МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(ДГТУ)

Факультет	Энергетика и нефтегазопромышленность
Кафедра	АММ НГК
Направление	15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств (бакалавриат)

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ «Электроавтоматика»

Общие рекомендации по изучению дисциплины

Важной частью изучения дисциплины «Электроавтоматика» является самостоятельная работа над учебным материалом. К моменту изучения данной дисциплины студентами уже освоены основные понятия и законы. Поэтому советуем просмотреть конспекты лекций по изученным дисциплинам и освежить знания. После каждого занятия проводить проработку лекционного материала, разбор экспериментов лабораторного практикума, чтение и конспектирование учебной литературы, рекомендованной преподавателем. Выполнять домашние задания. Готовить вопросы.

При изучении учебного материала рекомендуется вести отдельные конспекты: конспект лекций, конспект лабораторных занятий и конспект самостоятельной работы над учебной литературой. В конспектах рекомендуется выделять важные выводы и формулы, проделывать вычисления и выводы уравнений, предложенных для самостоятельного изучения.

Целесообразно в процессе изучения материала вести специальную тетрадь-справочник, содержащую основные определения, формулировки законов, формулы, уравнения и т.п.

Также рекомендуется составить лист, содержащий важнейшие и наиболее часто употребляемые понятия, правила и уравнения курса. Такой лист помогает быстрее их запомнить.

При подготовке к лабораторным занятиям необходимо повторить пройденный материал. Самостоятельно искать ответы на поставленные вопросы.

Методические рекомендации по работе с литературой

Основным, наиболее эффективным методом учебы была и остается самостоятельная работа с учебной литературой.

Умение самостоятельно изучать учебную литературу имеет не только методическое, но и большое мировоззренческое значение. Обращаясь к различным литературным источникам, студент сравнивает точки зрения их авторов на ту или иную проблему, оценивает убедительность аргументации, сопоставляет с личными знаниями. Так развивается самостоятельность мышления, приобретаются навыки аналитического подхода к прочитанному.

Каждый студент обязан уметь работать с учебной литературой, настойчиво вырабатывать умение самостоятельно пополнять свои знания, овладевать культурой чтения. Это значит, что студент должен глубоко понимать содержание учебного источника, извлекать и усваивать все ценное, что в нем есть, пользоваться научно-справочным аппаратом, уметь делать выписки, составлять планы и конспекты изучаемых источников.

Внимательное чтение учебной литературы предполагает активную умственную работу, выполняя которую, студент не только следит за мыслью автора и логикой его доказательств, но и критически их оценивает. Следует научиться выделять главное из прочитанного. Это способствует формированию последовательного, логического мышления, а также помогает хорошему запоминанию материала. Прочитав материал в целом, следует подробнее остановиться на его отдельных частях, подбирая конкретный фактический, цифровой материал.

Для лучшего запоминания и усвоения изучаемой темы есть много путей. Наиболее эффективный из них – ведение конспекта прочитанного. Ведя конспект, студент приобретает важные навыки: умение отбирать и обобщать главное, кратко формулировать основные положения, анализировать прочитанный материал. Содержание изученной темы благодаря этому прочно остается в памяти.

Начинать конспектировать нужно с указания библиографических сведений о книге. Это делается для того, чтобы в любое время по мере надобности можно было возвратиться к прочитанному, установить, откуда почерпнуты те или иные положения и факты.

Существует несколько форм ведения записей, и было бы неправильным рекомендовать какую-либо из них. Выбор той или иной формы записей зависит от индивидуальных особенностей студента, работающего с книгой, его опыта, свойств памяти. Не меньшую роль играет назначение конспекта: для самообразования, для выступления на семинаре, для использования в будущем и т.п. Однако в любом случае конспекты должны быть краткими.

Следовательно, чтобы успешно заниматься самостоятельно с учебной литературой, необходимо в совершенстве овладеть всеми приемами работы с учебником. Конечно, главное в этом деле – опыт, который накапливается со временем. Не все сразу будет получаться, могут возникнуть затруднения, препятствия. И здесь для студента особенно важны: внутренняя собранность, самодисциплина, настойчивость, упорство в достижении поставленной цели.

В то же время задача преподавателя помочь студентам, впервые приступившим к самостоятельному изучению учебной литературы, овладеть соответствующими приемами. Эту цель и преследуют настоящие методические рекомендации.

