и с резервированием для увеличения надежности модуля в целом. Элементы серии имеют малые выходные и сравнительно высокие входные сопротивления, что способствует хорошему согласованию схем между собой. Обладая высокой помехозащищенностью при относительно большом логическом перепаде напряжений (0,35—2,6 В), микросхемы имеют сравнительно с сериями 106 и 134 высокое быстродействие при умеренной потребляемой мощности (15 мВт). Максимальное число объединений по логическому входу ИЛИ равно 8. При присоединении одного расширителя увеличивается время задержки распространения сигнала

*Продолжение табл. 34.10*

| Тип микросхем | Выполняемая логическая функция (назначение) | Напряжение питания В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение выходного сигнала, В | | Коэффициент разветвления по выходу (не более) | Коэффициент объединения по входу И (ИЛИ) | Время задержки сигнала (не более), нс | Напряжение помехи (не более), В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Логика «1» | Логика «0» | | | | |
| 1ЛР331<br>1ЛР339 | Сдвоенная схема 2И-2ИЛИ-НЕ, один расширитель по ИЛИ | 5 | 20 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 2 | 18 | 1,0 |
| 1ЛР332<br>1ЛР3310 | Схема 2И-2ИЛИ-НЕ с возможностью расширения по ИЛИ | 5 | 30 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 2 | 18 | 1,0 |
| 1ЛР333<br>1ЛР3311 | Девятивходовая схема И-ИЛИ-НЕ с расширением по ИЛИ | 5 | 20 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 9 | 18 | 1,0 |
| 1ЛП331<br>1ЛП339 | Сдвоенный четырехвходовой расширитель по ИЛИ | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 4 | 5 | 1,0 |
| 1ЛП332<br>1ЛП3310 | Четырехвходовой расширитель по ИЛИ | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 4 | 5 | 1,0 |
| 1ЛП333<br>1ЛП3311 | Восьмивходовой расширитель по ИЛИ | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 8 | 5 | 1,0 |
| 1ТК331 | Триггер комбинированный | | | | | | | | |
| 1ТК332 | Двойной *D*-триггер | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 10 | — | — | 1,0 |
| 1ТР331 | Триггер с раздельным запуском | | | | | | | | |
| | **Серия 130 («Индекс»)** | | | | | | | | |
| 1ЛБ301 | Две четырехвходовые схемы И-НЕ | 5 | 46 | 2,6 | 0,35 | 10 | 4 | 7 | 0,5 |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1ЛБ302 | Восьмивходовая схема И-НЕ | 5 | 23 | 2,6 | 0,35 | 10 | 8 | 8 | 0,5 |
| 1ЛБ303 | Четыре двухвходовые схемы И-НЕ | 5 | 92 | 2,6 | 0,35 | 10 | 2 | 7 | 0,5 |
| 1ЛБ304 | Три трехвходовые схемы И-НЕ | 5 | 69 | 2,6 | 0,35 | 10 | 3 | 7 | 0,5 |
| 1ЛБ306<br>1ЛБ307 | Две четырехвходовые схемы И-НЕ | 5 | 46 | 2,6 | 0,35 | 20<br>5 | 4 | 8<br>7 | 0,5 |
| 1ЛБ308 | Восьмивходовая схема И-НЕ | 5 | 23 | 2,6 | 0,35 | 5 | 8 | 8 | 0,5 |
| 1ЛБ309 | Четыре двухвходовые схемы И-НГ | 5 | 92 | 2,6 | 0,35 | 5 | 2 | 7 | 0,5 |
| 1ЛБ3010 | Три трехвходовые схемы И-НЕ | 5 | 69 | 2,6 | 0,35 | 5 | 3 | 7 | 0,5 |
| 1ЛР301 | Две схемы 2И-2ИЛИ-НЕ, одна с расширением по ИЛИ | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 10 | 2 | 8 | 0,5 |
| 1ЛР303 | Две схемы 2И-2ИЛИ-НЕ, с расширением по ИЛИ | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 10 | 2 | 9 | 0,5 |
| 1ЛР304 | Схема 4И-2ИЛИ-НЕ с расширением по ИЛИ | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 10 | 4 | 8 | 0,5 |
| 1ЛР305 | Две схемы 2И-2ИЛИ-НЕ, одна с расширением по ИЛИ | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 5 | 2 | 8 | 0,5 |
| 1ЛР306 | 2-2-2-3И-ИЛИ-НЕ схемы с расширением по ИЛИ | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 5 | 3 | 9 | 0,5 |

*Продолжение табл. 34.10*

| Тип микросхем | Выполняемая логическая функция (назначение) | Напряжение питания, В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение выходного сигнала, В | | Коэффициент разветвления по выходу (не более) | Коэффициент объединения по входу И (ИЛИ) | Время задержки сигнала (не более), нс | Напряжение помехи (не более), В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Логика «1» | Логика «0» | | | | |
| 1ЛР307 | Схема 4И-2ИЛИ-НЕ, с расширением по ИЛИ | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 5 | 4 | 8 | 0,5 |
| 1ЛП301 | Две схемы четырехвходового расширителя по ИЛИ для схем И-ИЛИ-НЕ | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 2 | 4 | 8 | 0,5 |
| 1ТК301<br>1ТК302<br>1ТК303 | 3J-3K-И-триггер<br>Триггер комбинированный | 5 | — | 2,6 | 0,35 | 10 | — | F = 30 МГц | 0,5 |
| | | | Серия 136 («Изумруд») | | | | | | |
| 1ЛБ361<br>1ЛБ369 | Две четырехвходовые схемы И-НЕ | 5 | 10 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 4 | 60 | 1,2 |
| 1ЛБ362<br>1ЛБ3610 | Восьмивходовая схема И-НЕ | 5 | 12 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 8 | 80 | 1,2 |
| 1ЛБ363<br>1ЛБ3611 | Счетверенная двухвходовая схема И-НЕ | 5 | 4,5 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 2 | 60 | 1,2 |
| 1ЛБ364<br>1ЛБ3612 | Строенная трехвходовая схема И-НЕ | 5 | 12 | 2,6 | 0,35 | 10<br>5 | 3 | 60 | 1,2 |
| 1ЛР361 | Сдвоенная схема 2И-2ИЛИ-НЕ | 5 | 12 | 2,6 | 0,35 | 10 | 2 | 80 | 1,2 |
| 1ЛР363 | Две схемы 2И-2ИЛИ-НЕ, одна с расширением по ИЛИ | 5 | 11 | 2,6 | 0,35 | 10 | 2 | 80 | 1,2 |
| 1ЛР364 | Схема 4И-2ИЛИ-НЕ с расширением по ИЛИ | 5 | 5,5 | 2,6 | 0,35 | 10 | 4 | 120 | 1,2 |
| 1ТК361<br>1ТК362<br>1ТК363 | Триггер комбинированный | 5 | 10 | 2,6 | 0,35 | 10 | — | — | 1,2 |

в схеме на 5 нс, а потребляемая мощность — на 5 мВт. Для всех схем серии характерны малая длительность фронтов импульсов и способность работать на большую емкостную нагрузку при высоких скоростях переключения.

Микросхемы серии 130 построены на базе основного логического элемента, выполняющего функцию И-НЕ (1ЛБ301—1ЛБ3010). По схемному решению основной элемент существенно отличается от микросхем серии 133 вследствие уменьшения паразитных емкостей компонентов, уменьшения сопротивлений резисторов и применения в выходном каскаде схемы Дарлингтона.

Схема Дарлингтона, выполненная на транзисторах $T_3$ и $T_4$, обеспечивает большой ток заряда емкости нагрузки при выключении. Этот эффект уменьшает время задержки распространения сигнала, уменьшает фронты выходного импульса, позволяет получить высокий выходной уровень логической «1» (2,6 В) за счет малого падения напряжения на эмиттер-базовом переходе транзистора $T_3$, а также низкий выходной импеданс для обоих логических состояний схемы.

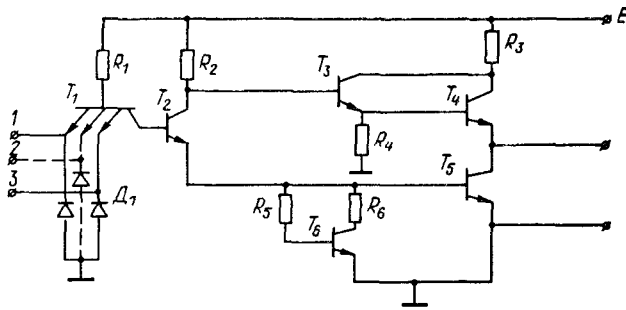



Рис. 34.15. Электрическая схема основного логического элемента серии 130.

Серия 130 содержит 19 типов интегральных схем, функция, условное обозначение и основные электрические параметры которых приведены в табл. 33.10. Функции микросхем указаны для положительной логики, когда логическая «1» соответствует высокому уровню напряжения, а логический «0» — низкому. Электрическая схема основного логического элемента, из которых состоят микросхемы типа 1ЛБ301—1ЛБ3010, приведена на рис. 34.15. Микросхемы в зависимости от типа имеют от 2 до 8 входов. Сопротивления резисторов микросхемы 1ЛБ306, представляющей собой объединение двух четырехвходовых схем И-НЕ, имеют меньшие значения, чем в остальных микросхемах. Микросхемы типов 1ЛР301—1ЛР307, осуществляющие логические построения И-ИЛИ-НЕ, могут расширять функцию ИЛИ до 8 за счет подключения к соответствующим выводам четырехвходовых схем расширителей типа 1ЛП301.

Микросхемы типов 1ЛР301, 1ЛР304, 1ЛР305, 1ЛР307 допускают подключение до 6 четырехвходовых расширителей (3 схемы типа 1ЛП301), а микросхемы 1ЛР303 и 1ЛР306 — подключение только 4 расширителей (2 микросхемы типа 1ЛП301). Благодаря совместимости интегральных микросхем серий 130, 133 и 136 по логическим уровням схемы различных серий могут работать совместно в любых сочетаниях, в том числе с использованием триггерных элементов с управлением от ячеек И-НЕ серий 130, 133 и 136. При этом необходимо учитывать тот фактор, что входные токи значительно отличаются для микросхем различных серий и соответственно имеют различные коэффициенты разветвления по выходу. Нагрузочные коэффициенты для согласования микросхем управления и микросхем нагрузок серий 130, 133 и 136 приведены в табл. 34.11.

При подключении микросхем расширителей 1ЛП301 к схемам типа 1ЛР301—1ЛР307 время задержки распространения сигнала увеличивается на 1 нс (при подключении каждого расширителя), что эквивалентно подключению паразитной емкости к коллекторному выводу микросхемы (1 нс на 1 пФ подключаемой емкости).

Микросхемы серии 136 в схемном и конструктивном отношении мало чем отличаются от серий 130 и 133. В состав серии входит 14 типов микросхем, которые совместно с микросхемами серий 130 и 133 позволяют конструировать любые устройства ЦВМ и дискретной автоматики. Наиболее характерные отличия микросхем серии 136 по сравнению с сериями 130 и 133 были отмечены выше. Номенклатура и электрические параметры микросхем серии приведены в табл. 34.10 и 34.11.

*Таблица 34.11*

**Нагрузочные коэффициенты для микросхем серий 130, 133 и 136 при их совместной работе в логических устройствах ЦВМ и дискретной автоматики**

| Управляющие схемы | Нагрузочные схемы | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | 1ЛБ301—1ЛБ304; 1ЛР301—1ЛР304 | 1ЛБ306 | 1ЛП301 | 1ЛБ331—1ЛБ334; 1ЛР331—1ЛР334; | 1ЛП331— | 1ЛБ336 | 1ЛБ361—1ЛБ364 | 1ЛБ366 |
| 1 | 10 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 25 | 25 |
| 2 | 20 | 16 | 20 | 20 | 20 | 20 | 50 | 50 |
| 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | — | — |
| 4 | 7 | 6 | 7 | 10 | 10 | 10 | 25 | 25 |
| 5 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 6 | 20 | 19 | 20 | 30 | 30 | 30 | 75 | 75 |
| 7 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 | 10 |
| 8 | 6 | 4 | 6 | 7 | 7 | 7 | 30 | 30 |

**Логические интегральные микросхемы транзисторной логики с резистивными (РТЛ) и резистивно-емкостными (РСТЛ) связями.** Схемы с резистивно-транзисторной логикой (РТЛ) и резистивно-емкостной транзисторной логикой (РЕТЛ) получили широкое распространение благодаря малому потреблению мощности и среднему быстродействию. На основе этих микросхем можно разрабатывать миниатюрные по габаритам и микромощные устройства ЦВМ и дискретной автоматики. Включение в цепи связи токоограничивающих резисторов или *RC*-цепочек обеспечивает более равномерное распределение базовых токов транзисторов (рис. 34.3), в какой-то мере сокращает время переключения транзисторов, повышает уровень помех, увеличивает число каскадов, подключаемых к выходу, и расширяет диапазон температур окружающей среды. Однако снижение потребляемой мощности обусловливает эффект значительного снижения быстродействия, поэтому микросхемы РТЛ и РЕТЛ не могут конкурировать с другими видами микросхем.

К группе элементов РТЛ относятся серии гибридных (201, 205, 204) и полупроводниковых (111, 113, 114) интегральных микросхем. Номенклатура и основные электрические параметры интегральных микросхем этих серий приведены в табл. 34.12. Микросхемы серий 201 и 114 выполнены в корпусе 2МП12-1 («Тропа»); серий 204 и 205 — в корпусе 2МП14-1 («Трапеция»); серии 113 — в корпусе 101МС 14—1; серии 111 — без корпуса (кристаллы серии служат основой для компоновки многокристальных микросхем серии 114).

**Логические полупроводниковые интегральные микросхемы типа ЛСПТ.** Интегральные микросхемы типа ЛСПТ, работающие по принципу переключения тока, являются схемами повышенного быстродействия. Высокое быстродействие микросхем обеспечивается ненасыщенным режимом работы транзисторов, малым

*Таблица 34 12*

**Основные электрические параметры интегральных микросхем серий 201, 204, 205, 111, 113 и 114 РТЛ**

| Тип микросхем | Выполняемая логическая функция (назначение) | Напряжение питания, В ±10% | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение выходного сигнала, В | | Коэффициент разветвления по выходу (не более) | Коэффициент объединения по входу И (ИЛИ) | Время задержки сигнала (не более), нс | Напряжение помехи (не более), В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Логика «1» | Логика «0» | | | | |
| | | | Серия 201 («Тропа-1») | | | | | | |
| 2ЛБ011 | Схема НЕ, И-НЕ | +4 | 15 | 0,3 | 0,6—1,3 | 2 | 6 | 270 | 0,3 |
| 2ЛБ012 | Схема НЕ, ИЛИ-НЕ | | 30 | 0,3 | 0,6—1,3 | 5 | | | |
| 2ЛБ013 | | | 30 | 0,3 | 0,6—1,3 | 8 | | | |
| 2ЛС011 | 2И-2ИЛИ | | 30 | 0,3 | 0,6—1,3 | 8 | | | |
| 2ЛБ014 | 2И-2НЕ, 2НЕ | +4 | 23 | 0,3 | 0,6—1,3 | 2 | 6 | 270 | 0,3 |
| 2ЛБ015 | | | 20 | 0,3 | 0,6—1,3 | 2 | | | |
| 2ЛБ016 | 5НЕ, ИЛИ-НЕ | | 38 | 0,3 | 0,6—1,3 | 5 | | | |
| 2ЛБ017 | | | 38 | 0,3 | 0,6—1,3 | 8 | | | |
| | | | Серия 204 («Трапеция-1») | | | | | | |
| 2ТК041 | Триггер | +4 | 37 | —0,3 | +2,4 | 8 | — | 250 | 0,3 |
| 2ЛБ041 | 2 (ЗИЛИ-НЕ) | | 68 | | | 10 | 6 | 100 | 0,3 |
| 2ЛБ042 | 2 (2И-НЕ) | | 50 | | | 10 | 6 | 100 | 0,3 |
| 2НК041 | Четыре диодно-емкостных вентиля | | — | | | 1 | 4 | 10 | 0,3 |
| 2ЛИ041 | Схема совпадения для образования счетного входа | | — | | | 1 | 4 | 10 | 0,5 |
| | | | Серия 205 («Трапеция-2») | | | | | | |
| 2НК051 | Клапан | $U_{вх} \leqslant 4{,}4$ В; $R_н = 1{,}5$ кОм; $U_{вых} = 1$ В; $\tau_{имп} = 0{,}39$—$0{,}9$ нс; $I_н \leqslant 5$ мА | | | | | | | |
| 2ЛБ051 | Инвертор двойной, НЕ-ИЛИ на два входа | 4 | 25 | | | 2—3 | — | | |
| 2ЛБ052 | Инвертор логический | 4 | 25 | 3 | 0,4 | 2—3 | — | 250 | 0,1 |
| 2ЛБ053 | | | | | | | | | |
| 2ЛН051 | Инвертор резервированный, НЕ | | 8 | | | 4 | | | |

*Продолжение табл 34 12*

| Тип микросхем | Выполняемая логическая функция (назначение) | Напряжение питания В ±10% | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение выходного сигнала, В | | Коэффициент разветвления по выходу (не более) | Коэффициент объединения по входу И (ИЛИ) | Время задержки сигнала (не более), нс | Напряжение помехи (не более), В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Логика «1» | Логика «0» | | | | |
| 2ТС051 | Инвертор импульсный | 4 | 50 | 3 | 0,4 | 2—3 | — | 250 | 0,1 |
| 2ЛН052 | Инвертор резервированный, НЕ | | 8 | | | 4 | | | |
| | Серия 111 («Микроватт») — бескорпусная | | | | | | | | |
| 1ЛБ111 | Логическая схема | | 0,5 | | | | | 500 | |
| 1ЛБ112 | ИЛИ-НЕ | 4 | 0,75 | 0,95 | 0,2 | 4 | — | 300 | 0,2 |
| 1ЛБ113 | | | 1,6 | | | | | 100 | |
| | Серия 113 («Микроватт-1») | | | | | | | | |
| 1ЛБ131 (А, Б, В) | Четыре двухвходовых схемы ИЛИ-НЕ с возможностью расширения | 4 | 2 | 0,95 | 0,2 | 4 | — | 400 | 0,15 |
| 1ЛБ132 (А, Б, В) | Две двухвходовые схемы ИЛИ-НЕ с возможностью расширения | 4 | 2 | 0,95 | 0,2 | 4 | — | 400 | 0,15 |
| 1ЛБ133 (А, Б, В) | Двухвходовая и трехвходовая схемы ИЛИ-НЕ с большой нагрузочной способностью | 4 | 2 | — | 0,5 | 50 | — | 400 | 0,7 |
| 1ЛБ134 (А, Б, В) | Трехвходовая схема ИЛИ-НЕ с большой нагрузочной способностью | 4 | 2 | — | 0,5 | 50 | — | 400 | 0,7 |
| 1ЛБ135 (А, Б, В) | Расширитель и двухвходовая схема ИЛИ-НЕ | 4 | 2 | 0,95 | 0,2 | 4 | — | 400 | 0,15 |
| 1ИЛ131 | Полусумматор | 4 | 2 | 0,78 | 0,2 | 4 | — | 400 | 0,15 |
| 1ТР131 (А, Б, В) | Триггер и двухвходовая схема ИЛИ-НЕ с возможностью расширения | 4 | 2 | 0,78 | 0,2 | 4 | — | 400 | 0,15 |

Серия 114 («Иллюминатор»)

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1ИЛ141 (А, Б) | Полусумматор и двухвходовая схема ИЛИ-НЕ | 4 | 3—5 | 0,95 | 0,15 | 4 | — | 1000<br>800 | 0,2 |
| 1ИР141 (А, Б) | Разряд регистра сдвига | 4 | 4—7 | 0,78 | 0,15 | 4 | — | 1200<br>1500 | 0,2 |
| 1ЛБ141 (А, Б) | Две схемы ИЛИ-НЕ | 4 | 1,4—2,2 | 0,95 | 0,15 | 4 | — | 500<br>400 | 0,2 |
| 1ЛБ142 (А, Б) | Шестивходовая схема ИЛИ-НЕ с инверсным выходом | 4 | 1,2—1,7 | 0,95 | 0,15 | 4 | — | 1000<br>800 | 0,2 |
| 1ЛБ143 (А, Б) | Две схемы ИЛИ-НЕ с инверсным выходом | 4 | 2,8—4,4 | 0,95 | 0,15 | 4 | | 1000<br>800 | 0,2 |
| 1ЛБ144 (А, Б) | Две четырехвходовые схемы ИЛИ-НЕ с возможностью расширения | 4 | 1,2—2,2 | 0,95 | 0,15 | 4 | — | 500<br>400 | 0,2 |
| 1ЛБ145 (А, Б) | Схема ИЛИ-НЕ с повышенной нагрузочной способностью | 4 | 2,6—3,9 | 0,95 | 0,15 | 10 | — | 1000<br>800 | 0,2 |
| 1ЛБ146 (А, Б) | Двухвходовая схема ИЛИ-НЕ с большой нагрузочной способностью | 4 | 25—48 | 0,95 | 0,15 | 50 | — | 1000<br>800 | 0,2 |
| 1ЛП141 (А, Б) | Два расширителя | — | $I_{вх}$ = 6—34 (6—48) мкА | | | | | | |
| 1ЛП142 (А, Б) | Два четырехвходовых расширителя | | $I_{вх}$ = 6—17 (6—24) мкА | | | | | 500<br>500 | |
| 1ТР141 (А, Б) | Триггер с раздельными входами | 4 | 2,3—3,4 | 0,78 | 0,15 | 4 | — | 1000<br>800 | 0,2 |

*Таблица 34.13*

**Основные электрические параметры интегральных микросхем серий 137 и 139 ЛСПТ**

| Тип микросхем | Выполняемая логическая функция (назначение) | Напряжение питания, В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение выходного сигнала, В | | Коэффициент разветвления по выходу (не более) | Коэффициент объединения по входу И (ИЛИ) | Время задержки сигнала (не более), нс | Напряжение помехи (не более), В |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Логика «1» | Логика «0» | | | | |
| | | | Серия 137 (139) | | | | | | |
| 1ЛБ371 | Трехвходовая схема | | 120 | | | | | | |
| 1ЛБ378 | ИЛИ-НЕ/ИЛИ с возможностью расширения по ИЛИ | —5 | 50 | 0,76 | —1,51 | 15 | 9 | 3,8 | 0,2 |
| 1ЛБ3719 | | | 120 | | | | | | |
| 1ЛБ372 | Две трехвходовые схемы | | 140 | | | | | | |
| 1ЛБ379 | ИЛИ-НЕ/ИЛИ | —5 | 140 | 0,76 | —1,51 | 15 | 3 | 3,8 | 0,2 |
| 1ЛБ3710 | | | 80 | | | | | | |
| 1ЛБ375 | Трехвходовая схема | —5 | 125 | 0,76 | —1,51 | 100 | 3 | 4,5 | 0,2 |
| 1ЛБ3716 | ИЛИ-НЕ/ИЛИ с повышенной нагрузочной способностью | | 55 | | | | | | |
| 1ЛБ376 | Пятивходовая схема | | 120 | | | | | | |
| 1ЛБ3717 | ИЛИ-НЕ/ИЛИ | —5 | 120 | 0,76 | —1,51 | 15 | 5 | 4,5 | 0,2 |
| 1ЛБ3718 | | | 50 | | | | | | |
| 1ИЛ371 | Полусумматор | —5 | 180 | 0,76 | —1,51 | 15 | 2 | 4,5 | 0,2 |
| 1ИЛ373 | | | 110 | | | | | | |
| 1ТР371 | R-S-триггер с повышенной | —5 | 190 | 0,76 | —1,51 | 100 | 2 | 7,5 | 0,2 |
| 1ТР373 | нагрузочной способностью | | 120 | | | | | | |
| 1ТР374 | Синхронный *D*-триггер с по- | —5 | 160 | 0,76 | —1,51 | 100 | — | 7,5 | 0,2 |
| 1ТР375 | вышенной нагрузочной способностью | | 90 | | | | | | |
| 1ЛП371 | Два трехвходовых расширителя по ИЛИ | — | — | — | — | — | 3 | — | — |

логическим перепадом (0,7—0,8 В) и малым выходным импедансом, который уменьшает влияние нагрузочных емкостей.

Отечественной электронной промышленностью разработан ряд серий микросхем типа ЛСПТ. Значительный интерес представляют две серии, 137 («Истра-3») и 139 («Игра-1»). Обе серии, отличаясь по быстродействию и потребляемой мощности, имеют одинаковые напряжения питания и логические уровни, что обеспечивает возможность их совместного применения. Значительным преимуществом микросхем типа ЛСПТ является наличие прямого и инверсного выходов, что позволяет уменьшить их номенклатуру, необходимую для выполнения определенной логической функции, на 20—30% по сравнению со схемами, рассмотренными выше. Микросхемы серий 137 и 139 изготовляются по планарно-эпитаксиальной

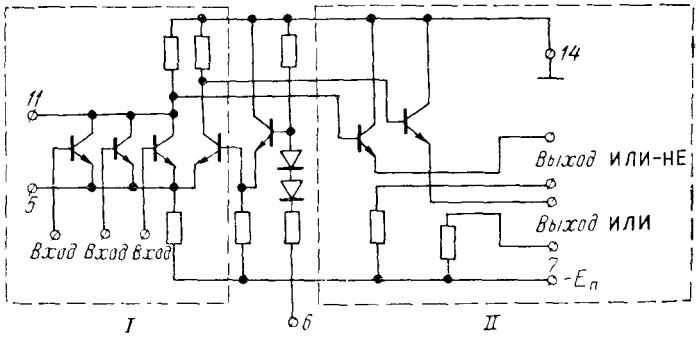



Рис. 34.16. Электрическая схема основного логического элемента серии 137.

*I* — переключатель тока; *II* — эмиттерные повторители.

технологии с использованием низкоомных диффузионных «скрытых» слоев. Конструктивное оформление микросхем данных серий аналогично серии 133 (плоский корпус 101МС14-1 с планарными выводами). Номенклатура микросхем и их электрические параметры приведены в табл. 34.13. Электрическая схема базового логического элемента представлена на рис. 34.16.

Схема состоит из переключателя тока (дифференциального усилителя) и эмиттерного повторителя, который обеспечивает согласование между выходными уровнями схемы и высокую нагрузочную способность. Объединение микросхем по входу (расширение по ИЛИ) осуществляется подключением сдвоенного трехвходового расширителя (типа 1ЛП371); объединение на выходе — путем соединения выходов эмиттерных повторителей на одном нагрузочном резисторе.

Номенклатура микросхем и их электрические схемы серии 139 совпадают с серией 137 и в табл. 34.13 не включаются, так как однотипные микросхемы отличаются только условным обозначением (1ЛБ371—1ЛБ391 и т. д.), несколько меньшим быстродействием (время задержки распространения сигнала 10 нс) и соответственно меньшим потреблением мощности (40—60 мВт).

## § 35. ЛИНЕЙНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Внедрение технических средств микроэлектроники в устройства дискретной автоматики не решает проблемы миниатюризации ЦВМ и любой многофункциональной автоматической системы. Как правило, такие комплексные системы с высокой степенью автоматизации включают в себя как дискретные устройства, так и значительное число линейных (аналоговых) устройств.

Одним из замечательных достижений микроэлектроники, открывающим пути повышения технического уровня и осуществления комплексной миниатюризации создаваемых приборных образцов автоматических систем управления, телеизмерения и централизованного контроля, является разработка и серийное производство линейных (аналоговых) интегральных микросхем широкого и частного применения.

Линейные интегральные микросхемы по схемным, топологическим и технологическим признакам значительно более сложны, если их сравнивать с логическими микросхемами. На ранней стадии развития микроэлектроники линейные микросхемы из-за ряда трудностей, возникающих в процессе их производства, имели весьма ограниченные перспективы внедрения в аналоговую системотехнику. Этому способствовало и массовое увлечение цифровыми методами управления и широкое их внедрение в системы автоматики. Успехи полупроводниковой технологии и микросхемотехники, базирующиеся на создании в монолите кристалла каскадов с непосредственными связями и создании на их основе дифференциальных схемных решений усилителей с высокой идентичностью параметров и характеристик составных транзисторов, открыли новые пути создания сложных и высококачественных линейных микросхем.

Анализ возможностей дискретных и аналоговых автоматических систем, выполненных на микроэлектронной элементной базе, показал, что в ряде случаев возврат к линейным методам построения систем автоматики значительно повышает их качество, а внедрение линейных микросхем дает значительный технико-экономический эффект. Все это в полной мере относится к судовой автоматике и прежде всего к системам автоматического регулирования радиолокационных и гидроакустических комплексных систем, а еще в большей степени — к системам автоматики судовых технических средств, в которых основные контуры управления и регулирования традиционно выполняются с использованием аналоговой элементной базы.

Номенклатура линейных интегральных микросхем включает в себя усилители с одиночными и дифференциальными входами, операционные усилители, компараторы и усилители считывания сигналов запоминающих устройств, мультивибраторы, блокинг-генераторы, усилители-ограничители, стабилизаторы питающих напряжений (вторичные источники питания). К числу аналоговых интегральных микросхем среднего уровня интеграции можно отнести преобразователи: аналог—код, код—аналог, фаза—код и др. Условные обозначения линейных микросхем приведены в табл. 35.1.

Многоцелевое использование унифицированных широкополосных усилителей, реализующее модульный принцип построения линейных усилительных устройств комплесных систем, оказалось возможным благодаря высокому качеству интегральных микросхем, обусловленному избыточностью их структур. Внедрение линейных микросхем резко повышает точность, стабильность и надежность аппаратуры без существенного увеличения экономических показателей.

Серийное производство дискретных и линейных интегральных микросхем открывает возможности для практической реализации сложных многофункциональных автоматических комплексных систем, что ранее нельзя было осуществить на обычных дискретных электронных и электротехнических элементах. Кроме того, внедрение интегральных микросхем дает в руки разработчика мощный инструмент для повышения чувствительности и точности работы систем и улучшения технических показателей по надежности. Объективная оценка преимуществ линейной интегральной элементной базы, используемой в судовой автоматике, складывается из учета ряда факторов. К ним относятся: возможность реализации многих сложных алгоритмов управления; повышение надежности систем управления путем применения высоконадежных микросхем; введение встроенного контроля и систем прогнозирования отказов; возможность горячего и холодного резервирования; введение режима самонастройки наиболее ответственных функциональных устройств при постепенных отклонениях параметров; снижение стоимости аппаратуры за счет уменьшения времени разработки, автоматизации сборки узлов, введения пооперационного контроля, отлаженной технологии, сокращения номенклатуры комплектующих элементов, сокращения количества и номенклатуры ЗИП.

Одним из замечательных достижений микроэлектроники, открывающим пути повышения технического уровня и осуществления комплексной миниатюризации создаваемых приборных образцов автоматических систем управления, телеизмерения и централизованного контроля, является разработка и серийное производство линейных (аналоговых) интегральных микросхем широкого и частного применения.

Линейные интегральные микросхемы по схемным, топологическим и технологическим признакам значительно более сложны, если их сравнивать с логическими микросхемами. На ранней стадии развития микроэлектроники линейные микросхемы из-за ряда трудностей, возникающих в процессе их производства, имели весьма ограниченные перспективы внедрения в аналоговую системотехнику. Этому способствовало и массовое увлечение цифровыми методами управления и широкое их внедрение в системы автоматики. Успехи полупроводниковой технологии и микросхемотехники, базирующиеся на создании в монолите кристалла каскадов с непосредственными связями и создании на их основе дифференциальных схемных решений усилителей с высокой идентичностью параметров и характеристик составных транзисторов, открыли новые пути создания сложных и высококачественных линейных микросхем.

Анализ возможностей дискретных и аналоговых автоматических систем, выполненных на микроэлектронной элементной базе, показал, что в ряде случаев возврат к линейным методам построения систем автоматики значительно повышает их качество, а внедрение линейных микросхем дает значительный технико-экономический эффект. Все это в полной мере относится к судовой автоматике и прежде всего к системам автоматического регулирования радиолокационных и гидроакустических комплексных систем, а еще в большей степени — к системам автоматики судовых технических средств, в которых основные контуры управления и регулирования традиционно выполняются с использованием аналоговой элементной базы.

Номенклатура линейных интегральных микросхем включает в себя усилители с одиночными и дифференциальными входами, операционные усилители, компараторы и усилители считывания сигналов запоминающих устройств, мультивибраторы, блокинг-генераторы, усилители-ограничители, стабилизаторы питающих напряжений (вторичные источники питания). К числу аналоговых интегральных микросхем среднего уровня интеграции можно отнести преобразователи: аналог—код, код—аналог, фаза—код и др. Условные обозначения линейных микросхем приведены в табл. 35.1.

Многоцелевое использование унифицированных широкополосных усилителей, реализующее модульный принцип построения линейных усилительных устройств комплесных систем, оказалось возможным благодаря высокому качеству интегральных микросхем, обусловленному избыточностью их структур. Внедрение линейных микросхем резко повышает точность, стабильность и надежность аппаратуры без существенного увеличения экономических показателей.

Серийное производство дискретных и линейных интегральных микросхем открывает возможности для практической реализации сложных многофункциональных автоматических комплексных систем, что ранее нельзя было осуществить на обычных дискретных электронных и электротехнических элементах. Кроме того, внедрение интегральных микросхем дает в руки разработчика мощный инструмент для повышения чувствительности и точности работы систем и улучшения технических показателей по надежности. Объективная оценка преимуществ линейной интегральной элементной базы, используемой в судовой автоматике, складывается из учета ряда факторов. К ним относятся: возможность реализации многих сложных алгоритмов управления; повышение надежности систем управления путем применения высоконадежных микросхем; введение встроенного контроля и систем прогнозирования отказов; возможность горячего и холодного резервирования; введение режима самонастройки наиболее ответственных функциональных устройств при постепенных отклонениях параметров; снижение стоимости аппаратуры за счет уменьшения времени разработки, автоматизации сборки узлов, введения пооперационного контроля, отлаженной технологии, сокращения номенклатуры комплектующих элементов, сокращения количества и номенклатуры ЗИП.

**Обозначение линейных элементов и элементов связи в интегральном исполнении**

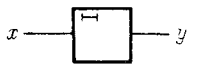
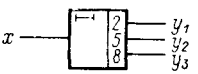
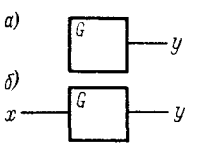
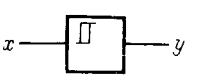
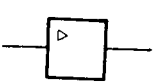
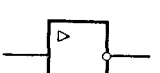
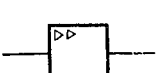
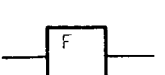
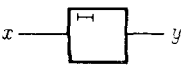
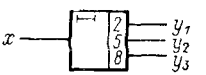
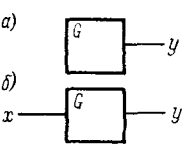
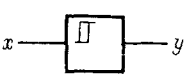
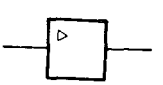
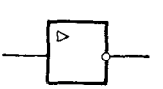
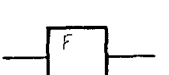
| Наименование | Обозначение |
|---|---|
| Цифровой элемент задержки |   |
| Цифровой элемент задержки с несколькими выводами |   |
| Генератор стандартных сигналов:<br>а) автоколебательный<br>б) ждущий |   |
| Пороговый элемент (триггер Шмитта) |   |
| Усилитель |  |
| Усилитель инвертор |  |
| Усилитель мощности |  |
| Формирователь сигнала |   |

*Таблица 35.1*

**Обозначение линейных элементов и элементов связи в интегральном исполнении**

| Наименование | Обозначение |
|---|---|
| Цифровой элемент задержки |   |
| Цифровой элемент задержки с несколькими выводами |   |
| Генератор стандартных сигналов:<br>а) автоколебательный<br>б) ждущий |   |
| Пороговый элемент (триггер Шмитта) |   |
| Усилитель |  |
| Усилитель инвертор |  |
| Усилитель мощности | |
| Формирователь сигнала |   |

Отечественной промышленностью разработаны и серийно выпускаются линейные интегральные микросхемы значительного количества типов, объединенные по аналогии с логическими микросхемами в серии (комплексы). В номенклатуру серий линейных микросхем, как правило, входят дифференциальные, операционные, низкочастотные, промежуточной и высокой частоты усилители малой мощности, мощные выходные и согласующие усилители, ждущие и автоколебательные генераторы и аналоговые интегральные переключатели. Многие из этих функциональных интегральных элементов по своей физической сущности и передаточной функции являются сугубо нелинейными, однако, условно все они относятся к линейным микросхемам, так как оперируют непрерывными (аналоговыми) потенциальными сигналами, в отличие от логических микросхем, оперирующими дискретными, сугубо импульсными входными сигналами. На рис. 33.2 показаны зоны насыщения (логическая «1»), отсечки, используемые для логической схемотехники, и линейная зона работы для аналоговых интегральных микросхем.

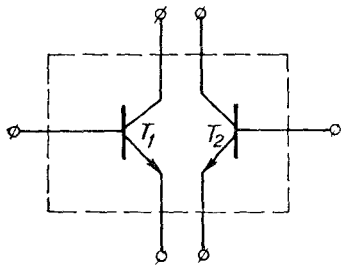


Рис. 35.1. Активный интегральный компонент аналоговых микросхем.

В качестве основного элемента всех перечисленных выше аналоговых интегральных микросхем служит единый активный интегральный компонент — пара транзисторов с согласованными характеристиками, электрическая схема которого представлена на рис. 35.1.