Методические рекомендации по подготовке к экзамену

При подготовке к экзамену следует, прежде всего, изучить конспект лекций и отметить в нем имеющиеся экзаменационные вопросы. Если какие-то вопросы вынесены преподавателем на самостоятельное изучение, следует обратиться к учебной литературе, рекомендованной преподавателем в учебно-методическом комплексе дисциплины.

Не следует стремиться к механическому запоминанию формулировок понятий, правил и законов. Вполне эффективной может оказаться попытка понять суть явления, выработать свое отношение к нему, опираясь на материал, содержащейся в рекомендуемой литературе. При выводе уравнений рекомендуется знать идею вывода, план. Ответить на контрольные вопросы в методических указаниях и пособиях, указанных в рекомендуемой литературе. Своевременно (до экзамена) подготовить вопросы. Задать вопросы лектору на консультации.

Полезно при подготовке к экзамену выписать в отдельную тетрадь краткие ответы на все вопросы экзамена – вне зависимости от того, есть ли они в материалах лекций, или были изучены по учебной литературе.

Также при подготовке к экзамену полезно читать вслух ответы на вопросы – это способствует развитию речи и улучшает восприятие и запоминание информации.

Полезно выписать отдельно все формулы и уравнения, относящиеся к вопросам экзамена.

Для самопроверки рекомендуется провести следующий опыт: при закрытой тетради, положив перед собой список вопросов для подготовки к экзамену, попытаться ответить на любые вопросы из этого списка.

При подготовке к экзамену необходимо учесть требования, предъявляемые к студентам и критерии оценки знаний, приведенные УМК дисциплины.

Методические рекомендации по организации лабораторных работ

Лабораторные занятия относятся к наиболее сложным видам аудиторных занятий, как для студентов, так и для преподавателей. Каждое занятие включает, как правило, четыре последовательных этапа, при этом последовательно чередуется индивидуальная самостоятельная домашняя работа студентов и аудиторные занятия. Лабораторные занятия включают следующие этапы работ:

1. Подготовка к выполнению работы

Домашняя подготовка студента к выполнению работы включает следующие этапы:

– Студент должен по учебникам (учебному пособию) проработать соответствующий теоретический материал, имеющий непосредственное отношение к теме лабораторной работы. Это нужно для осмысленного выполнения опытов.

– Студент должен ознакомиться с методикой выполнения задания по Методическим указаниям к работе. Студент знакомится с целью работы, необходимым оборудованием и материалами для работы, а так же с ходом выполнения лабораторных работ.

– Студент описывает методику выполнения работы в своем журнале (в тетради для лабораторных и практических работ).

2. Выполнение работы на занятии

Студент должен ознакомиться с методическими указаниями для работы на рабочем месте (техникой безопасности, оборудованием, материалами и т.п.).

В соответствии с Методическими указаниями выполнить всю работу.

По полученным данным студенты производят расчеты (если необходимо), записывают наблюдения, строят графики и делают выводы. В конце занятия студенты получают у преподавателя письменное подтверждение, что работа выполнена, верно. Для этого преподаватель расписывается в лабораторной тетради: пишет «выполнено», ставит дату и подпись. В случае получения неправильных результатов, работу надо переделать, т.е. выполнить повторно.

3. Оформление работы

В большинстве случаев это домашний этап работы. В журнале студент оформляет работу: заполняет отчеты по проведенным экспериментам. В отчетах должна быть представлена следующая информация: тема работы; цель работы; материалы и оборудование; результаты выполнения работы; наблюдения; ответы на контрольные вопросы; при необходимости начерчены

графики функций на миллиметровой бумаге, или с использованием компьютера; по целям работы должны быть сформулированы выводы.

Если время позволяет, то оформить работу можно на занятии (после выполнения лабораторной работы и подтверждения преподавателем правильности полученных результатов). Если студент по какой-либо причине не успевает это сделать на занятии, то оформляет работу дома.

4. Защита работы

Под защитой лабораторной работы подразумевается:

– Представление преподавателю своего отчета по работе (тетради) с полностью оформленной работой и проверка её преподавателем.

– Ответы на контрольные вопросы по теории и методике эксперимента.