**Дифференциальный усилитель.** В линейной схемотехнике дифференциальный усилитель находит широкое применение как самостоятельный функциональный элемент. Наряду с этим он является основой для многочисленных разработок усилительных микросхем с дифференциальными входами. Типичные схемы дифференциального элемента, выполненного на основе схемы (рис. 35.1), представлены на рис. 35.2. Обе схемы содержат пару транзисторов $T_1$ и $T_2$ с согласованными параметрами (идентичность параметров в диапазоне эксплуатационных воздействий и температуры достигается изготовлением транзисторов на общей активной подложке как единого активного элемента) с коллекторными нагрузками $R_К$ и генератором тока, выполненным на транзисторе $T_3$, включенным в эмиттерные цепи транзисторов $T_1$ и $T_2$. Стабильность работы генератора тока обеспечивается постоянством коллекторного тока $I_0$ за счет подачи постоянного тока смещения на базу $T_3$. Стабилизация режима и компенсация температурных погрешностей осуществляется с помощью цепи, включающей резисторы $R_2$, $R_3$ и диод $Д$.

Использованием генератора тока в дифференциальном входном каскаде достигается стабилизация потенциалов $U_1$ и $U_2$ (рис. 35.2, *а*) на выходах при действии на его входах синфазных сигналов. Этот эффект обеспечивает фиксацию положения рабочих точек транзисторов $T_1$ и $T_2$, благодаря чему сохраняется постоянство коэффициентов усиления независимо от уровней входных сигналов и подавление синфазных помех, связанных с дрейфом выходных параметров транзисторов $T_1$ и $T_2$. Это позволяет использовать в качестве выходного сигнала не только разность потенциалов $U_1$ и $U_2$ (симметричный выход), но и один из них (несимметричный, заземленный выход), что весьма существенно при создании многокаскадных операционных усилителей.

Для подавления синфазных помех в схему дифференциального усилителя вводится цепь отрицательной обратной связи, по которой подается напряжение, снимаемое со средней точки резистивного делителя $R_1$—$R_2$, в цепь базы транзистора $T_3$ (рис. 35.2, *б*). В этом случае напряжение в средней точке резистивного делителя в цепи коллекторов транзисторов $T_1$—$T_2$ определяется полным напряжением синфазной составляющей, в то время как для разностного входного сигнала (парафазная составляющая) средняя точка делителя имеет нулевой потенциал, благодаря чему обеспечивается постоянство коэффициента усиления по отношению к полезному сигналу.

Схемы дифференциальных усилителей (см. рис. 35.2) обеспечивают высокое значение коэффициента подавления синфазной помехи, показывающего, во сколько раз синфазные входные сигналы превышают дифференциальный сигнал при получении одного и того же выходного напряжения.

Существенным недостатком дифференциальных усилителей является сравнительно низкое входное сопротивление и большой входной ток. Это учитывается

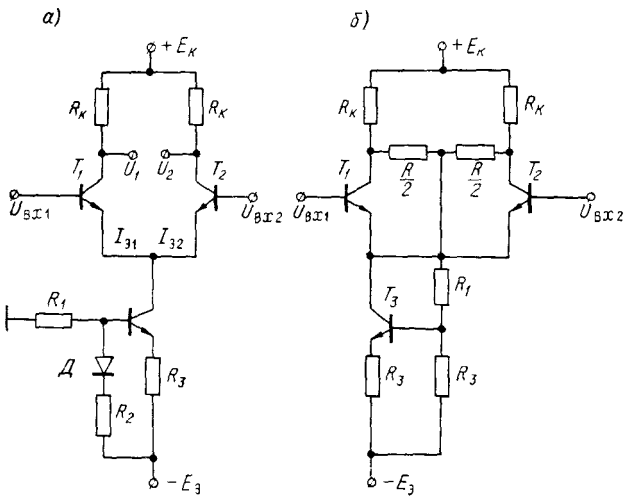



Рис. 35.2. Схемы дифференциальных усилителей с питанием от транзисторного источника тока.

при разработке операционных усилителей, где вместо транзисторов $T_1$ и $T_2$ используются составные транзисторы (схема Дарлингтона, представленная на рис. 35.3).

**Интегральные операционные усилители.** Как обычные операционные усилители, выполненные на электровакуумных или полупроводниковых усилитель-

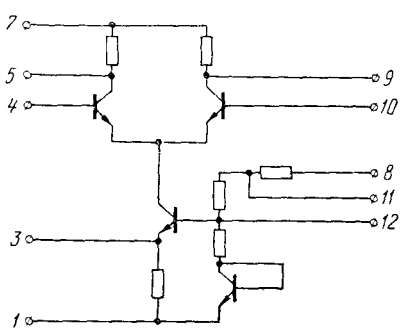



Рис. 35.3. Однокаскадный дифференциальный усилитель 1УТ221 (А, Б, В).

ных и дискретных пассивных элементах, так и полупроводниковые (монолитные) интегральные операционные усилители представляют собой высококачественные усилительные схемы с дифференциальными входами. Их характерной особенностью является отсутствие выходного сигнала при нулевом входном сигнале (дрейф нуля близок к нулю), что дает возможность каскадного включения усилительных схем и позволяет охватывать или часть из них, или полностью все усилительные каскады цепями обратной связи различного функционального вида.

Отечественной промышленностью разработаны и серийно выпускаются линейные интегральные микросхемы значительного количества типов, объединенные по аналогии с логическими микросхемами в серии (комплексы). В номенклатуру серий линейных микросхем, как правило, входят дифференциальные, операционные, низкочастотные, промежуточной и высокой частоты усилители малой мощности, мощные выходные и согласующие усилители, ждущие и автоколебательные генераторы и аналоговые интегральные переключатели. Многие из этих функциональных интегральных элементов по своей физической сущности и передаточной функции являются сугубо нелинейными, однако, условно все они относятся к линейным микросхемам, так как оперируют непрерывными (аналоговыми) потенциальными сигналами, в отличие от логических микросхем, оперирующими дискретными, сугубо импульсными входными сигналами. На рис. 33.2 показаны зоны насыщения (логическая «1»), отсечки, используемые для логической схемотехники, и линейная зона работы для аналоговых интегральных микросхем.

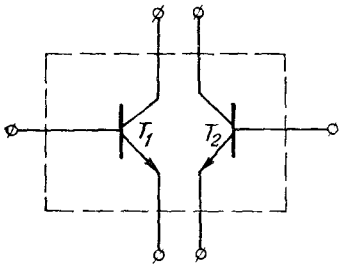



Рис. 35.1. Активный интегральный компонент аналоговых микросхем.

В качестве основного элемента всех перечисленных выше аналоговых интегральных микросхем служит единый активный интегральный компонент — пара транзисторов с согласованными характеристиками, электрическая схема которого представлена на рис. 35.1.

**Дифференциальный усилитель.** В линейной схемотехнике дифференциальный усилитель находит широкое применение как самостоятельный функциональный элемент. Наряду с этим он является основой для многочисленных разработок усилительных микросхем с дифференциальными входами. Типичные схемы дифференциального элемента, выполненного на основе схемы (рис. 35.1), представлены на рис. 35.2. Обе схемы содержат пару транзисторов $T_1$ и $T_2$ с согласованными параметрами (идентичность параметров в диапазоне эксплуатационных воздействий и температуры достигается изготовлением транзисторов на общей активной подложке как единого активного элемента) с коллекторными нагрузками $R_К$ и генератором тока, выполненным на транзисторе $T_3$, включенным в эмиттерные цепи транзисторов $T_1$ и $T_2$. Стабильность работы генератора тока обеспечивается постоянством коллекторного тока $I_0$ за счет подачи постоянного тока смещения на базу $T_3$. Стабилизация режима и компенсация температурных погрешностей осуществляется с помощью цепи, включающей резисторы $R_2$, $R_3$ и диод $Д$.

Использованием генератора тока в дифференциальном входном каскаде достигается стабилизация потенциалов $U_1$ и $U_2$ (рис. 35.2, *а*) на выходах при действии на его входах синфазных сигналов. Этот эффект обеспечивает фиксацию положения рабочих точек транзисторов $T_1$ и $T_2$, благодаря чему сохраняется постоянство коэффициентов усиления независимо от уровней входных сигналов и подавление синфазных помех, связанных с дрейфом выходных параметров транзисторов $T_1$ и $T_2$. Это позволяет использовать в качестве выходного сигнала не только разность потенциалов $U_1$ и $U_2$ (симметричный выход), но и один из них (несимметричный, заземленный выход), что весьма существенно при создании многокаскадных операционных усилителей.

Для подавления синфазных помех в схему дифференциального усилителя вводится цепь отрицательной обратной связи, по которой подается напряжение, снимаемое со средней точки резистивного делителя $R_1$—$R_2$, в цепь базы транзистора $T_3$ (рис. 35.2, *б*). В этом случае напряжение в средней точке резистивного делителя в цепи коллекторов транзисторов $T_1$—$T_2$ определяется полным напряжением синфазной составляющей, в то время как для разностного входного сигнала (парафазная составляющая) средняя точка делителя имеет нулевой потенциал, благодаря чему обеспечивается постоянство коэффициента усиления по отношению к полезному сигналу.

Схемы дифференциальных усилителей (см. рис. 35.2) обеспечивают высокое значение коэффициента подавления синфазной помехи, показывающего, во сколько раз синфазные входные сигналы превышают дифференциальный сигнал при получении одного и того же выходного напряжения.

Существенным недостатком дифференциальных усилителей является сравнительно низкое входное сопротивление и большой входной ток. Это учитывается

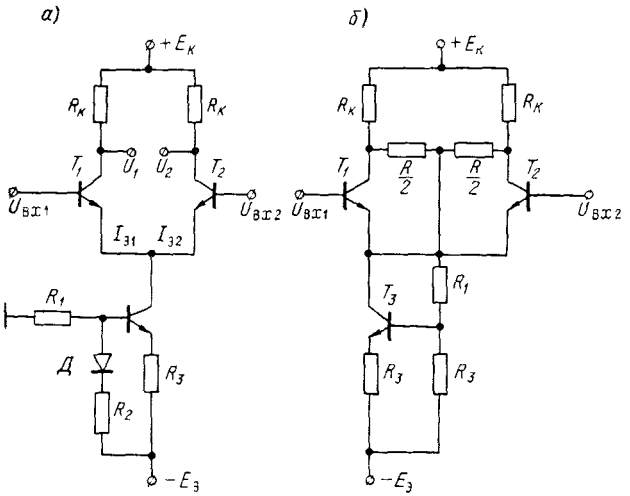



Рис. 35.2. Схемы дифференциальных усилителей с питанием от транзисторного источника тока.

при разработке операционных усилителей, где вместо транзисторов $T_1$ и $T_2$ используются составные транзисторы (схема Дарлингтона, представленная на рис. 35.3).

**Интегральные операционные усилители.** Как обычные операционные усилители, выполненные на электровакуумных или полупроводниковых усилитель-

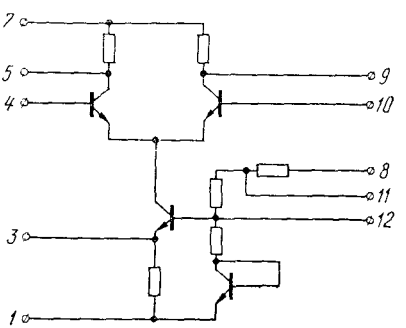



Рис. 35.3. Однокаскадный дифференциальный усилитель 1УТ221 (А, Б, В).

ных и дискретных пассивных элементах, так и полупроводниковые (монолитные) интегральные операционные усилители представляют собой высококачественные усилительные схемы с дифференциальными входами. Их характерной особенностью является отсутствие выходного сигнала при нулевом входном сигнале (дрейф нуля близок к нулю), что дает возможность каскадного включения усилительных схем и позволяет охватывать или часть из них, или полностью все усилительные каскады цепями обратной связи различного функционального вида.

В отличие от всех других усилителей полупроводниковые интегральные микросхемные операционные усилители обладают значительно большей точностью и стабильностью характеристик, что достигается схемотехнической особенностью использования свойств парности или согласованности параметров компонентов, выполненных в едином технологическом цикле на однородной полупроводниковой подложке микросхемы. Как было показано выше, в микросхеме операционного усилителя составной входной частью является дифференциальный каскад, обеспечивающий малый дрейф нулевого уровня, высокий коэффициент усиления по напряжению при малых коллекторных токах, высокое входное сопротивление.

В целях дополнительного усиления входного сигнала второй составной частью усилителя является промежуточный каскад, который обеспечивает необходимое нагрузочное сопротивление для возможно большего усиления сигнала первого каскада и оптимального согласования параметров с компенсатором уровня.

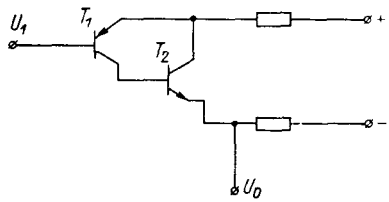



Рис. 35.4. Схема компенсации уровня постоянной составляющей.

Во многих случаях этот каскад также выполняется по дифференциальной схеме с нереверсивным выходом. С учетом того, что сигнал на выходе промежуточного каскада имеет постоянную составляющую, для согласования с выходным каскадом в схеме усилителя предусматривается компенсатор уровня постоянной составляющей, выполняемый с использованием различных элементов (стабилитронов, схемно объединенных транзисторов *p-n-p* и *n-p-n* и т. п.).

Схема компенсации уровня постоянной составляющей, выполненная на транзисторах с противоположными типами проводимости, представлена на рис. 35.4. Выходной каскад усилителя выполняется на транзисторах одного или противоположного типов проводимости. Для упрощения компенсации дрейфа нуля и постоянной составляющей напряжения в нагрузке большинство операционных усилителей питается от симметричных источников напряжения.

В настоящее время серийно выпускаются несколько типов операционных усилителей серии 140 (1УТ401А, Б; 1УТ402; 1УТ403) и др. Электрическая схема усилителя 1УТ401 представлена на рис. 35.5. Входной дифференциальный каскад усилителя выполнен на транзисторах $T_2$ и $T_3$ и питается от генератора тока ($T_1$). Смещение на базы $T_1$ и $T_8$ подается от цепи, содержащей $T_9$ в диодном включении, компенсирующем изменение напряжения между базой и эмиттером транзисторов $T_1$ и $T_8$ при изменении температуры ($T_1$ и $T_9$ обладают согласованными характеристиками вследствие одинаковой геометрии и близкого расположения на поверхности полупроводниковой подложки — кристалла кремния). Второй каскад усилителя представлен транзисторами $T_4$ и $T_5$. Последний работает в обычной схеме с общим эмиттером. Транзистор $T_4$ включен в цепь второго плеча дифференциального каскада и симметрирует коллекторные токи $T_2$ и $T_3$. Наряду с этим $T_4$ обеспечивает добавочное усиление (примерно в 2 раза). Транзисторы $T_6$ и $T_8$ образуют каскад сдвига уровня. Выходной каскад представлен транзистором $T_7$. Резистор $R_7$ подключен к части эмиттерной нагрузки $T_8$, обеспечивая некоторую положительную обратную связь, увеличивающую усиление выходного каскада.

**Линейные полупроводниковые интегральные микросхемы серии 122 («Индукция-2»).** Полупроводниковые интегральные микросхемы, входящие в состав серии 122, представляют собой совокупность усилительных и импульсных схем, предназначенных для работы в аналоговых устройствах радиоэлектронной аппаратуры. По своим показателям надежности все микросхемы серии могут широко использоваться в судовых системах автоматики.

В серию входят 5 основных типов микросхем и их модификации, отличающиеся между собой источниками питания, коэффициентами усиления и другими параметрами, хотя каждый из основных типов и его модификации имеют одну и ту же электрическую схему. В серии имеются дифференциальные усилители (1УТ221 А—В), имеющие потенциальную составляющую смещения нуля не более 1—2 мВ при температурном дрейфе не более 5 мкВ/°С; разность входных токов усилителя 0,1—1,0 мкА; температурный дрейф тока 10—100 нА/°С; коэффициент ослабления синфазной помехи до 100—120 дБ. Наличие в серии однокаскадного усилителя типа 1УТ221 (А—В), электрическая схема которого приведена на рис. 35.3, позволяет совместно с другими микросхемами серии компоновать

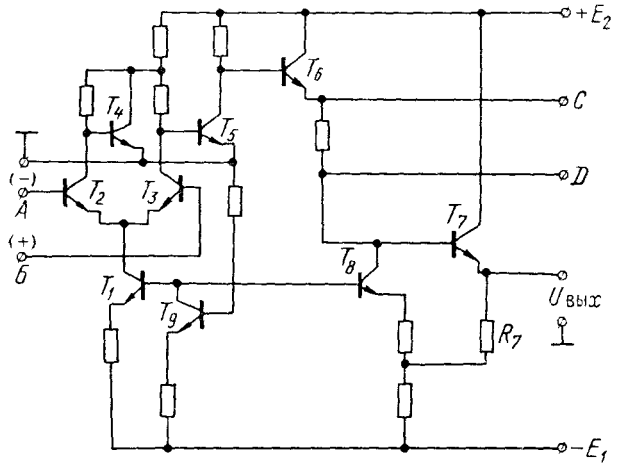



Рис. 35.5. Операционный усилитель 1УТ401 (А, Б).

*А* — инвертирующий вход; *Б* — неинвертирующий вход; *С* — дифференцирующая цепь; *D* — интегрирующая цепь; *С—D* — клеммы цепи частотной компенсации.

более сложные функциональные устройства аналоговой автоматики. Номенклатура микросхем серии 122 и их основные электрические параметры указаны в табл. 35.2. Электрические схемы двухкаскадного усилителя типа 1УС221 и каскодного усилителя типа 1УС222 приведены на рис. 35.6 и 35.7. На рис. 35.8 представлена схема триггера Шмитта К1ТШ221 (А—Д). Микросхемы серии 122 конструктивно оформлены в цилиндрическом металлостеклянном корпусе типа 401МС12-1 с 12 выводами, расположенными по кругу.

Для предварительного усиления низкочастотных сигналов (полоса 0,02—100 кГц) различных устройств судовой радиоэлектронной аппаратуры могут быть применены полупроводниковые интегральные микросхемы типа 1УС231, входящие в *серию 123* (*«Рябина»*). Серия состоит из трех модификаций, микросхем (А—В), отличающихся между собой только коэффициентом усиления. Конструктивно микросхемы этой серии оформлены в плоском металлополимерном корпусе типа 101МП14-1 с 14 планарными выводами. Электрическая схема усилителя низкой частоты 1УС231 (А—В) приведена на рис. 35.9, основные его параметры — в табл. 35.2.

**Полупроводниковые интегральные микросхемы операционных усилителей серий 140 (*«Исток» и «Имбирь»*), 150 (*«Иероглиф»*) и других.** Операционный усилитель 1УТ401 служит базовым интегрально-схемным элементом для усилительных схем переменного тока, усилителей-ограничителей, активных линий задержки.

В отличие от всех других усилителей полупроводниковые интегрально-микросхемные операционные усилители обладают значительно большей точностью и стабильностью характеристик, что достигается схемотехнической особенностью использования свойств парности или согласованности параметров компонентов, выполненных в едином технологическом цикле на однородной полупроводниковой подложке микросхемы. Как было показано выше, в микросхеме операционного усилителя составной входной частью является дифференциальный каскад, обеспечивающий малый дрейф нулевого уровня, высокий коэффициент усиления по напряжению при малых коллекторных токах, высокое входное сопротивление.