– Сдать работу преподавателю (т.е. защитить её на оценку) можно на этом же занятии. Но если оформление работы громоздкое или большая часть времени ушла на выполнение работы, то чаще всего защита выполненной лабораторной работы проводится на следующем занятии.

Для оценки результатов работы используются следующие критерии:

– знание теоретического материала по теме работы;

– глубина изучения дополнительной литературы;

– глубина и полнота ответов на контрольные вопросы.

Отметка «отлично» выставляется студенту, глубоко и прочно усвоившему программный материал, исчерпывающе, последовательно, грамотно и логически стройно его излагающему, в ответе которого увязывается теория с практикой, он показывает знакомство с монографической литературой.

Отметка «хорошо» выставляется студенту, твердо знающему программный материал, грамотно и по существу, излагающему его, который не допускает существенных неточностей в ответе на вопрос, правильно применяет теоретические положения при решении практических вопросов.

Отметка «удовлетворительно» выставляется студенту, который знает только основной материал, но не усвоил его деталей, допускает в ответе неточности, недостаточно правильно формулирует основные законы и правила, затрудняется в выполнении тестовых заданий.

Отметка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки, с затруднениями выполняет тестовые задания.

ЛЕКЦИИ
по дисциплине

Лекция 1
Полупроводники
и полупроводниковые приборы

➢ Теория полупроводников и переходов

В зависимости от удельной проводимости все вещества можно разделить на три группы: проводники, полупроводники и диэлектрики. Удельная проводимость – величина, обратная удельному сопротивлению:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \qquad (1)$$

Для проводников удельная проводимость гораздо больше нуля, для диэлектриков – примерно равна нулю, полупроводники занимают промежуточное положение. Электропроводность вещества зависит от его атомных свойств (см. рис. 1, где по оси W отложены возможные энергетические уровни электронов в атоме). У проводников электроны легко достигают высших энергетических уровней (зоны проводимости) и покидают атом. Именно наличие свободных электронов определяет электропроводность. У диэлектриков между зоной проводимости и нормальными энергетическими уровнями (валентная зона) электронов существует запретная зона, где наличие электронов в нормальном состоянии вещества невозможно. Это приводит к практическому отсутствию свободных электронов. У полупроводников также имеется запретная зона, но ширина ее гораздо меньше, чем у диэлектриков, поэтому относительно большое (но гораздо меньшее, чем у проводников) количество электронов обладает способностью перейти на высшие энергетические уровни и далее покинуть атом. Необходимо отметить, что к полупроводникам относится большинство веществ и спектр их свойств весьма широк.

В отличие от проводников у полупроводников существует два вида электропроводности – **электронная** и **дырочная**. Электронная, как и в проводниках, осуществляется свободными электронами. Носителем заряда при дырочной электропроводности является атом, потерявший электрон и вследствие этого приобретший положительный заряд. Но в отличие от электронной электропроводности носители зарядов, жестко закрепленные в кристаллической решетке, не перемещаются. Положительно заряженный атом, именуемый дыркой, создает вокруг себя поле, которое облегчает для соседних атомов переход электронов на высшие энергетические уровни. Первоначальная дырка поглощает электрон, отданный соседним атомом, и нейтрализуется им. Далее процесс переноса заряда повторяется. Таким образом, *дырочная электропроводность есть дрейф положительных зарядов, но не их носителей*.

а *б* *в*

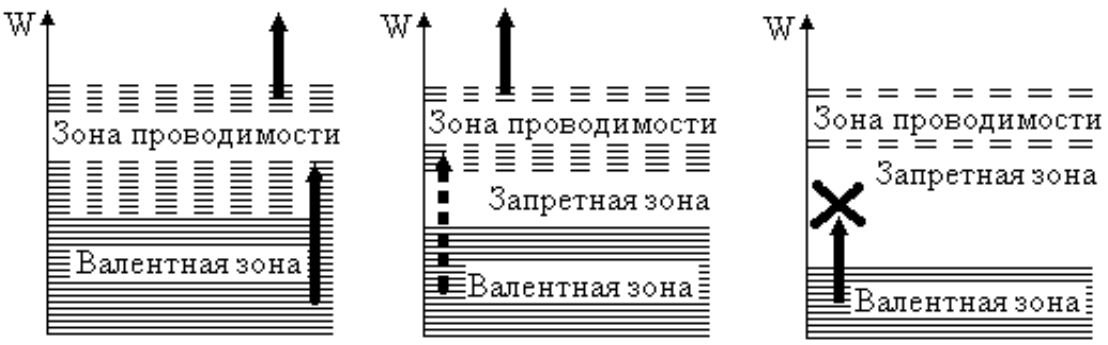


Рис. 1. Схема энергетических уровней электронов: *а* – проводник; *б* – полупроводник; *в* – диэлектрик

В невозбужденном состоянии вещества, при температуре абсолютного нуля, все электроны находятся на низших энергетических уровнях, и полупроводник является диэлектриком – он не обладает электропроводностью. При повышении температуры, ионизирующем или световом облучении, воздействии электромагнитных полей, активность электронов повышается, и какое-то число их проходит запретную зону и покидает атом, создавая пару электрон–дырка. Число дырок равно числу свободных электронов, вместе они составляют *пару зарядов*. Этот процесс именуется *генерацией пар зарядов*. Одновременно с этим за счет хаотичного теплового движения происходят встречи электронов и дырок и их совместная нейтрализация. Этот процесс именуется *рекомбинацией пар зарядов.* Совместное действие генерации и рекомбинации создает определенную концентрацию пар зарядов, соответствующую уровню возбуждения вещества. Таким образом, *электропроводность полупроводника зависит от его состояния*. Полупроводник без примесей именуется *собственным полупроводником* или полупроводником *i-типа* (от лат. individe). Собственная электропроводность складывается у него из электропроводности обоих типов, но электронная – преобладает за счет большей подвижности электронов. Необходимо отметить, что собственные полупроводники получили в технике незначительное распространение. Гораздо больше распространены *примесные полупроводники.* В их состав входят базовое вещество и небольшое количество примеси. В качестве базового вещества чаще всего используются германий Ge и кремний Si. Вещество примеси по валентности должно отличаться от базового. Так, при добавлении в четырехвалентный германий пятивалентных сурьмы Sb или мышьяка As, их атомы взаимодействуют с атомами германия только четырьмя своими электронами, а пятый электрон уходит в зону проводимости. Таким образом, число свободных электронов превышает число дырок. Примеси, атомы которых отдают электроны, именуются *донорами* (дающими), а у полупроводников с такими примесями электронная электропроводность превышает дырочную. Такие полупроводники получили наименование *электронных полупроводников* или *полупроводников n-типа* (от лат. negative отрицательный).

Если к германию Ge добавляются трехвалентные индий In или алюминий Al, то их атомы отнимают электроны от атомов германия, и в полупроводнике образуется переизбыток дырок. Такие примеси именуются *акцепторами*

(отбирающими). В таком случае дырочная электропроводность превышает электронную, и полупроводники получили наименование *дырочных полупроводников* или *полупроводников p–типа* (от лат. positive положительный). Необходимо отметить, что количество примесей должно быть ничтожным. Так, при концентрации примеси 10^{-4} % соответствующая проводимость увеличивается в 1000 раз.

Наиболее интересной с позиции электроники является граница между полупроводниками с различной электропроводностью. Эта граница получила наименование *переход*. Физические процессы в переходе иллюстрирует рис. 2. Известно явление, когда вещества, ионы, электроны, дырки и так далее перемещаются из зоны, где их концентрация велика, в соседнюю зону, где концентрация меньше. Это целенаправленное перемещение получило название *диффузии*. В зоне перехода электроны и дырки диффундируют в соседнюю зону, соответственно электроны из p-полупроводника, где их избыток, в n-полупроводник, где их недостаток, а дырки – наоборот. На рис. 2 диффузное перемещение электронов и дырок показано основными стрелками. За счет диффузного перемещения носителей в граничном слое создаются объемные заряды: отрицательный – в p-зоне и положительный – в n-зоне. Разница граничных зарядов представляет собой *потенциальный барьер перехода*, который схематично представлен на графике (рис. 2). Здесь d – толщина граничного слоя (обычно 10^{-4}–10^{-6} см); φ – ось потенциалов, $u_к$ – потенциальный барьер (обычно 0,3–0,7 В). Граничные заряды создают электрическое поле, вектор напряженности $E_к$ которого направлен от n-зоны к p-зоне. Под воздействием этого поля возникают обратные потоки (ток проводимости) носителей заряда (на рисунке показаны пунктирными стрелками). При отсутствии внешней разницы потенциалов диффузный ток и ток проводимости находятся в состоянии динамического равновесия. Рассмотрим состояние перехода при действии прямого и обратного напряжения.