В целях дополнительного усиления входного сигнала второй составной частью усилителя является промежуточный каскад, который обеспечивает необходимое нагрузочное сопротивление для возможно большего усиления сигнала первого каскада и оптимального согласования параметров с компенсатором уровня.

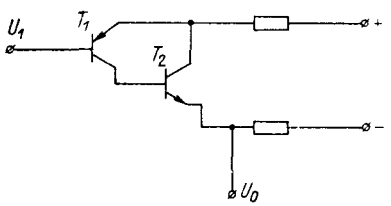



Рис. 35.4. Схема компенсации уровня постоянной составляющей.

Во многих случаях этот каскад также выполняется по дифференциальной схеме с нереверсивным выходом. С учетом того, что сигнал на выходе промежуточного каскада имеет постоянную составляющую, для согласования с выходным каскадом в схеме усилителя предусматривается компенсатор уровня постоянной составляющей, выполняемый с использованием различных элементов (стабилитронов, схемно объединенных транзисторов *p-n-p* и *n-p-n* и т. п.).

Схема компенсации уровня постоянной составляющей, выполненная на транзисторах с противоположными типами проводимости, представлена на рис. 35.4. Выходной каскад усилителя выполняется на транзисторах одного или противоположного типов проводимости. Для упрощения компенсации дрейфа нуля и постоянной составляющей напряжения в нагрузке большинство операционных усилителей питается от симметричных источников напряжения.

В настоящее время серийно выпускаются несколько типов операционных усилителей серии 140 (1УТ401А, Б; 1УТ402; 1УТ403) и др. Электрическая схема усилителя 1УТ401 представлена на рис. 35.5. Входной дифференциальный каскад усилителя выполнен на транзисторах $T_2$ и $T_3$ и питается от генератора тока ($T_1$). Смещение на базы $T_1$ и $T_8$ подается от цепи, содержащей $T_9$ в диодном включении, компенсирующем изменение напряжения между базой и эмиттером транзисторов $T_1$ и $T_8$ при изменении температуры ($T_1$ и $T_9$ обладают согласованными характеристиками вследствие одинаковой геометрии и близкого расположения на поверхности полупроводниковой подложки — кристалла кремния). Второй каскад усилителя представлен транзисторами $T_4$ и $T_5$. Последний работает в обычной схеме с общим эмиттером. Транзистор $T_4$ включен в цепь второго плеча дифференциального каскада и симметрирует коллекторные токи $T_2$ и $T_3$. Наряду с этим $T_4$ обеспечивает добавочное усиление (примерно в 2 раза). Транзисторы $T_6$ и $T_8$ образуют каскад сдвига уровня. Выходной каскад представлен транзистором $T_7$. Резистор $R_7$ подключен к части эмиттерной нагрузки $T_8$, обеспечивая некоторую положительную обратную связь, увеличивающую усиление выходного каскада.

**Линейные полупроводниковые интегральные микросхемы серии 122 («Индукция-2»).** Полупроводниковые интегральные микросхемы, входящие в состав серии 122, представляют собой совокупность усилительных и импульсных схем, предназначенных для работы в аналоговых устройствах радиоэлектронной аппаратуры. По своим показателям надежности все микросхемы серии могут широко использоваться в судовых системах автоматики.

В серию входят 5 основных типов микросхем и их модификации, отличающиеся между собой источниками питания, коэффициентами усиления и другими параметрами, хотя каждый из основных типов и его модификации имеют одну и ту же электрическую схему. В серии имеются дифференциальные усилители (1УТ221 А—В), имеющие потенциальную составляющую смещения нуля не более 1—2 мВ при температурном дрейфе не более 5 мкВ/°С; разность входных токов усилителя 0,1—1,0 мкА; температурный дрейф тока 10—100 нА/°С; коэффициент ослабления синфазной помехи до 100—120 дБ. Наличие в серии однокаскадного усилителя типа 1УТ221 (А—В), электрическая схема которого приведена на рис. 35.3, позволяет совместно с другими микросхемами серии компоновать

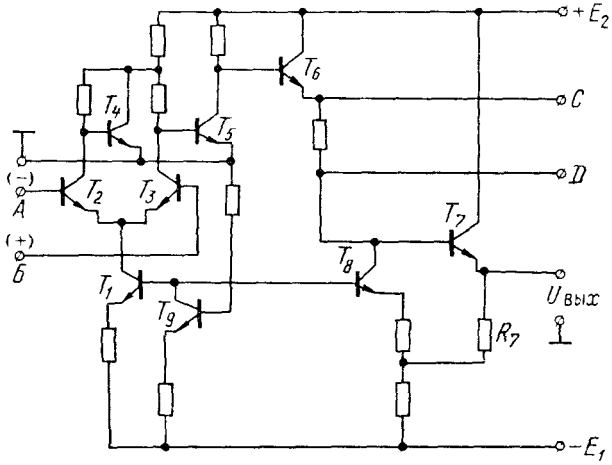



Рис. 35.5. Операционный усилитель 1УТ401 (А, Б).

*А* — инвертирующий вход; *Б* — неинвертирующий вход; *С*—дифференцирующая цепь; *D* — интегрирующая цепь; *С—D* — клеммы цепи частотной компенсации.

более сложные функциональные устройства аналоговой автоматики. Номенклатура микросхем серии 122 и их основные электрические параметры указаны в табл. 35.2. Электрические схемы двухкаскадного усилителя типа 1УС221 и каскодного усилителя типа 1УС222 приведены на рис. 35.6 и 35.7. На рис. 35.8 представлена схема триггера Шмитта К1ТШ221 (А—Д). Микросхемы серии 122 конструктивно оформлены в цилиндрическом металлостеклянном корпусе типа 401МС12-1 с 12 выводами, расположенными по кругу.

Для предварительного усиления низкочастотных сигналов (полоса 0,02—100 кГц) различных устройств судовой радиоэлектронной аппаратуры могут быть применены полупроводниковые интегральные микросхемы типа 1УС231, входящие в *серию 123* (*«Рябина»*). Серия состоит из трех модификаций, микросхем (А—В), отличающихся между собой только коэффициентом усиления. Конструктивно микросхемы этой серии оформлены в плоском металлополимерном корпусе типа 101МП14-1 с 14 планарными выводами. Электрическая схема усилителя низкой частоты 1УС231 (А—В) приведена на рис. 35.9, основные его параметры — в табл. 35.2.

**Полупроводниковые интегральные микросхемы операционных усилителей серий 140 (*«Исток»* и *«Имбирь»*), 150 (*«Иероглиф»*) и других.** Операционный усилитель 1УТ401 служит базовым интегрально-схемным элементом для усилительных схем переменного тока, усилителей-ограничителей, активных линий задержки.

*Таблица 35.2*

**Основные электрические параметры линейных (аналоговых) интегральных микросхем серий 122, 123, 140, 150, 153 и 105**

| Тип микросхем | Функциональное назначение | Напряжение питания, В | Входное сопротивление (не менее), кОм | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение входного сигнала, В | | Коэффициент усиления по напряжению * | Напряжение смещения нуля (не более), мВ | Температурный дрейф смещения нуля, мкВ/°С | Выходное сопротивление, кОм | Полоса пропускания, кГц | Частота следования импульсов, кГц |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | синфазное | дифференциальное | | | | | | |
| **Серия 122 («Индукция-2»)** | | | | | | | | | | | | |
| 1УТ221А | Однокаскадный дифференциальный усилитель | ±4 | 6 | — | ±2 | −2÷+1 | 15—26 | ±5 | | | | |
| 1УТ221Б | | ±6,3 | 3 | — | ±3 | −3÷+1 | 24—40 | ±10 | ±25 | 3—7 | — | 5 000 |
| 1УТ221В | | ±6,3 | 6 | — | ±3 | −3÷+1 | 24—40 | ±5 | | | | |
| 1УС221А | Двухкаскадный усилитель | +6,3 | 0,1—0,2 | — | 1,2 | — | 400—800 | — | — | 1,2—3 | — | 12 000 |
| 1УС221Б | | | | | | | 600—1200 | | | | | |
| 1УС221В | Двухкаскадный усилитель | 12,6 | 0,1—0,2 | — | 1,2 | — | 500—1000 | — | — | 1,2—3 | — | 12 000 |
| 1УС221Г | | | | | | | 800—1600 | | | | | |
| 1УС221Д | | | | | | | 1200—2400 | | | | | |
| 1УС22А | Каскодный усилитель | 4 | 1,0 | 0,1 | 0,1 | — | 20—40 | — | — | 1,2—3 | — | 30 000 |
| 1УС22Б | | +6,3 | | 0,05 | 0,1 | — | 30—60 | — | — | | — | |
| 1УС22В | | 6,3 | | 0,05 | 0,05 | — | 45—90 | — | — | | — | |
| К1ТШ221А | Триггер Шмитта | ±3 | Максимальный ток входного сигнала, мкА | | 20 | Напряжение выходного сигнала, В | | −0,05; +2,7 | — | — | — | — |
| К1ТШ221Б | | ±4 | | | 40 | | | −0,05; +3,7 | — | — | — | — |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| К1ТШ221В | Триггер Шмитта | ±4 | Максимальный ток входного сигнала, мкА | | 20 | Напряжение выходного сигнала, В | | —0,05; +3,7 | — | — | — | — |
| К1ТШ221Г | | ±6,3 | | | 40 | | | +0,3, +5,95 | — | — | — | — |
| К1ТШ221Д | | | | | 20 | | | +0,3; +5,95 | — | — | — | — |
| К1УБ221А | Видеоусилитель | +6,3 | — | — | — | — | 900 | — | — | — | — | 12 000 |
| К1УБ221Б | | +12,6 | — | — | — | — | 1300 | — | — | — | — | |
| К1УБ221В | | | — | — | — | — | 1500 | — | — | — | — | |
| К1УБ221Г | | | — | — | — | — | 2800 | — | — | — | — | |
| **Серия 123 («Рябина»)** | | | | | | | | | | | | |
| 1УС231А | Усилитель низкой частоты | +6,3 | 10 | — | — | — | 300 | 0,5 | — | 100 | 0,02—100 | — |
| 1УС231Б | | | | — | — | — | 100 | | — | | | — |
| 1УС231В | | | | — | — | — | 30 | | — | | | — |
| **Серия 140 («Исток»—«Имбирь»)** | | | | | | | | | | | | |
| 1УТ401(А,Б) | Операционный усилитель (параметры без обратной связи) | ±6,3 | 4,7 | | 3—4 | — | 2 000—10 500 | — | | 3 | 200 | — |
| 1УТ402 | Операционный усилитель средней мощности | ±12,6 | 150 | | 6—7 | — | 35 000—150 000 | — | 20 | 1 | 100 | — |
| 1УТ403 | Операционный усилитель с мощным выходным каскадом | 6,3 | 150 | | ±10 | — | 1 000 | — | | — | 500 | $\Delta I$ = 10 мкА |

*Продолжение табл 35 2*

| Тип микросхем | Функциональное назначение | Напряжение питания, В | Входное сопротивление (не менее), кОм | Потребляемая мощность (не более), мВт | Напряжение входного сигнала, В | | Коэффициент усиления по напряжению * | Напряжение смещения нуля (не более), мВ | Температурный дрейф смещения нуля, мкВ/°С | Выходное сопротивление, кОм | Полоса пропускания, кГц | Частота следования импульсов, кГц |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | синфазное | дифференциальное | | | | | | |
| | | | | Серия 150 («Иероглиф») | | | | | | | | |
| 1УТ501 | Операционный усилитель с мощным выходом | 6,3 | 1,0 | | ±9 | — | 10 | На нагрузке 50 Ом $P_{вых}$ = 1,6 Вт | | | | |
| 1УТ405А1 | Операционные усилители серии 140 | ±6 | 150 | 6 мА | — | — | (0,5—3)×$\times 10^3$ | — | 10—30 | — | — | — |
| 1УТ405А2 | | ±6 | 15 | 6 мА | — | — | (0,8—5)×$\times 10^3$ | — | 5—15 | — | — | — |
| 1УТ405А3 | | ±12 | 100 | 6 мА | — | — | (1,5—9)×$\times 10^3$ | — | 10—30 | — | — | — |
| 1УТ405Б | То же | ±12 | 10 | 12 мА | — | — | (2,5—15) $10^3$ | — | 5—15 | — | — | — |
| 1УТ531 | Операционный усилитель серии 153 | ±(9—12) | 100—400 | — | ±(10—13) | — | (20—80)·$10^3$ | — | 30 | 2,0 | — | — |
| 1УТ051А | Операционный усилитель серии 105 | ±12 | 500 | 3—5мА | ±(10,2—10,8) | — | (25—150) $10^3$ | — | 2—10 | — | | |
| 1УТ051Б | | ±12 | 500 | | ±(10 2—10,8) | — | (25—150) $10^3$ | — | 2—15 | — | — | — |

* Измерено на частоте 12 кГц

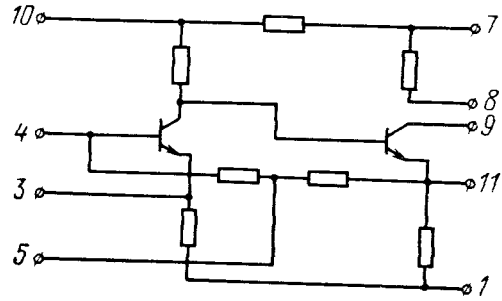



Рис. 35 6 Двухкаскадный усилитель 1УС221 (А—Д).

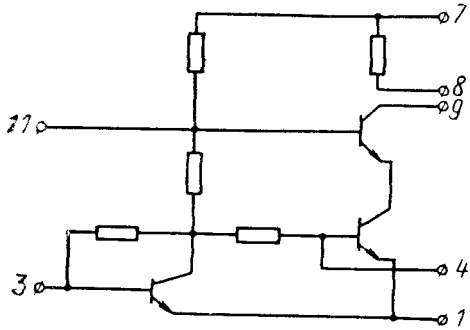



Рис 35.7. Каскодный усилитель 1УС222 (А—В).

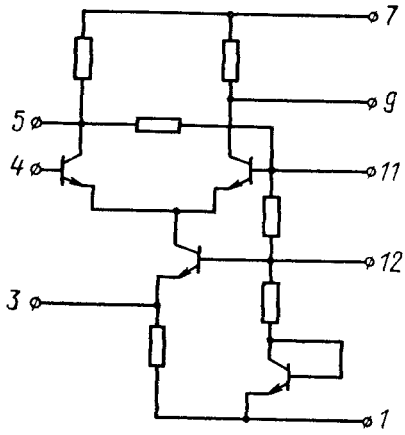



Рис. 35.8 Триггер Шмитта К1ТШ221 (А—Д)

Интегральная схема 1УТ402 является основой для усилителей постоянного и переменного тока со средним уровнем выходной мощности. Эту схему наиболее целесообразно использовать в интегрирующем режиме. Однако на основе операционных усилителей можно создавать и функциональные устройства, реализующие практически все вычислительные операции (сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование, изменение знака, масштабирование, вычисление дробных и целочисленных степеней), а также сравнение, преобразование и стабилизацию сигналов. Путем последовательного соединения простейших интегрирующих, апериодических, колебательных и других звеньев на основе операционных усилителей можно реализовать сложные передаточные функции со многими полюсами, т. е. формировать активные фильтры. В отличие от первых двух типов операционных усилителей, микросхема 1УТ403 имеет мощный выходной каскад, обеспечивающий ток нагрузки до 200 мА.

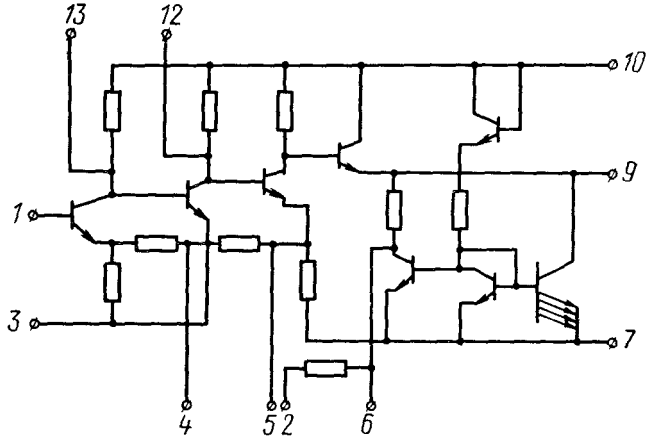



Рис. 35.9. Усилитель низкой частоты 1УС231 (А—В).

Серия 150 имеет основную интегральную микросхему 1УТ501, представляющую собой операционный усилитель с мощным выходным каскадом (выходная мощность 1,5 Вт). На основе интегральных схем операционных усилителей серий 140 и 150 выполняются многочисленные аналоговые функциональные устройства систем автоматики. Все схемные преобразования осуществляются вне корпуса микросхем путем подключения к выводам дискретных электрорадиоэлементов (на входе и в цепи обратной связи). Комбинирование величин сопротивлений резисторов, емкостей конденсаторов, диодно-резистивных и диодно-емкостных сборок на основе схемы операционного усилителя легко компонуются:

— инвертор-повторитель $k_v = -1$;

— инвертор-повторитель с балансным выходом

$$\Delta U = U_1 - U_2 = -2U_1;$$

— инвертирующий сумматор

$$U_{вых} = U_1 + U_2 + \cdots + U_n \text{ или}$$
$$U_{вых} = -(k_1U_1 + k_2U_2 + \cdots + k_nU_n);$$

— инвертор с переменным коэффициентом усиления (потенциометр в цепи обратной связи)

$$U_{вых} = -\frac{\rho}{1-\rho}U_{вх};$$

— инвертор-усилитель с линейной зависимостью усиления от положения движка потенциометра

$$U_{\text{вых}} = -\rho k U_{\text{вх}};$$

— повторитель сигнала с усилением, равным единице,

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}};$$

— повторитель сигнала с усилением, большим единицы,

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}(1 + k);$$

— неинвертирующий сумматор

$$U_{\text{вых}} = (1 + k)\frac{U_1 + U_2 + \cdots + U_n}{n};$$

— вычитающее устройство-повторитель

$$U_{\text{вых}} = U_2 - U_1;$$

— вычитающее устройство-усилитель

$$U_{\text{вых}} = n(U_2 - U_1);$$

— аналоговый интегратор (емкость в цепи обратной связи)

$$W(p) = \frac{k}{p};$$

— дифференцирующая схема (емкость во входной цепи)

$$W(p) = kp,$$

— компаратор

$$U_{\text{вых}} < 0 \text{ при } U_1 > U_0;\ U_{\text{вых}} > 0 \text{ при } U_1 < U_0$$

$$\text{или } U_{\text{вых}} > 0 \text{ при } U_1 - U_2 < 0;\ U_{\text{вых}} < 0 \text{ при } U_1 - U_2 > 0;$$

— логарифмический усилитель (диод в цепи обратной связи);

— усилитель, вычисляющий антилогарифмы (диод в цепи входа);

— логарифмический умножитель (комбинация логарифмического усилителя, сумматора и усилителя, вычисляющего антилогарифмы).

С учетом значительной рассеиваемой мощности микросхемы типов 1УТ401—1УТ403 и 1УТ501 конструктивно оформлены в прямоугольный корпус типа 252МС15-1 (с размерами 19,7×14,5×3 мм) металлостеклянной конструкции с 15 жесткими выводами вниз. Номенклатура и основные электрические параметры микросхем серий 140 и 150 приведены в табл. 35.2.

**Линейные схемы управления магнитными запоминающими устройствами серии 146 («Исполин-2»).** Для нормальной работы запоминающего устройства ЦВМ, использующего магнитные элементы хранения информации, необходимо иметь ряд (серию) интегральных микросхем управления и считывания. К их числу относятся формирователи разрядных токов, формирователи адресных токов, усилители считывания на различные напряжения срабатывания (10—20 мВ). Если к первым двум усилителям управления особых требований не предъявляется (кроме обеспечения временной диаграммы разрядных и адресных токов и их мощности), то к усилителю считывания предъявляется ряд жестких требований, выполнение которых обеспечивает вывод информации без помех. Возникновение помехи обусловлено как физикой работы самого запоминающего устройства в процессе переключения магнитных элементов, так и различного рода наводками и шумами.

Выделение полезных сигналов на фоне помех производится пороговой схемой, входящей в состав усилителя считывания. Величина порога зависит от конструкции запоминающего устройства. На выходе усилителя должны формироваться одинаковые по форме выходные импульсы заданной полярности, очищенные от помех, наводок и шумов. Этим требованиям отвечает усилитель считывания, выполненный по дифференциальной входной схеме, позволяющей усиливать импульсы любой полярности и подавлять синфазные помехи. С учетом того,

что для каждого конкретного запоминающего устройства определен оптимальный пороговый уровень, зависящий от геометрических размеров сердечников запоминающего устройства, усилитель должен иметь регулируемый пороговый уровень.

Серия 146 полупроводниковых интегральных микросхем управления магнитными запоминающими устройствами ЦВМ содержит формирователи разрядных токов типа 1КТ461 (рис. 35.10), формирователи адресных токов типа 1КТ462—1КТ464 (рис. 35.11), усилители считывания 1УИ461 на напряжение срабатывания 20 мВ (рис. 35.12) и 1УП462 на напряжение срабатывания 10 мВ.

Микросхемы 1КТ462 (А—Г)—1КТ464 (А—Г) имеют общую электрическую схему и различаются между собой только выходными параметрами и соответствующей коммутацией входов и выходов: 1КТ462 — как показано на рис. 35.11, с дифференциальным включением нагрузок $R_{н1}$ и $R_{н2}$ на выходы *1* и *2*; 1КТ463 — вход *10*; выход *2*; 1КТ464 — вход *11*, выход *12*.

Все микросхемы серии 146 предназначены для совместной работы с логическими микросхемами серий 121, 130, 133, 134, 136, 152 и 155, технические характеристики и функциональный состав которых приведены выше.

Схема усилителя считывания 1УИ461 (рис. 35.12) включает в себя три дифференциальных каскада. Первый из них — входной ($T_1$, $T_3$) — выполнен по обычной схеме с питанием от генератора тока $T_2$. Резисторы $R_1$, $R_2$ обеспечивают низкий входной импеданс схемы, приблизительно соответствующий типовому значению выходного импеданса обмотки считывания запоминающего устройства. Сигналы (и помехи) с выхода входного каскада попадают на второй дифференциальный каскад усиления, транзисторы которого ($T_5$, $T_6$) заперты смещением, подаваемым через транзистор $T_{10}$ и резисторы $R_{17}$, $R_3$, $R_4$, $R_8$, $R_{10}$. Изменяя величину этого смещения, можно регулировать порог срабатывания усилителя. Выходом схемы является последний дифференциальный каскад ($T_7$, $T_9$), выведенный на контакт *2*.

Функциональный состав линейных полупроводниковых микросхем серии 146 и их основные электрические параметры приведены в табл. 35.3.

Конструктивно все микросхемы серии оформлены в цилиндрическом металлостеклянном корпусе типа 401МС12-1.

Для передачи логических сигналов ЦВМ по кабельной линии длиной до 30 м с волновым сопротивлением 75 Ом используется *магистральный усилитель 1ЛИ211* («*Инструмент МУ*»), хорошо согласующий выходные интегральные схемы серий 130, 133, 134 и 136 с индуктивно-емкостной нагрузкой. Электрическая схема усилителя 1ЛИ211 представлена на рис. 35.13. Основные параметры усилителя приведены в табл. 35.3. По функциональной структуре данная микросхема представляет собой логический элемент диодно-транзисторной логики, реализующий функцию И. Конструктивно он оформлен в корпусе 401МС12-1.

**Аналоговые интегральные переключатели серий 101 («Иртыш») и 124 («Ильмень»).** Коммутация слабых сигналов постоянного и переменного тока в многоканальной радиоэлектронной аппаратуре осуществляется различными ключевыми схемами. Все они должны отвечать жестким требованиям по устойчивости к внешним механическим и климатическим воздействиям, иметь большой срок службы и обеспечивать частоту коммутации до сотен килогерц. Кроме того, ключи не должны вносить помехи в коммутируемые ими цепи. Наиболее полно этим требованиям отвечает полупроводниковый интегральный переключатель серии 101 типа 1КТ011 (А—Г), электрическая схема которого представлена на рис. 35.14.

Интегральный переключатель имеет низкое сопротивление коллектора, высокие и стабильные коэффициенты передачи тока для нормального и инверсного включений и малые токи утечки эмиттера, что достигается использованием в качестве исходного материала эпитаксиальных структур, состоящих из низкоомной кремниевой подложки и эпитаксиального слоя кремния того же типа проводимости, но с более высоким удельным сопротивлением. Существенный недостаток такого ключа на биполярных транзисторах — отсутствие гальванической развязки между входной и выходной цепями. Этот недостаток устраняется с помощью трансформатора во входной цепи переключателя. Изготовлением транзисторов ключа в едином технологическом цикле достигается высокая идентичность

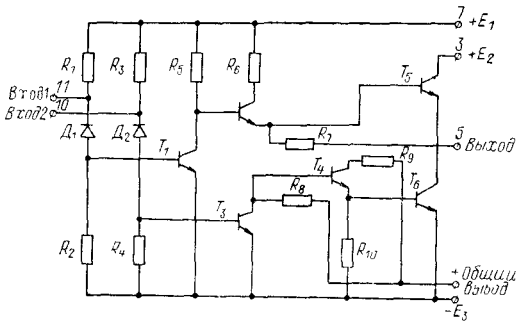



Рис. 35.10. Формирователь разрядных токов 1КТ461.

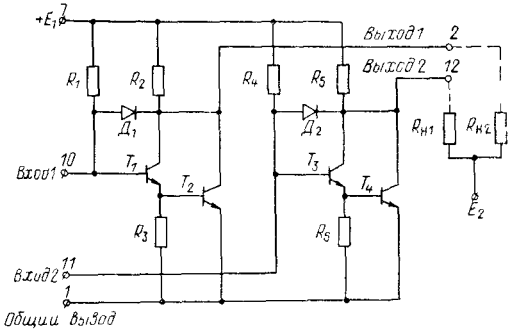



Рис. 35 11. Формирователь адресных токов 1КТ462—1КТ464.

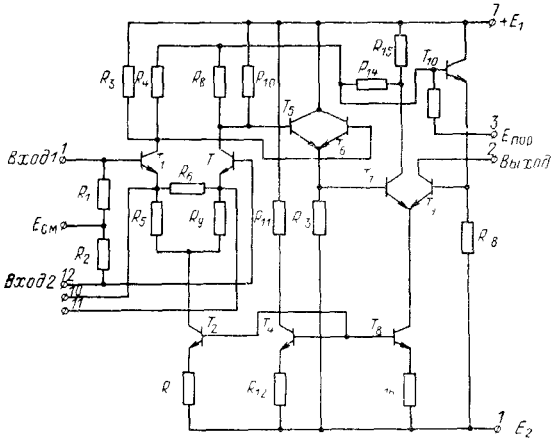



Рис. 35.12. Усилитель считывания типа 1УИ461.

*Таблица 35.3*

**Основные электрические параметры линейных интегральных микросхем серий 146 («Исполин-2») и 121 («Инструмент МУ»)**

| Тип микросхем | Функциональное назначение | Напряжение питания, В | Остаточное напряжение, В | Входной ток, мА | Ток утечки, мкА | Ток питания, мА | Входное напряжение, мВ | Задержка включения тока, нс | Длительность фронта включения тока, нс | Задержка выключения тока, нс | Длительность фронта выключения тока, нс | Время восстановления тока, нс | Минимальная длительность сигнала, нс |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1КТ461 | Формирователь разрядных токов | +10; ±6,3 | ±0,6 | ±10 | 100 | — | ±5 | 120 | 20 | 65 | 25 | — | 150 |
| 1КТ462 (А—Г)<br>1КТ463 (А—Г)<br>1КТ464 (А—Г) | Формирователь адресных токов | +5, $E_{пор}$ = = ±5 | 1,2—1,9 | 2,15 | 10 | 4,5—5,5 | 1,56 | 13 | 30 | 55 | 50 | — | 50 |
| 1УИ461<br>1УИ462 (А—Б) | Усилитель считывания на 20 мВ<br>Усилитель считывания на 10 мВ | ±10, $E_{пор}$ = 5 | — | — | — | — | 18—40 | 25 | 75 | 25 | 70 | 130 | 100 |
| 1ЛИ211 | Магистральный усилитель (МУ) | 6 | Логическая схема И; $U^{«1»}_{вых}$ = 3,5 В; $U^{«0»}_{вых}$ = —0,4 В; рассеиваемая мощность 130 мВт | | | | | | | | | | |

параметров транзисторной пары проводимости *n-p-n*, образующей схему ключа. Основными параметрами микросхемы 1КТ011 (А—Г) являются: остаточное напряжение 50—150 мкВ, динамическое сопротивление 50—60 Ом, ток утечки около 10 нА * при предельных значениях коммутируемых напряжений 6,3 В и токов 10 мА. Вся серия имеет 4 типа микросхем: А, Б, В и Г, отличающихся между собой остаточным напряжением между эмиттерами (50 мкВ для А, В и 150 мкВ для Б, Г).

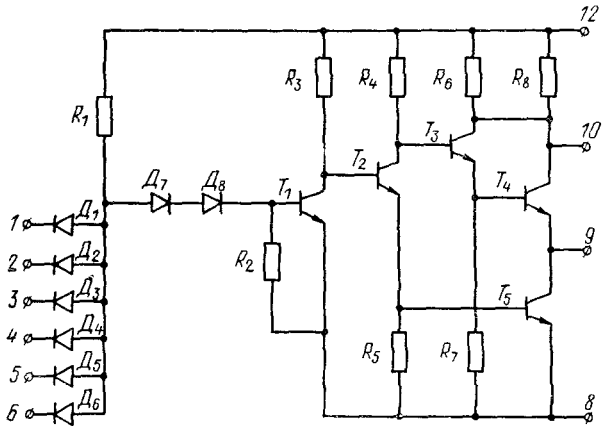



Рис. 35.13. Магистральный усилитель 1ЛИ211.

В судовых системах интегральные переключатели используются для коммутаторов автоматизированных систем встроенного контроля, в цифро-аналоговых преобразователях, модуляторах, демодуляторах и многих других устройствах автоматики, в том числе в качестве составного транзистора (на рис. 35.14 в схемах *3* и *8* выводы закорочены) для схем эмиттерных повторителей и усилителей переменного тока.

Интегральный переключатель типа 1КТ011 (А, Б) широко используется и в качестве стабилитрона, обеспечивая напряжение стабилизации 7,7 В (с допуском ±4%), ток стабилизации от 0,05 до 1 мА, имея при этом динамическое сопротивление до 70 Ом. Такие параметры значительно превышают данные типовых стабилитронов Д814А, Д815В, 2С168А и ряда других.

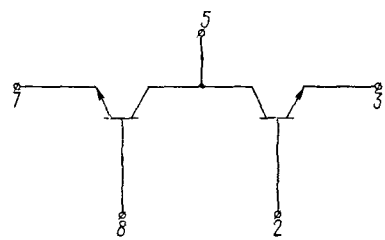



Рис. 35.14. Интегральный переключатель 1КТ011 (А—Г).

Аналоговый интегральный переключатель серии 124 типа 1КТ241, в отличие от переключателя 1КТ011, является высоковольтным ключом, выполненным на полупроводниковой основе проводимости *p-n-p*. Переключатель 1КТ241 характеризуется остаточным напряжением 60 мкВ, коммутируемым напряжением 30 В и током утечки 6 нА. Электрическая схема переключателя аналогична схеме 1КТ011 (с учетом изменения типа проводимости). Конструктивно переключатель 1КТ011 (А—Г) оформлен в цилиндрическом металлостеклянном корпусе 401МС8-2 с 8 жесткими выводами; переключатель 1КТ241 оформлен в корпусе типа 252МС-15. В практике конструирования судо-

* нА — наноампер, $1 нА = 10^{-9}$ А.

вой радиоэлектронной аппаратуры оба типа интегральных переключателей 1КТ011 и 1КТ241 применяются как раздельно, так и совместно, обеспечивая широкую гамму схемных построений аналоговых устройств.

**Интегральный токовый ключ серии 149 типа 1КТ491 (А—В).** Токовые ключи типа 1КТ491 в модификациях А—В представляют собой схему (рис. 35.15) четырех транзисторов проводимости *n-p-n*, объединенных эмиттерно-резистивными связями *14*. Каждый из транзисторов имеет свободный выход коллектора (*3, 6, 9, 12*), вывод базы (*4, 7, 8, 11*) через ограничивающий резистор и свободный вывод эмиттера (*2, 5, 10, 13*). Все компоненты интегральной микросхемы выполнены на поверхности кристалла кремния в едином технологическом цикле, благодаря чему однородные по структуре области имеют высокую идентичность параметров. При напряжении источника питания +5 В, мощности потребления не более 100 мВт, частоте следования входных импульсов не более 300 кГц и емкостной нагрузке 50 пФ токовые ключи обеспечивают при токе переключения 130 мА статический коэффициент усиления по току не менее 30, наибольший ток переключения 200 мА, длительности фронта и спада выходного импульса 50 и 60 нс соответственно, задержку включения не более 100 нс и задержку выключения не более 300 нс.

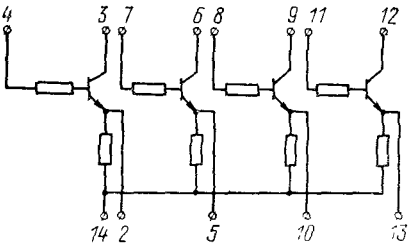


Рис. 35.15. Токовый ключ 1КТ491.

Токовые переключатели данного типа рекомендуется использовать в различных импульсных и аналоговых устройствах автоматики для построения сложных функциональных устройств среднего быстродействия. Конструктивно микросхемы 1КТ491 (А—В) оформлены в плоском металлополимерном корпусе типа 101МП14-1 с 14 планарными выводами.

**Комплексы гибридных интегральных микросхем аналогового типа серий 218, 228, 247 и 248.** Комплекс гибридных интегральных микросхем серии 218 («Терек-1») представляет собой систему линейно-импульсных гибридных микросхем, предназначенных для совместной работы без элементов согласования в устройствах автоматики. Кроме пассивных элементов и соединений, нанесенных в виде тонких пленок на пассивную (изоляционную) подложку, в микросхемах широко используются бескорпусные планарные кремниевые транзисторы проводимости *n-p-n* типа 2Т307 и диоды типа КД901.

Функциональный состав серии 218 и основные электрические параметры микросхем приведены в табл. 35.4. Конструктивно микросхемы серии 218 оформлены в прямоугольном металлостеклянном корпусе 252МС15-1 с 15 жесткими выводами вниз. Размер корпуса (без выводов) 19,7×14,5×3 мм.

*Микросхема 2УИ181* — видеоусилитель положительных импульсов — выполнена на одном транзисторе с использованием двойной обратной связи для стабилизации режима и увеличения входного сопротивления.

*Микросхема 2УИ182* — видеоусилитель отрицательных импульсов — выполнена на двух каскадах. Первый из них реализует функцию усилителя, второй — функцию эмиттерного повторителя. В схеме имеется двойная обратная связь для стабилизации рабочей точки. Эмиттерный повторитель используется для обеспечения требуемой нагрузочной способности и облегчения режима работы усилителя.

*Микросхема 2УИ183* (рис. 35.16) — видеоусилитель биполярных импульсов — выполнена по схеме: усилитель — эмиттерный повторитель. Для ограничения мощности и тока транзистора $ПП_2$ эмиттерного повторителя в цепь коллектора включено ограничивающее сопротивление $R_5$, что позволяет снимать с выхода *2* (вывод *3*) инверсный сигнал относительно основного выхода сигнала, но с меньшей амплитудой. Для усиления импульсов большой длительности от базы транзистора $ПП_1$ сделан вывод *12*, к которому необходимо подключать вне корпуса навесной конденсатор.