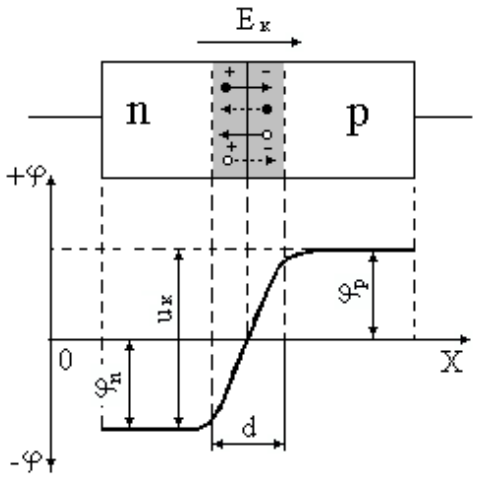


Рис. 2. n–p-переход при отсутствии внешнего напряжения

Под *прямым напряжением* принимается такое подключение перехода к электрической цепи, при котором n-зона подключена к отрицательному полюсу, а p-зона – к положительному (рис. 3,*а*). Прямое напряжение создает электрическое поле, вектор напряженности $E_{пр}$ которого направлен противоположно вектору $E_к$. Потенциальный барьер понижается до величины $u_к - u_{пр}$, при этом возрастает диффузный ток $I_Д$ (носителям легче преодолеть пониженный барьер), а ток проводимости $I_{ПР}$ практически не изменяется. Полный ток через переход

$$I_П = I_Д - I_{ПР} \approx \left| \text{при } I_Д >> I_{ПР} \right| \approx Iд. \qquad (2)$$

Введение носителей заряда в область, где они являются неосновными, получило название *инжекции носителей заряда* (инжекция означает введение, впрыскивание). Зона, откуда инжектируются носители, именуется *эмиттером*, а куда инжектируются – *базой*. Для инжекции электронов эмиттером является n-зона, а базой – p-зона, для инжекции дырок – наоборот. Обычно концентрация носителей в переходе отличается на несколько порядков. Соответственно с этим различаются и инжекции носителей. Наименования эмиттер и база у полупроводникового прибора присваиваются по преобладающей инжекции.