**Основные электрические параметры гибридных интегральных микросхем аналогового типа серий 218, 228, 247 и 248**

| Тип микросхем | Функциональное назначение | Напряжение питания, В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Входное сопротивление (не более), кОм | Амплитуда входного импульса (не более), В | Длительность входного импульса, мкс | Амплитуда выходного импульса (не менее), В | Длительность фронта (спада) выходного импульса, мкс | Коэффициент передачи (не менее) | Сопротивление нагрузки, Ом (пФ) | Диапазон рабочих частот МГц |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Серия 218 («Терек-1») | | | | | | | |
| 2УИ181 | Усилитель импульсов положительной полярности | +6,3 | 22 | 0,8 | 1,0 | 0,3—1,0 [1] | 3,0 | 0,1 | 3 | 400 (100) | — |
| 2УИ182 | Усилитель импульсов отрицательной полярности | +6,3 | 31,5 | 0,6 | 1,0 | 0,35—1,0 [2] | 3,0 | 0,12 | 3,2 | 400 (100) | — |
| 2УИ183 | Усилитель биполярных импульсов | +6,3 | 48,5 | 0,8 | 0,25 | 0,3—1,0 [3] | 3,0 | 0,1 | 3 | 400 (100) | — |
| 2УС181 | Усилитель промежуточной частоты | +6,3 | 62 | — | 0,03 | — | 0,2 | — | 5,0 | — | 22—38 |
| 2ДА181 | Детектор импульсов | +6,3 | 13,8 | — | 0,8 | 4 | 0,4 | — | 0,5—1,2 | 1200 | 30 |
| 2ТК181 | Триггер комбинированный | +6,3 | 21 | | 2,5—6 | 0,3 | 0,2; 3,8 | 0,25 | — | 820 (100) | 2 |
| 2ГФ181 | Мультивибратор автоколебательный | +6,3 | 86 | — | — | — | 2,8 | 0,2 | — | 2000 (100) | До 0,6 |
| 2ГФ182 | Мультивибратор ждущий | +6,3 | 76 | — | 2,5—6 | 0,3 | 2,8 | 0,15 | — | 2000 (100) | 0,25 |
| 2ЛБ181 | Схема совпадения импульсов | +6,3; +1,2 | 48,5 | — | 2—6 | 0,3 * | 0,2; 3 | 0,2 | — | 820 (100) | — |
| 2ЛН181 | Инвертор положительных импульсов | +6,3 | 27,8 | — | 2,5—6 | — | 4 | 0,15 | — | Три схемы 2ЛН182 | — |

*Продолжение табл. 35.4*

| Тип микросхем | Функциональное назначение | Напряжение питания, В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Входное сопротивление (не более), кОм | Амплитуда входного импульса (не более), В | Длительность входного импульса, мкс | Амплитуда выходного импульса (не менее), В | Длительность фронта (спада) выходного импульса, мкс | Коэффициент передачи (не менее) | Сопротивление нагрузки, Ом (пФ) | Диапазон рабочих частот, МГц |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2ЛН182 | Инвертор отрицательных импульсов | +6,3 | 27,8 | — | 2,7—4 | — | 3,5 | 0,15 | — | Три схемы 2ЛН181 | — |
| 2ЛН183 | Инвертор отрицательных импульсов малых амплитуд | +6,3 | 27,5 | | 1,1—6 | — | 3,5 | 0,15 | — | Три схемы 2ЛН181 | — |
| 2УЭ181 | Эмиттерный повторитель положительных импульсов | +6,3 | 6,9 | 3 | 4 | 0,3—1,5 | 3 | 0,1 | 0,8 | 400 (100) | — |
| 2УЭ182 | Эмиттерный повторитель биполярных импульсов | +6,3 | 33 | 3 | 0,8 | 0,3—1,5 | 0,6 | 0,1 | 0,8 | 400 (100) | — |
| | | | | | Серия 228 («Терек-2») | | | | | | |
| 2УС281 | Усилитель универсальный | ±6,3 | 70 | 0,2 | Крутизна вольт-амперной характеристики 10 мА/В, пределы изменения 40 дБ | | | | | 10 000 | 5—60 |
| 2УС282 | Усилитель регулируемый | | | | | | | | | 1 000 000 | 5—60 |
| 2УС283 | Усилитель каскодный | ±6,3 | 70 | 0,2 | Крутизна вольт-амперной характеристики 10 мА/В | | | | | 100 000 | 5—60 |
| 2УС284 | Усилитель балансный | ±6,3 | 85 | 0,4 | Крутизна вольт-амперной характеристики 5 мА/В | | | | | 50 000 | 5—60 |
| 2КД281 | Ключ диодный | ±6,3 | 100 | — | 0,5; 2,5 | — | 0,15—0,17 | — | 0,8 | 3000 | 15—60 |
| 2НК281 | Матрица комбинированная | ±6,3 | Прямой ток диода 5 мА, разброс сопротивлений резисторов 0,8% | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2НЕ281 | Сборка конденсаторная | | | Емкость каждого диода 8000 пФ, рабочее напряжение 15 В | | | | | | | |
| 2ПД281 | Преобразователь декорирующий I | —6,3 | 50 | Управляющее напряжение ±1 В, значения разрядных токов в процентах от тока записи $I_з$ = (1,81—2,29) мА | | | | | | | |
| 2ПД282 | Преобразователь декорирующий II | +6,3 | 50 | | | | | | | | |
| 2СА281 | Схема сравнения токов | ±6,3 | 65 | — | 1,3—1,4 | — | —0,4÷ ÷2,3 | Чувствительность по входному току <20 мкА | | | |

Серия 247 ( Функция-3я)

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2УИ471 | Усилитель согласующий | 5 | 30—90 | 20 | 1—7 | 0,1 | 0,4—4,5 | 0,07 | — | 2000 (40) | 3 |
| 2УИ472 | Усилитель положительных импульсов | 5 | 42 | 2,5 | 0,1—1 | 0,1—2 | 2,5—5,5 | — | 3 | 2500 (30) | — |
| 2УИ473 | Усилитель отрицательных импульсов | 5 | 42 | 2,5 | 0,1—1 | 0,1—2 | 2,5—5,5 | — | 3 | 2500 (30) | — |
| 2УП471 | Усилитель согласующий выходной | ±5; 10 | 34 (230) | 10 | 0,4—7 | 0,5 | 0,4—5,5 | 70 (80) | — | 75 | 1 |
| 2УП472 | Усилитель согласующий выходной | +5; —10 | 47 (185) | 10 | 0,4—7 | 0,5—500 | —0,4÷ ÷+5,5 | 100 | — | 75 | 1 |
| 2УП473 | Усилитель сигнализации | 3,6—7 | 33 | 10 (0,8) | 0,4—7 | 0,15 | 0,4—2 | 100 | — | 1000 | 0,2—2 |
| 2УП474 | Усилитель согласующий входной | 5 | 41 | 2 | 0—1—4÷ ÷—10 | 0,2 | 0—4; 3,1 | 200 (100) | — | 2000 | 1 |
| 2УП475 | Усилитель-ограничитель | 10 | 44 | 2 | 0,8 | 0,1—2 | 1,2 | — | 3,1 | 2000 (15) | 2 |
| 2УС471 | Усилитель биполярных и синусоидальных импульсов | 5 | 22 | 2 | 0,2 | 0,1—2 | 0,6—0,8 | — | 3,1 | 2000 (25) | 6 |

*Продолжение табл 35 4*

| Тип микросхем | Функциональное назначение | Напряжение питания, В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Входное сопротивление (не более), кОм | Амплитуда входного импульса (не более), В | Длительность входного импульса, мкс | Амплитуда выходного импульса (не менее), В | Длительность (спада) выходного импульса, мкс | Коэффициент передачи (не менее) | Сопротивление нагрузки, Ом (пФ) | Диапазон рабочих частот, МГц |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2УЭ471 | Эмиттерный повторитель синусоидальных импульсов | 5 | 47 | 20 | 0,5 | 0,1—2 | 0,4 | — | 0,8 | 1000 (30) | 6 |
| 2УЭ472 | Эмиттерный повторитель отрицательных импульсов | 5 | 21 | 10—20 | 0,1 | 0,1—6 | 0,08 | — | 0,8 | 1000 (30) | 0,5 |
| 2УЭ473 | Эмиттерный повторитель синусоидальных и положительных импульсов | 5 | 39 | 10—20 | 0,5 | 0,1—6 | 0,4 | — | 0,8 | 1000 (200) | 0,5 |
| 2ТК471 | Триггер статический | 5 (6,3) | 100 | — | 2,1—5,5 | 0,05 | 0,4—2,8 | — | — | (40) | 8 |
| | | | | Серия 248 («Функция 3») | | | | | | | |
| 2СА481 | Дискриминатор амплитудный | ±5, 10 | 90 | — | 0,05—5 | 0,25 | 0—0,4, 3,1 | 0,1 | — | 2000 (100) | 3 |
| 2ГФ481 (А—Л) | Мультивибратор ждущий | ±5 | 90 | 10 | 2—7 | 0,1 | 0—0,3, 3,1 | 0,1 (0,05) | — | 2000 (120) | — |
| 2ГФ482 (А—Л) | Мультивибратор ждущий | ±5, —3 | 80 | 10 | 2—7 | 0,1 | 0—0,4, 3,1 | 0,1 | — | 2000 (150) | — |
| 2ГФ483 (А—Р) | Мультивибратор автоколебательный | ±5 | 42 | — | — | — | 0,4, 5,5 | 0,4 (0,1) | — | 2000 (200) | 0,05—1 |
| 2ГФ484 | Генератор кварцевый | 5 | 165 | Нестабильность | | $10^{-3}$—$10^{-4}$ | 0,4, 2,7 | — | — | 1500 (30) | 1—10 |
| 2УС481 | Усилитель синусоидальных и положительных сигналов | 5 | 55 | 2 | 0,06 | 0,1—2 | — | — | 10—25 | 2000 (25) | 0,05—6 |
| 2ТК481 | Триггер статический | 5 | 100 | — | 1, 2,1—5,5 | 0,04 | 0,4, 2,6 | 0,04—0,06 | — | — | 12 |

* С навесным конденсатором — до 500 мкс

*Микросхема 2УЭ181* (рис. 35.17) представляет собой эмиттерный повторитель положительных импульсов. Рабочая точка определяется делителем $R_1$— $R_2$

*Микросхема 2УЭ182* мало чем отличается от предыдущей, хотя транзистор имеет проводимость типа *p-n-p* и работает от импульсов отрицательной полярности.

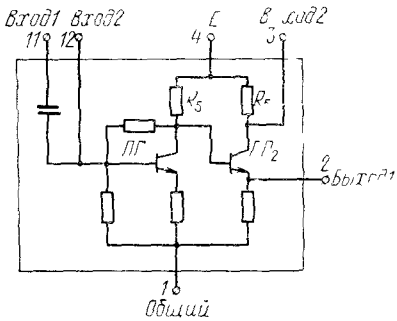



Рис. 35.16. Биполярный усилитель 2УИ183.

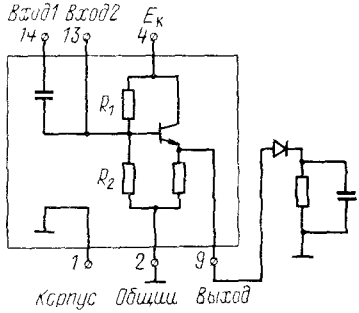



Рис. 35.17. Эмиттерный повторитель 2УЭ181 (2УЭ182).

*Микросхема 2УС181* выполняет роль каскада усилителя промежуточной частоты, реализованного по схеме усилитель — эмиттерный повторитель. Данный каскад предназначен для работы в логарифмическом усилителе промежуточной частоты с частотой резонанса 25—30 МГц.

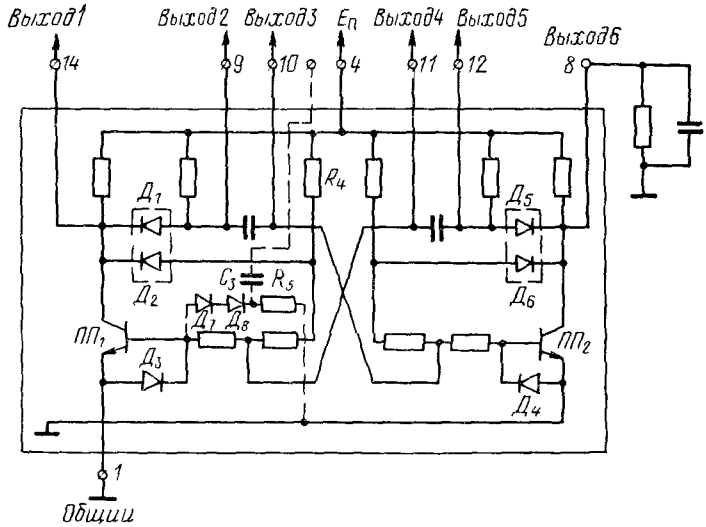



Рис. 35.18. Автоколебательный мультивибратор 2ГФ181.

*Микросхема 2ДА181* выполняет роль детектора в логарифмическом усилителе

*Микросхема 2ТК181* — триггер со счетным входом, выполненный на 6 транзисторах (по три в каждом плече).

*Микросхема 2ГФ181* (рис. 35.18) — мультивибратор автоколебательный. Схема выполнена на двух транзисторах. Диоды $Д_3$—$Д_4$ включены в схему для предотвращения срыва колебаний при высокой температуре. В целях уменьшения

положительного фронта импульса при работе мультивибратора на низких частотах предусматривается подключение внешней емкости и отсекающих диодов $Д_1$—$Д_2$ и $Д_5$—$Д_6$.

*Микросхема 2ГФ182* — мультивибратор ждущий. Отличается от мультивибратора автоколебательного следующим: устранены диоды $Д_1$—$Д_2$; $Д_5$—$Д_6$, уменьшена величина сопротивления смещения $R_4$, введена дополнительно цепь запуска $Д_7$—$Д_8$—$C_3$—$R_5$ (цепь, изображенная штриховыми линиями на рис. 35.18).

*Микросхемы 2ЛБ181, 2ЛН181 и 2ЛН182* — логические элементы: схема совпадения импульсов положительной полярности, инверторы положительной и отрицательной полярности.

Комплекс гибридных интегральных микросхем серии 228 («Терек-2») является функциональным расширением серии 218 и представляет собой систему аналоговых и аналогово-логических гибридных микросхем, предназначенных для построения функциональных устройств аналоговой автоматики.

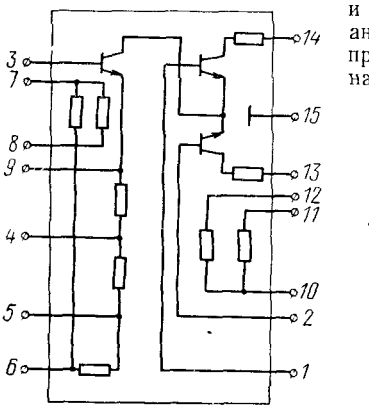



Рис. 35.19. Усилитель регулируемый 2УС282.

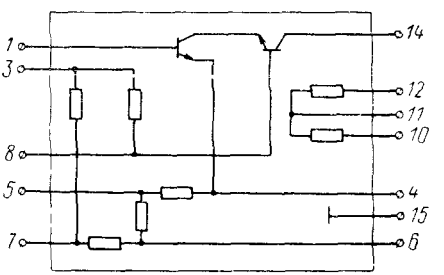



Рис. 35.20. Каскодный усилитель 2УС283.

В качестве активных элементов в микросхемах используются планарные кремниевые транзисторы типа 2Т307 и диоды типа 2Д910. Функциональный состав серии 228 и основные электрические параметры микросхем приведены в табл. 35.4. На основе микросхемы 2УС281 — универсального усилителя — выполняются усилители, смесители, генераторы импульсов, умножители частоты, детекторы амплитудные.

*Микросхема 2УС282* (рис. 35.19) представляет собой регулируемый усилитель, на базе которого формируются усилители с плавной регулировкой усиления, дифференциальные усилители, смесители, электронные коммутаторы, генераторы, удвоители частоты, преобразователи и делители частоты на два.

*Микросхема 2УС283* (рис. 35.20) — каскодный усилитель. Подключение нагрузки производится соединением выводов *12—14*, а к выводу *11* подключается развязывающий конденсатор.

*Микросхема 2УС284* (рис. 35.21) — балансный усилитель; как и каскодный усилитель, формируется за счет внешних навесных электроэлементов, образуя схемы балансного усилителя или смесителя.

*Микросхема 2СА281* (рис. 35.22) представляет собой схему сравнения токов, на базе которой формируются компараторы токов на заданные параметры, линейные усилители тока, ограничители сигналов. Перечисленные устройства создаются путем внешних подключений электроэлементов.

*Микросхема 2КД281* — ключ электронный диодный; является составной частью временного селектора, быстродействующего электронного коммутатора, согласующего повторителя.

*Микросхемы 2НК281, 2НЕ281, 2ПД281 и 2ПД282* представляют собой матрицы различных элементов (две первые) и декодирующие преобразователи (две последние).

Микросхемы серии 228 конструктивно оформлены так же, как и элементы серии 218.

Комплекс гибридных интегральных микросхем серии 247. Микросхемы серии 247, функциональный состав и основные электрические параметры которых приведены в табл. 35.4, предназначены для построения линейных устройств аналоговой автоматики. Наряду с этим все они широко используются для согласования логических устройств с линиями задержки и линий задержки с интегральными логическими микросхемами общего применения (серий 130, 134, 133, 136 и др.). По своему внешнему виду все микросхемы

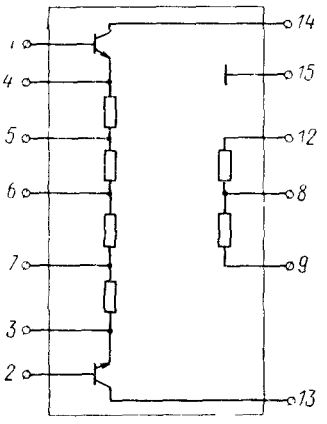



Рис. 35.21. *Усилитель балансный* 2УС284.

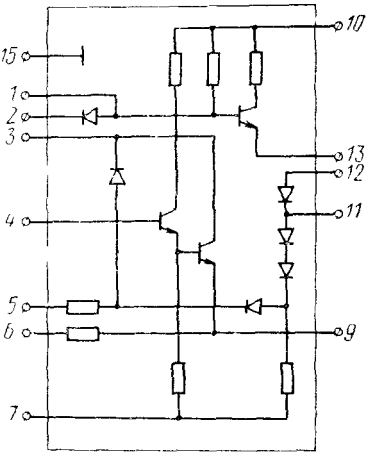



Рис. 35.22. Схема сравнения токов 2СА281.

серии 247 мало чем отличаются от серий 218 и 228. Конструктивно они оформлены в корпусе типа 252МС15-1. Функциональный состав серии 247 подобран так, чтобы обеспечить совместную работу линейных и логических устройств с линиями задержки, обладающими волновым сопротивлением 600 и 1200 Ом. С этой целью в серию включен *согласующий усилитель 2УИ471*. Согласование с логическими схемами осуществляется *усилителями положительных* (*2УИ472*) и *отрицательных* (*2УИ473*) *импульсов*, выполненными на основе типового инвертора.

*Усилители 2УП471—2УП472* предназначены для согласования логических микросхем общего применения и микросхем серий 247 и 248 с 75-омным согласованным кабелем (при использовании выносного мощного транзистора 2Т603Г). Для совместной работы с микросхемами широкого применения и фиксации одного из возможных состояний этих схем (открытого или закрытого) предназначен *усилитель сигнализации 2УП473*.

*Входной согласующий усилитель 2УП474* — ключевой видеоусилитель — предназначен для преобразования уровней напряжения отрицательной и положительной полярности. Для усиления синусоидальных и биполярных сигналов и двустороннего ограничения выходных сигналов по амплитуде предназначен *усилитель-ограничитель 2УП475*. *Усилитель 2УС471* усиливает синусоидальные и биполярные сигналы.

В серии имеется три *эмиттерных повторителя 2УЭ471—2УЭ473*. Первый и третий из них согласуют передачу синусоидальных и биполярных импульсных сигналов, второй — только отрицательных импульсов.

*Триггер статический 2ТК471* используется для деления частоты, счета и формирования импульсов, обеспечивая выходной втекающий ток не более 8,5 мА и выходной вытекающий ток не более 1 мА.

Комплекс гибридных интегральных микросхем серии 248. Серия 248 микросхем является дальнейшим развитием серии 247, хотя и отличается большей схемотехнической сложностью входящих в нее микросхем и мощностью их рассеивания. С этой целью микросхемы серии 248 увеличены по объему и конструктивно оформлены в больший по размерам корпус (253МС15-1 с размерами 22×19,5×5 мм). В состав серии входит 7 микросхем, основные электрические параметры которых приведены в табл. 35.4.

*Амплитудный дискриминатор 2СА481* селектирует и формирует импульсные сигналы положительной полярности, обеспечивая пределы регулировки порога срабатывания по входу 2 от 0,05 до 5 В и разность напряжений между сигнальным и управляющим входами не более 3,8 В.

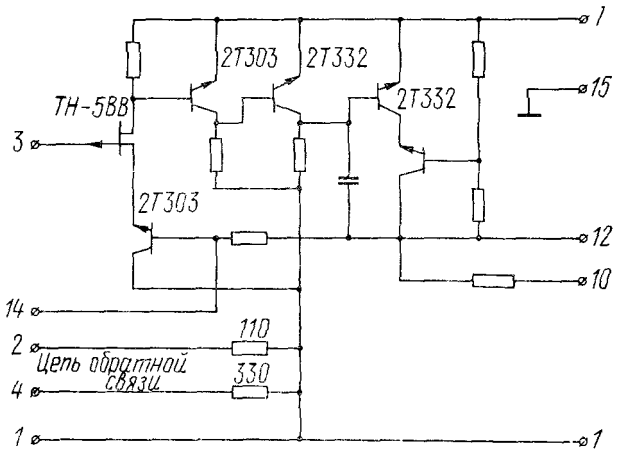



Рис. 35.23. Усилитель низкой частоты МГ-4.

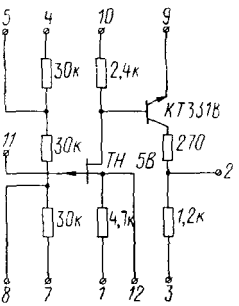



Рис. 35.24. Истоковый повторитель МГ-8.

*Группы различных ждущих мультивибраторов*, включенные в серию, формируют импульсы прямоугольной формы положительной полярности с длительностью от 0,2 до 1,6 мкс (2ГФ481 А—Л); от 2 до 16 мкс со скважностью не менее 1,2 (2ГФ482 А—Л).

*Автоколебательные мультивибраторы 2ГФ483* (*А—Р*) генерируют прямоугольные импульсы с частотами от 1000 до 50 кГц (1000, 800, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 160, 125, 100, 80, 60, 50 кГц в зависимости от индекса группы А—Р)

*Кварцевый генератор 2ГФ484*, включенный в серию, генерирует импульсы прямоугольной формы в диапазоне частот 1—10 МГц с нестабильностью не хуже $10^{-3}$—$10^{-4}$ и длительностью выходных импульсов положительной полярности не менее 0,45 периода колебаний генератора.

*Усилитель 2УС481* предназначен для усиления синусоидальных и биполярных импульсных сигналов

*Статический триггер 2ТК481* широко используется для деления частоты, счета и формирования импульсов, обеспечивая входной вытекающий ток. по входу запуска 1,6 мА; по входу установки не более 1,2 мА.

**Малошумящие усилители низкой частоты с высоким входным сопротивлением серии 226.** Микросхемы серии 226 в отличие от всех рассмотренных ранее, выполнены в гибридно-пленочном исполнении с применением полевых (униполярных, и биполярных бескорпусных транзисторов. Применение полевых транзисторов

типа ТН-5ВВ (ТН-5ГГ) во входном каскаде усилителей обеспечивает нормированный малый уровень электрических шумов и высокое входное сопротивление.

Функциональное назначение микросхем серии 226 — усиление слабых сигналов переменного тока от датчиков с высоким внутренним сопротивлением. Область применения данных микросхем весьма широкая от предварительных усилителей переменного тока и высокоточных операционных усилителей до многозвенных активных *RC*-фильтров низких звуковых и инфразвуковых частот и истоковых повторителей. Все типы микросхем серии оформлены в прямоугольном металлостеклянном нормализованном корпусе 252МС15-1 («Терек») с 15 жесткими выводами вниз; размер корпуса 19,7×14,5×4 мм. Функциональный состав микросхем серии 226 и их основные параметры приведены в табл. 35.5.

*Микросхемы МГ-4* и *МГ-5* — усилители низкой частоты; подразделяются на группы А и Б, имеющие различные коэффициенты усиления (300, 100, 30) и уровни шума (5 и 12 мкВ). Коэффициенты усиления можно регулировать путем подключения внешних резисторов, изменяющих сопротивления 110 и 330 Ом в цепи обратной связи (клеммы *2* и *4* на рис. 35.23).

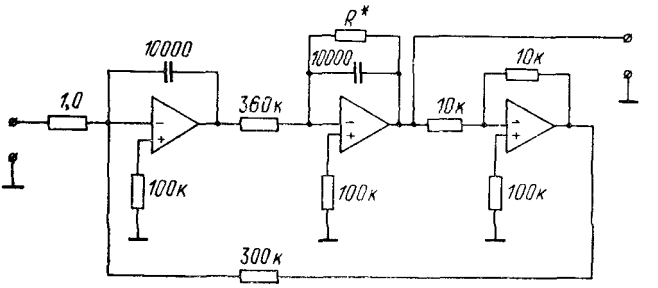



Рис. 35.25. Звено активного фильтра на трех операционных усилителях типа МГ-9.

*Микросхема МГ-8* — истоковый повторитель — предназначен для работы во входных каскадах высокочувствительных усилителей и во всех случаях, где требуется согласование высокого выходного сопротивления источника сигналов и малого входного сопротивления следующих каскадов. Усилитель МГ-8 целесообразно использовать во входных каскадах при работе от пьезофотоемкостных датчиков, во времязадающих схемах с целью миниатюризации устройств путем исключения конденсатора, для согласования источника сигнала с кабелем, для построения различных низкочастотных фильтров и других частотно-избирательных цепей. *Электрическая схема истокового повторителя типа МГ-8* (рис. 35.24) представляет собой двухкаскадный усилитель с глубокой отрицательной обратной связью.

*Операционный усилитель МГ-9* имеет сравнительно большой коэффициент усиления и высокое входное сопротивление.

Усилитель МГ-10 содержит три каскада усиления напряжения и обладает ограниченным коэффициентом усиления. На базе МГ-9 легко выполняются активные элементы *RC*-фильтров, особенно для работы в области низких и инфранизких частот. Построение фильтров стало возможным благодаря использованию, конденсаторов с минимальными емкостями (типа СГМ), что в свою очередь обеспечивает высокую стабильность характеристик активных *RC*-фильтров в целом. На рис 35.25 представлено звено такого фильтра, состоящего из двух интегрирующих и одного инвертирующего каскадов, собранных на операционных усилителях МГ-9. Такое звено эквивалентно колебательному контуру с максимальной добротностью не хуже 300 на частоте 70 Гц. Резистор $R^*$ подбирается по характеристикам фильтра.

*Таблица 35.5*

**Основные электрические параметры интегральных микросхем серии 226**

| Тип микросхем | Функциональное назначение | Напряжение питания, В | Потребляемая мощность (не более), мВт | Коэффициент усиления по напряжению на частоте 1 кГц (±8%) | Напряжение собственных шумов в полосе 20 Гц—20 кГц ($C_{вх}$ = 5000 пФ), мкВ | Входное сопротивление на частоте 100 Гц (не менее), МОм | Выходное сопротивление (не более), Ом | Верхняя граничная частота при неравномерности частотной характеристики ±5%, кГц | Нижняя граничная частота при внешней емкости фильтра 100 мкФ, Гц | Выходное напряжение при $R_н$ = 3 кОм и частоте 100 кГц (не менее), В | Сопротивление цепи обратной связи (±25%), кОм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| МГ-4 | Усилитель 2УС261 (А—Б) | +12,6; −6,3 | 40 | 30, 100, 300 | 5 (12) | 3 | 100 | 100 | 20 | 1,5 | 0,330 |
| МГ-5 | Усилитель 2УС262 (А—Б) | +12,6; −6,3 | 50 | 30, 100, 300 | 5 (12) | 3 | 100 | 100 | 20 | 1,5 | 0,630 |
| МГ-6 | Усилитель 2УС263 (А—Б) | +6; −9 | 10 | 10, 300 | 6 (12) | 10 | 100 | 100 | 20 | 2,5 | — |
| МГ-7 | Усилитель 2УС264 (А—Б) | +6; −9 | 25 (50) | 10, 300 | 6 (12) | 10 | 300 | 200 | 20 | 2,5 | — |
| МГ-8 | Усилитель 2УС265 (А—Б) | ±6 | 3 мА | >0,97 | <15 | >20 | 150 | 200 | — | — | — |
| МГ-9 | Операционный усилитель 2УС266 (А—Б) | — | — | 3 000—10 000 | — | 100 | — | — | — | — | — |
| МГ-10 | Операционный усилитель 2УС267 (А—Б) | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |

# § 36. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

В настоящее время в отечественной и зарубежной электронной промышленности получили развитие большие интегральные схемы (БИС) — микросхемы со средним и высоким уровнем интеграции (от 100 до 1000 компонентов на корпус).

Большие интегральные схемы являются элементной базой четвертого поколения, позволяющей еще больше миниатюризировать электронные устройства *линейной и логической* автоматики. Как и простые интегральные микросхемы, БИС создаются на базе гибридной и полупроводниковой технологии. Из-за ряда технологических трудностей *серийный выпуск полупроводниковых* БИС пока задерживается. Гибридные БИС, создаваемые на основе полупроводниковых бескорпусных микросхем и многослойных *соединительных плат* с тонкопленочными коммутационными связями и пассивными элементами, получили широкое распространение. На основе многокристальных микросхем разработаны как логические комплексы («Вардува» — серия 240), так и аналоговые (линейные) комплексы («Ветла» — серия 801).

В состав *гибридного комплекса логических устройств* «*Вардува*» входят: 2ЛБ401 (А—В) — 9 схем И-НЕ; 2ЛБ402 — 16 схем И-НЕ с повышенной нагрузочной способностью; 2ЛБ403 (А—В) — 12 схем И-НЕ; 2ЛБ404 (А—В) — 13 схем И-НЕ; 2ЛБ405 — 13 схем И-НЕ с возможностью расширения; 2ЛБ406 (А—В) — 8 схем И-НЕ с бездиодными входами; 2ЛП401 — 12 *расширителей по И*; 2ИЛ401 (Б—В) — 8 полусумматоров; 2ИС401 (А, Б) — 2 сумматора; 2ИР401 (А, Б) — 4 регистра; 2ИР402 (А, Б) — 8 регистров хранения; 2ИР403 (А, Б) — 3 регистра сдвига реверсивных; 2ИЕ401 (А, Б) — 2 реверсивных счетчика.

Большие интегральные схемы «Вардува» построены на базе бескорпусных полупроводниковых интегральных микросхем «Логика-1» (серия 121). В одном корпусе размещается до 15 кристаллов.

Микросхемы серии 240 изготовляются в герметичном металлостеклянном корпусе «Вага-2» со встроенной подложкой. Габаритные размеры корпуса 29×19×3,6 мм, число выводов 36 с *шагом* 2,5 мм.

*Комплекс гибридных линейных БИС «Ветла»* (*серия 801*) включает 14 микросхем. В их состав входят: широкополосный линейно-логарифмический усилитель УПЧ (2УП-1); многофункциональный дифференциальный усилитель УПЧ (2УП-11); линейно-регулируемый УПЧ(2УС-14); фазостабильный ограничитель УПЧ (2УС-15); логарифмический УПЧ (2УС-19); усилитель малых сигналов (2УП-5); видеоусилитель МОЗУ (2УИ-3); видеоусилитель ДЗУ (2УИ-2); видеоусилитель «Планета» БИС (2ЖИ-10); эмиттерный повторитель (2УЭ-19); переходный элемент «Вента» — «Логика-1» (2ШТ-6); элемент согласования потенциальный «Логика-1» — «Пантера» (3НК-20); преобразователь «код — напряжение» (2ПД-17); делитель напряжения (3НС-14). Конструктивно-технологическое оформление комплекса БИС «Ветла» аналогично оформлению БИС «Вардува». Габаритные размеры корпуса «Вага-1» составляют 39×19×3,6 мм (без выводов), число выводов 26 с шагом 2,5 мм.

В ближайшее время следует ожидать серийного производства ряда других гибридных и полупроводниковых БИС аналоговой и логической структур.

Краткий обзор логических и аналоговых интегральных микросхем в § 34 и 35 охватывает только малую часть серийно выпускаемых микросхем, но составлен с учетом требований унификации элементной базы для судовых радиоэлектронных и технических средств, включающих линейные и логические микроэлектронные и функциональные устройства.

Все рассмотренные комплексы интегральных микросхем являются перспективными и отвечают требованиям по воздействию климатических, механических и других факторов.

*Условия эксплуатации* микросхем характеризуют следующие показатели:

— интервал температур $-60 \div +70°$ С для гибридных схем, $-60 \div +125°$ С для полупроводниковых схем;
— относительная влажность воздуха 98% при $t = +20°$ С;
— атмосферное давление 5—2280 мм рт. ст.;
— вибрация в диапазоне 5—5000 Гц с ускорением $40g$;
— многократные удары с ускорением $150g$;
— одиночные удары с ускорением $1000g$;
— линейные нагрузки с ускорением $150g$.

В условиях механических и климатических воздействий гибридные микросхемы характеризуются показателем надежности $\lambda_г = 10^{-6}$ 1/ч, а полупроводниковые микросхемы $\lambda_п = 10^{-7}$ 1/ч. В перспективе показатели надежности будут повышены на порядок и составят соответственно $\lambda_г = 10^{-7}$ 1/ч и $\lambda_п = 10^{-8}$ 1/ч.

# ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

(жирным шрифтом выделены страницы, на которых даются определения терминов и понятий)


**А**

Автоматика **7**
Анемометр 61

**Б**

Барометр **54**
Блок функциональный **11**
Болометр 282

**В**

Вакуум **53**
Вакуумметр **54**
Варистор 282, 286
Величина управляемая (регулируемая) **9**
Время безотказной работы среднее **22**
— изодрома **107**
— сервомотора **94**

**Г**

Газоанализатор **87**
— электрический на $CO_2$ 88
—— на $CO + H_2$ 88

**Д**

Давление атмосферное (барометрическое) **53**
— избыточное **53**
Датчик **8**
— емкостный 54, **57**
— индуктивный 54
—— с переменным коэффициентом самоиндукции **56**
— реостатный 54
— с емкостным съемом сигналов 167
— *тензометрический проволочный* 83
— угла индукционный 167
— фазовый двухсчетный с вращающимся полем 168
Двигатель-усилитель серии ДУ 185
Диафрагма 65
Динистор **269**, 270
Диод **252**
— опорный (стабилитрон) 267
— полупроводниковый 263
—— выпрямительный 265
Добротность усилителя магнитного 175
Дроссель насыщения 175

**З**

Значение максимальное прямого тока полупроводникового выпрямительного диода **267**

Золотник 98
— отсечной **98**
— проточный **98**

**И**

Изменение напряжения стабилизации стабилитрона **261**
Изодром гидравлический **107**
Индикатор цифровой **259**
Интенсивность монохроматического излучения абсолютно черного тела **48**
— отказов **22**

**К**

Кислородомер **86**
— электрический 86
Клапан соленоидный 238
Ключ интегральный токовый 342
Количество *полное лучистой энергии*, излучаемой абсолютно черным телом **50**
Контактор 213
— *переменного тока* 221
——— серии КНТ 227
— *постоянного тока* 221
——— серии КПМ 221
——— серии КН 222
Коэффициент вязкости динамической **136**
—— статической **136**
— избытка воздуха **87**
— объемного сжатия газа **136**
— пневматического сопротивления **137**
— разветвления **19**
— расхода газа **137**
— сжатия газа **137**
— скорости газа **137**
— температурный напряжения опорного диода **269**
— усиления **9**
—— транзистора по току **277**
—— электронной лампы **256**
— черноты излучения монохроматического **50**
——— полного **50**
Кран обходной для *перехода на ручное управление* 107
*Критерий надежности* **21**
Крутизна характеристики лампы *электронной* **256**
—— транзистора полевого 281
Кулачок изменяемого профиля 107

**Л**

Лампа газоразрядная 256
— индикаторная 257
— люминофорная **254**
— неоновая 257
— электронная косвенного подогрева 252
—— прямого накала 252
Логометр **41**

**М**

*Манометр* **54**
— жидкостный **54**
—— дифференциальный (дифманометр) **54**
—— с наклонной трубкой **54**
—— чашечный **54**
—— *U*-образный **54**
— мембранный 56
— пружинный **56**
— электрический **54**, 60
Мембрана как пневмоэлемент 138
— плоская **56**
Метод компенсационного измерения э. д. с. **45**
Микросхема интегральная гибридная аналогового типа 342
—— гибридно-пленочная 294
—— диодно-транзисторной логики 296
—— линейная 293, 325
——— полупроводниковая 330
——— полупроводниковая операционных усилителей 331
—— логическая 293, 295
——— *гибридного исполнения* ДТЛ 303
——— *полупроводниковая* 308
——— серий 106 («Таран») и 134 («Тур») ТТЛ 309
——— серий 133 («Логика-2»), 130 («Индекс»), 136 («Изумруд») 310
——— типа ЛСПТ 320
—— полупроводниковая 294
—— транзисторной логики с резистивной (РТЛ) и резистивно-емкостной (РСТЛ) схемой 320
—— управления магнитным запоминающим устройством 337
— транзисторно-транзисторной логики ТТЛ 296
Микроэлектроника 293
Милливольтметр пирометрический 45
Модуль объемной упругости газа 136
Мост измерительный неуравновешенный **41**
—— уравновешенный **39**
*Мощность наибольшая*, рассеиваемая на коллекторе транзистора 278
Муфта магнитно-жидкостная (порошковая) 240
— электромагнитная 239

**Н**

Надежность **21**
— конденсаторов 24
— контактных элементов 27
— обмоток 26
— полупроводниковых приборов 25
— резисторов 23
— электронных ламп 25
Напор скоростной газа **137**
Напряжение горения лампы неоновой **257**
— диода выпрямительного полупроводникового обратное максимальное **267**
——— прямое **267**
— допустимое транзистора полевого 281
— зажигания лампы неоновой **257**
—— стабилитрона **266**
— наибольшее между эмиттером и коллектором транзистора 278
— отсечки транзистора полевого 281
— стабилизации стабилитрона **260**
— фотодиода рабочее обратное 273
Неравномерность регулятора **105**
Нечувствительность регулятора **105**

**О**

Объект автоматического управления (регулирования) **9**
Операция И, конъюнкция, логическое умножение **17**
— ИЛИ, дизъюнкция, логическое сложение **17**
— ИЛИ-НЕ, стрелка Пирса **18**
— И-НЕ, штрих Шеффера **18**
— НЕ, инверсия, отрицание **18**
Орган измерительный **10**
— регулирующий **9**
—— гидравлического регулятора 103
Отказ **21**
— внезапный **21**
— временный **21**
— зависимый **21**
— независимый **21**
— постепенный **21**
— постоянный **21**