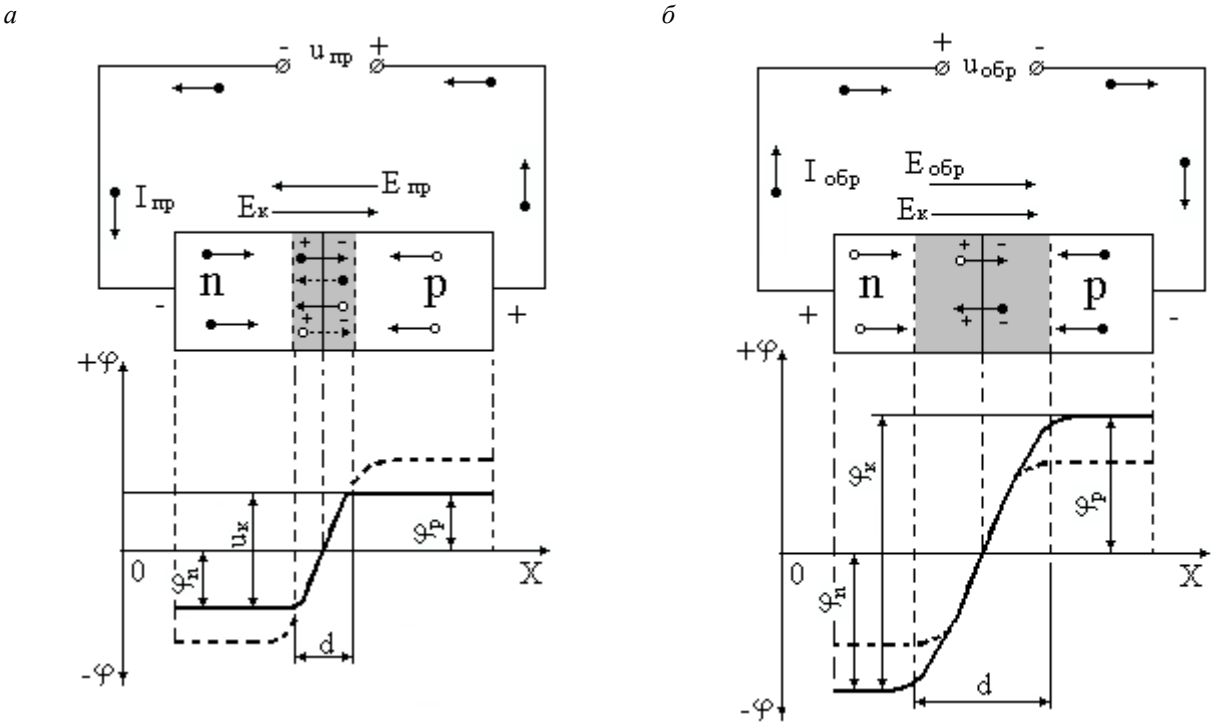


Рис. 3. n–p-переход при наличии внешнего напряжения: а – прямого; б – обратного

В случае обратного напряжения (n-зона подключена к положительному полюсу, а p-зона – к отрицательному) картина полностью противоположна (рис. 3,*б*). Вектора напряженности $E_к$ и $E_{обр}$ совпадают, потенциальный барьер возрастает до величины $u_к + u_{обр}$. Диффузия носителей практически прекращается, $I_Д = 0$, через переход проходит только ток проводимости – перенос неосновных носителей ускоряющим полем, вызванным внешним напряжением. Этот перенос именуется *экстракцией носителей заряда* (экстракция означает извлечение, выдергивание). Таким образом, обратный ток $I_{обр}$ представляет собой ток проводимости, образованный экстракцией неосновных носителей. Так как неосновных носителей очень мало, обратный ток крайне незначителен. Таким образом, полупроводниковый прибор, содержащий один n–p-переход, обладает свойством вентиля – при прямом подключении он пропускает относительно большой (десятки и сотни миллиампер) ток при малом сопротивлении перехода, а при обратном – крайне незначительный ток.

➢ Полупроводниковые приборы

Диоды. Полупроводниковый прибор, обладающий одним n–p-переходом, именуется *диодом*. Вольтамперная характеристика диода приведена на рис. 4, его условное обозначение – на рис. 5. *Вольтамперная характеристика* – важнейшая для любого электрического прибора, графически иллюстрирующая закон Ома

$$U = IR \text{ (или } I = \frac{U}{R}\text{)}.$$

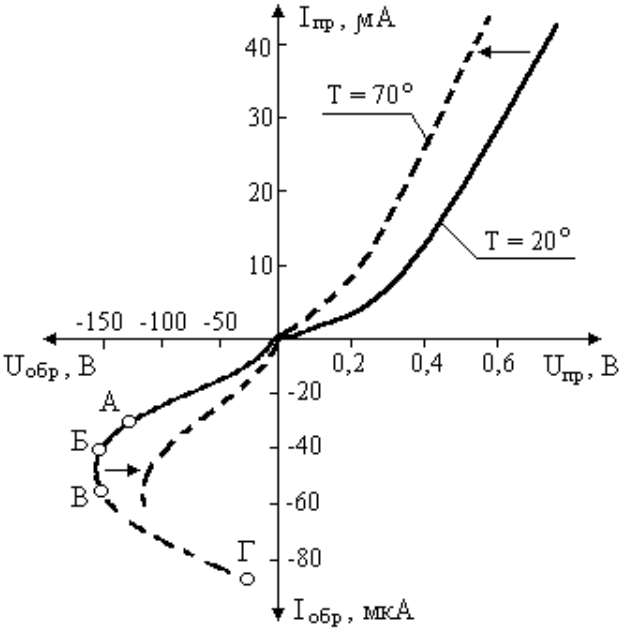


Рис. 4. Вольтамперная характеристика диода

Так как обратный ток меньше прямого на порядки, то для повышения наглядности графика масштабы в первом (область прямого напряжения) и третьем (область обратного напряжения) квадрантах приняты разными. Как видно из рис. 4, характеристика нелинейна на всем своем протяжении, причем возле начала координат нелинейность выражена более явно. Затем заряд и сопротивление стабилизируются, и дальнейшая нелинейность объясняется нагревом граничного слоя. Начиная с точки А, дальнейшее повышение обратного напряжения вызывает *пробой* p–n-перехода – электрический (участок А–Б–В) и тепловой (участок В–Г). Электрический пробой обратим. Он может быть двух типов – *лавинный* и *туннельный*.