**П**

Переключатель интегральный аналоговый 338
Перекрыша окон золотника **91**
Перепад гидравлического сервомотора сграгивающий **94**
Пирометр **36**
— излучения **36**
— оптический **51**
— радиационный **52**
— термоэлектрический **36**, 44
— фотоэлектрический **52**
Площадь активная мембраны **98**
—— сильфона **97**
Пневмоавтоматика **127**
Пневмоемкость 138
Пневмомеханика **127**
Пневмоника **127**
Пневмосопротивление **138**
— типа жиклер 138
—— капилляр 138
—— конус—конус 138
—— конус—цилиндр 138
—— сопло—заслонка 138
—— шарик—цилиндр 138
Позистор 282, 283
Поршень как пневмоэлемент 138
Постоянная времени магнитного усилителя **175**
Потенциометр 56
— автоматический 45
Преобразователь угла поворота в цифровой код **165**
———— с промежуточным преобразованием угла поворота в напряжение 167
Прибор ионный 256
Процесс переходный **14**
Пружина трубчатая многовитковая **56**
—— одновитковая **55**
Разряжение **53**
Рассогласование **10**
Расходомер **62**
— дроссельный **62**
— индукционный **62**
— переменного перепада давлений **62**
— ультразвуковой **62**
Расход секундный весовой **136**
—— массовый **136**
—— объемный **135**
Регулятор автоматический гидравлический 95
——— без обратной связи **95**
——— давления 110
——— перепада давления 110
——— с гибкой (изодромной) обратной связью **97**
——— с жесткой обратной связью **96**
——— температуры 110
——— уровня 116
———— типа ДРП 119
———— типа ОРП 118
———— типа РУД и РУК 116
—— электрический возбуждения синхронных двигателей 250
——— напряжения типа РУН 241
———— УБК 247
——— частоты вращения 245
Режим динамический **12**

— статический **12**
Реле 213
— времени 218
— малогабаритное постоянного тока серии РЭС 214
—— серии РМ-4 217
—— серии РСМ 218
— максимального тока серии РЭВ 220
———— РТ 220
— обратного тока 200
— обратной мощности 221
Ротаметр 74

## С

Светодиод **274**
Сельсин **160**
Сервомеханизм **10**
Сервомотор гидравлический лопастной 94
—— *мембранный* **94**
—— поршневой **94**
———— с вращательным выходным перемещением 102
———— двусторонним подводом жидкости 94
———— линейным выходным перемещением 99
———— односторонним подводом жидкости 94
Сеть пирометрическая 44
Сигнал ошибки **10**
Сигнализатор давления **61**
Сильфон **56**
*Система автоматизированная* дистанционного управления 9
— автоматического регулирования и управления **9**
———— напряжения синхронного генератора с гиристорами 247
— пневмоэлементов АУС 128, 145
—— «Волга» 128, 155
—— ПЭРА 128, 155
—— СМСТ-2 128, 155
—— «Старт» 128, 147
—— УСЭППА 128, 145
—— «Цикл» 157
Солемер **84**
— *электрический на переменном токе* 84
Сопло 65
Сопротивление внутреннее электронной лампы **256**
— динамическое опорного диода **269**
— термометрическое **36**, 39
Сосуд уравнительный **107**
Стабилитрон **259**
Схема логическая импульсная **18**
—— потенциальная **18**
—— потенциально-импульсная **18**
*Счетчик расхода* **62**
—— объемный **62**
———— дисковый 62
———— поршневой 62
———— роторный 64
———— шестеренный 63
—— скоростной **62**

## Т

Тахогенератор **81**
— асинхронный 165
— постоянного тока 159
Тахометр **79**
— стробоскопический 81
Тело абсолютно черное **48**
Тензорезистор 282
Термистор 282, 283
— косвенного подогрева 283
Термометр **36**
— *манометрический* **36**
— расширения **36**
— сопротивления электрический **36**, 39
Термопара **44**
Терморезистор полупроводниковый 283
— прямого подогрева 283
Термо э. д. с. 44
Термоэлектрод **44**
Тиратрон с холодным катодом 261
Тиристор **269**
Ток коллектора транзистора *наибольший* 278
———— неуправляемый **277**
— *наибольший рабочий* лампы неоновой **257**
—— стабилитрона **260**
— обратный диода выпрямительного полупроводникового **267**
— стабилизации диода опорного максимальный **269**
———— минимальный **269**
— стока в режиме насыщения полевого транзистора 278
— фотодиода световой **273**
—— темновой 273
Торсиометр **83**
— с индуктивным датчиком **83**
— с *проволочным* датчиком **83**
— с фотоэлектрическим датчиком 83
Транзистор 275
— биполярный 276
— полевой 278
— униполярный 278
Трансформатор вращающийся **159**
— поворотный **164**
Тринистор **269**, 272
Триод **252**
— полупроводниковый 275

Труба Вентури 69
Труба гидродинамическая 70
— Клеве **71**
— Пито **70**
— пневмометрическая 70
— Прандтля **71**
— электронно-лучевая 290

**У**

Узел функциональный **11**
—— логический **300**
Указатель уровня жидкости дистанционный **78**
Унификация 11
Управление электродвигателем переменного тока асинхронным амплитудное 232
——— амплитудно-фазовое 232
——— конденсаторное 232
——— фазовое 232
—— постоянного тока с независимым возбуждением комбинированное 231
———— со стороны обмотки возбуждения 230
———— со стороны якоря 228
Уравнемер **74**
Уравнение движения 13
— состояния газа 134
Усилитель гидравлический **9**
—— со струйной трубкой **92**
—— с регулирующей заслонкой **92**
—— струйный **93**
——— аналоговый 93
—— типа сопло—заслонка **91**
— дифференциальный 328
— магнитный 175
—— двухтактный 176
—— единой серии УМП 183
—— однотактный **176**
—— однофазный серии ТУМ 178
——— серии УМТ и УМТК 179
—— с самоиндукцией 175
— низкой частоты малошумящий 350
— операционный **204**
—— интегральный 329
— переменного тока 172
— пневматический **9**
— постоянного тока 170
——— прямого усиления 171
——— с преобразованием 171
— электрический **9**
— электромашинный 196
—— поперечного поля **196**
— электронный 170
Устройства автоматической защиты **10**
—— сигнализации **7**
— автоматического контроля **7**
— выходные магнитные серии УВМ 183
— вычислительные 11
— корректирующие гидравлических регуляторов 104
Устройство логическое **300**

**Ф**

Фильтр для очистки рабочей воды 107
Функция передаточная **15**

**Х**

Характеристика магнитного усилителя однотактного статическая 176
— нелинейная гидравлического сервомотора 103
—— типа насыщения **12**
——— с мертвой зоной **12**
— регулятора статическая **105**
— релейная **13**
— реле статическая 213
— с гистерезисной петлей **12**
— частотная амплитудно-фазовая **16**
— электродвигателя асинхронного двухфазного 233
λ-характеристика надежности 22

**Ч**

Число Рейнольдса **137**

**Э**

Электродвигатель асинхронный двухфазный 231
—— трехфазный 231
— переменного тока 231
— постоянного тока с независимым возбуждением 228
——— с последовательным возбуждением 231
Электромагнит 235
Электронно-лучевая трубка 290
Элемент задающий **9**
— исполнительный **9**
—— гидравлический 9
—— пневматический 9
—— электрический 9
— корректирующий **10**
— линейный **15**
— логический, логического действия 11, 18
— настройки 11
— нелинейный 15
— пневматический 127
—— дискретный 127
—— непрерывный 127
—— струйный 127
— пневмомеханический 127

— преобразующий **11**
— регистрирующий 9
— сигнализирующий 9
— сравнения **9**
— усилительный **9**
— чувствительный **7**
—— давления жидкостный **53**
——— пьезоэлектрический **54**, 60
——— упругий **53**
—— индукционный следящей системы 159
—— потенциометрический 158
—— расхода анемометрический **61**, 64
——— гидродинамический **61**, 70
——— дроссельный **61**, 64
——— индукционный **62**, 71
——— калориметрический **62**, 72
——— ротаметрический **62**, 72
——— ультразвуковой **62**, 71
—— температуры *биметаллический* **36**, 37
——— дилатометрический **36**, 38
——— жидкостностеклянный **35**
——— фотоэлектрический **36**
—— термоманометрический **36**
——— газовый **39**
——— жидкостный **38**
——— паровой (парожидкостный) **38**
—— термометрический **35**
—— терморадиационный **48**
—— термоэлектрический **36**, 44
—— уровня буйковый **74**, 75
——— емкостный **74**, 75
——— мембранный **74**, 75
——— термогидравлический **74**, 77
——— термостатный **74**, 77
—— поплавковый **74**
—— частоты вращения магнитоиндукционный **79**
———— стробоскопический **79**
————— тахогенераторный **79**
————— центробежный гидравлический **79**
————— механический **79**
—— электроманометрический **54**

## Я

Яркость свечения абсолютно черного тела **51**

# УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ


1. Автоматизация судовых энергетических установок. Л., «Судостроение», 1974. Под ред. проф. Р. А. Нелепина.

2. Алексеенко А. Г. Основы микросхемотехники. М., «Советское радио», 1971.

3. Андреев А. А. Автоматические показывающие, самопишущие и регулирующие приборы. Л., «Машиностроение», 1973.

4. Бесконтактные устройства телемеханики. М., «Энергия», 1973. Авт.: И. В. Прангишвили и др.

5. Бесконтактные элементы самонастраивающихся систем. М., «Машиностроение», 1968. Авт.: А. М. Бонч-Бруевич, В. Л. Быков, П. И. Чинаев.

6. Богачева А. В. Пневматические элементы систем автоматического управления. М., «Машиностроение», 1966.

7. Будянов В. П. Элементы автоматики на варисторах. М., «Энергия», 1968.

8. Верхопятницкий П. Д. Конструирование судовой автоматики на микромодулях. Л., «Судостроение», 1971.

9. Верхопятницкий П. Д. Микроэлектронная элементная база. Л., Ин-т повышения квалификации работников судостр. пром., 1974.

10. Залманзон Л. А. Теория элементов пневмоники. М., «Наука», 1969.

11. Казиннер Ю. Я., Слободкин М. С. Пневматические исполнительные

устройства в системах автоматического управления. М., «Энергия», 1972.
12. Константинов В. Г. Многофазные преобразователи на транзисторах. М., «Энергия», 1972.
13. Коссов О. А., Хасаев О. П Полностью управляемые тиристоры в схемах автоматики. М., «Энергия», 1970.
14. Кузнецов В. И БИАС — транзисторные схемы. Минск, «Наука и техника», 1968.
15. Курносов А. И., Воронков Э. Н. Полупроводниковая микроэлектроника. М., Воениздат МО СССР, 1973.
16. Кошарский Б. Д. и др. Автоматические приборы, регуляторы и управляющие машины. Л., «Машиностроение», 1968.
17. Лавриненко В. Ю. Справочник по полупроводниковым приборам Издание 4-е. Киев, «Техника», 1966.
18. Лебедев А. Н. Счетно-решающие устройства. М., «Машиностроение», 1966.
19. Лопухина Е. М., Сомихина Г. С. Асинхронные микромашины с полым ротором. М., «Энергия», 1967.
20. Нежиков О. А. Схемы логических устройств на ферромагнитных сердечниках лестничного типа. М., «Энергия», 1969.
21. Основы автоматического регулирования. Т. II. Ч. I. Под редакцией В. В. Солодовникова.
22. Обухов В. И. Мостовые схемы в системах автоматики. Минск, «Наука и техника», 1966.
23. Прусенко В. С. Пневматические датчики и вторичные приборы. М., «Энергия», 1965.
24. Ройзен С. С., Стефанович Т. Х. Магнитные усилители в электроприводе и автоматике. М., «Энергия», 1970.
25. Семенов В. В., Степура Э. Ф. Нелинейные вычислительные устройства на магнитных усилителях. М.—Л., «Энергия», 1966.
26. Справочник по основам электронной техники. Изд. Киевского университета, 1972. Авт.: Б. С. Горшунский, А. В. Романовская, Н. М. Ващенко, В. В. Власенко.
27. Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Издание 2-е. М., «Энергия», 1967.
28. Счетно-решающие устройства. М., «Машиностроение», 1966. Авт.: С. О. Доброгурский, В. А. Казаков, Л. А. Соломонов, В. К. Титов.
29. Тезисы докладов на I Всесоюзном совещании, посвященном созданию элементной базы судовых систем автоматического управления. Л., «Судостроение», 1971.

30. Тургенев В. И. Корректирующие звенья в следящих системах на полупроводниковых приборах. М.—Л., «Энергия», 1966.
31. Хрущов В. В. Электрические микромашины переменного тока для устройств автоматики. М., «Энергия», 1969.
32. Цыкин Г. С. Усилительные устройства. Издание 4-е. М., «Связь», 1971.
33. Чудаков А. Д. Цифровые устройства пневмоники. М., «Энергия», 1971.
34. Шегал Г. Л., Коротков Г. С. Электрические исполнительные механизмы в системах управления. М., «Энергия», 1968.
35. Boothe W. A. A Lumped Parameter Technique for Predicting Analog Fluid Amplifier Dynamics. Joint Automatic Control Conf., Stanford, Cal., June, 1964.
36. Ferner V. Anschauliche Regelungstechnik. Berlin, Ver Verlag Technik, 1963.
37. Fluid Power Control. Edited by J. F. Blackburn, G. Reethof, J. L. Shearer. New York—London, 1960.
38. Gluskin R. S., Jacoby M., Reader T. D. A Pure—Fluid—Operated Digital Apmlifier. — «Joint Automatic Control Conf.», 1965, June 22—29, p. 669—677.
39. Khambata A. J. Introduction to Large—Scale—Integration. Wiley—Interscience a Division of John Wiley and Sons. New York—London—Sydney—Toronto, 1969.
40. Töpfer H., Schrepel D., Schwarz A. Pneumatische Stekerungen. VEB Verlag Technik, Berlin, 1967.

# ОГЛАВЛЕНИЕ


ПРЕДИСЛОВИЕ 5

ГЛАВА I
ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

§ 1. НАЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ 7
§ 2. ЭЛЕМЕНТЫ НЕПРЕРЫВНЫХ СИСТЕМ 11
§ 3. ЭЛЕМЕНТЫ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ 16
§ 4. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ 20

ГЛАВА II
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ПРИБОРЫ

§ 5. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ . . . . 35
§ 6. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ . . . . . 53
§ 7. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА . . . . . 61
§ 8. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ 74
§ 9. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ 78
§ 10. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА 82
§ 11. СОЛЕМЕРЫ . . . 84
§ 12. КИСЛОРОДОМЕРЫ 86
§ 13 ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ . . . . . —

ГЛАВА III
ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

§ 14. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ . . . . . 89
§ 15. СИСТЕМА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ВОДЕ 95
§ 16. ТИПОВЫЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ . . . . . 110

ГЛАВА IV
ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

§ 17. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ 127
§ 18. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ . . 130

§ 19. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ . . . . 138
§ 20. УНИФИЦИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ И ПРИБОРОВ 145

ГЛАВА V
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

§ 21. ДАТЧИКИ . . . 158
§ 22. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ, НАПРЯЖЕНИЯ, ТОКА . . . 169
§ 23. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ . . . 204
§ 24. РЕЛЕ И ДРУГИЕ ДИСКРЕТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ . . . 213
§ 25. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ 228
§ 26. ТИПОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ . . . 241

ГЛАВА VI
ЭЛЕКТРОННЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

§ 27. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ 252
§ 28. ИОННЫЕ ПРИБОРЫ . . . . . 256
§ 29. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ 263
§ 30. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТРИОДЫ 275
§ 31. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ РЕЗИСТОРЫ . . . . . 282
§ 32. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ 291

ГЛАВА VII
ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

§ 33. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ . . . . . 293
§ 34. ЛОГИЧЕСКИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ . . . 295
§ 35. ЛИНЕЙНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ . . . 325
§ 36. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ . . . . 353
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ 355
УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ . . . . . 361

Э-45 **Элементы** судовой автоматики. Л. Под ред. Р. А. Нелепина, «Судостроение», 1976. 365 с.

В справочнике помещены материалы по элементам и устройствам судовых систем автоматики. Рассмотрены гидравлические, пневматические, электрические и электронные, непрерывные и дискретные элементы. Изложены принципы действия, устройства и основные характеристики чувствительных элементов, измерительных приборов, усилителей и исполнительных элементов применяемых на морских судах. Приведены основные сведения о надежности этих элементов.

Справочник рассчитан на широкий круг инженерно-технических работников конструкторских бюро, научно-исследовательских институтов, заводов и на судовых механиков, занимающихся проектированием, монтажом и эксплуатацией судовой автоматики. Книга может быть полезна аспирантам и студентам вузов

$\text{Э}\ \frac{31805-061}{048(01)-76}\ 57\text{-}75$

6Т4.1

ЭЛЕМЕНТЫ
СУДОВОЙ
АВТОМАТИКИ

Под ред. докт. техн. наук проф. Р. А. Нелепина
Редактор Л. А. Турандина
Художественные редакторы В. Т. Левченко
и В. А. Пурицкий
Технический редактор Р. К. Чистякова
Корректоры И. П. Острогорова и Л. Г. Тамашкович
Оформление художника Б. Н. Осенчакова
Сдано в набор 30/V 1975 г. Подписано в печать 21/IV 1976 г
М-26736. Формат издания $60\times90^1/_{16}$. Бумага типографская № 1. Усл. печ. л. 23,0. Уч.-изд. л. 28,6
Тираж 9500 экз. Заказ № 321. Изд. № 3016-74
Цена 1 р. 68 к.
Издательство «Судостроение», 191065,
Ленинград, ул. Гоголя, 8.
Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
193144, Ленинград, С-144, ул. Моисеенко, 10

В 1977 г.
В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ
«СУДОСТРОЕНИЕ» ВЫЙДЕТ
КНИГА ШИФРИНА М. Ш.
«ДИНАМИКА СУДОВЫХ
ПАРОПРОИЗВОДЯЩИХ
УСТАНОВОК»

●

Рассмотрены методы структурного анализа судовых паропроизводящих установок как единых динамических систем. Исходя из этого анализа, а также общих исходных положений термодинамики, гидромеханики и кибернетики изложены теоретические основы построения математической модели судовых паропроизводящих установок различных типов как в нелинейном, так и в линеаризованном виде.

На основе построенных математических моделей показано влияние структуры, статических и динамических характеристик отдельных аккумуляторов тепла на динамические свойства паропроизводящей установки. Приведены основные принципы построения систем регулирования рабочего процесса.

Круг читателей: научные и инженерно-технические работники, специализирующиеся в области динамики и регулирования паропроизводящих установок.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «СУДОСТРОЕНИЕ»

# НОВАЯ КНИГА

●

## К СВЕДЕНИЮ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ, ЗАНИМАЮЩИХСЯ ИССЛЕДОВАНИЕМ, ПРОЕКТИРОВАНИЕМ, ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ И НАЛАДКОЙ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

●

Издательство «Судостроение» выпустило справочное пособие «Автоматизация судовых энергетических установок» под ред. докт. техн. наук проф. Р. А. Нелепина. Это первая книга, систематизирующая в полном объеме сведения по устройству, основам проектирования, эксплуатации и наладке отечественных систем автоматизации судовых дизельных, паросиловых и газотурбинных энергетических установок, судовых электростанций, вспомогательных котельных установок и судовых систем. В работе над книгой приняли участие ведущие конструкторы и ученые в области автоматизации судов.

Книга рассчитана на широкий круг инженерно-технических работников. Большая часть материалов вполне доступна читателям, не имеющим специальной теоретической подготовки по автоматическому управлению.

Для оформления заказа необходимо сделать письменную заявку в ближайший магазин технической книги, указав количество нужных Вам книг. В случае отказа запросы следует направлять по адресам: 190031, Ленинград, Садовая, 40, маг. № 2; 198035, Ленинград, Двинская, 8, маг. № 89.