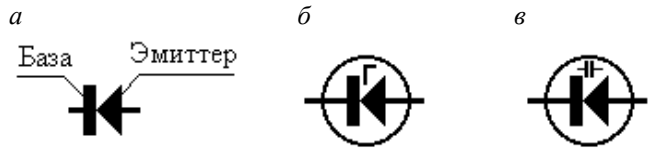


Рис. 5. Условные обозначения диодов: *а* – диод; *б* – стабилитрон; *в* – варикап

Лавинный пробой объясняется резким увеличением числа носителей зарядов при *ударной лавинной ионизации перехода* при определенном обратном напряжении. Характерен для относительно толстых переходных слоев с невысоким содержанием примесей. Туннельный пробой объясняется *туннельным эффектом* – при определенных условиях (тонкий переходной слой, высокое содержание примесей, высокое обратное напряжение) некоторые электроны проходят переход, практически не изменяя своей энергии. Переходной слой при этом несколько уподобляется по своим свойствам проводнику. В режиме электрического пробоя работают некоторые виды специальных диодов, например *стабилитроны*, применяющиеся для стабилизации напряжения. Условное обозначение стабилитронов приведено на рис. 5. Рабочий участок характеристики для стабилитронов – Б–В, на котором характеристика практически вертикальна (U

= const.). Тепловой пробой вызывается перегревом перехода и необратим – при нем разрушается вещество переходного слоя.

Изменение температуры приводит к изменению сопротивления полупроводника по закону

$$R = Ke^{-\alpha T}, \qquad (3)$$

где K и α – константы, T – температура. Это вызывает поворот вольтамперной характеристики против часовой стрелки (см. рис. 4).

Анализируя рис. 4, можно отметить, что при обратном напряжении переход обладает диэлектрической прослойкой (потенциальный барьер) и двумя областями разноименных зарядов, т. е. *диод при обратном напряжении обладает свойствами конденсатора со значительной утечкой (обратный ток) в диэлектрике*. График зависимости емкости С диода от обратного напряжения $U_{обр}$ приведен на рис. 6. При этом необходимо заметить, что емкость диода может изменяться, причем электрически – при изменении обратного напряжения. На этом основан принцип действия *варикапа* – специализированного диода, работающего на обратном напряжении и выполняющего функцию конденсатора с переменной емкостью с дистанционным изменением емкости при помощи напряжения.

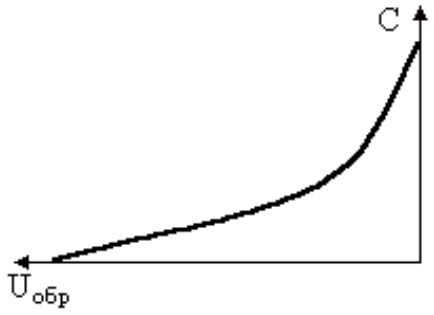


Рис. 6. Емкостные свойства диода

Благодаря своим свойствам диоды используются в системах управления в качестве:

- выпрямителя переменного тока. Известно выпрямление переменного тока при помощи диода следующими способами (рис. 7):

– *одинарным диодом*. Диод пропускает положительную полуволну напряжения и задерживает отрицательную. Ток и напряжение приобретают ярко выраженную пульсацию. Так как каждый диод обладает емкостными свойствами, пульсирующая синусоида несколько сглаживается (см. следующий способ);

– *с конденсаторным сглаживанием*. Параллельно диоду устанавливается конденсатор. В пике напряжения он заряжается, поглощая электрический заряд. Как только напряжение окажется ниже заряда конденсатора, он разряжается. За счет этого происходит сглаживание пульсации;

– *диодным мостом*. Четыре диода включены в *плечи моста* между двумя *диагоналями* a – b (вход) и c – d (выход). Это очень распространенная в технике *мостовая схема*. В то время, когда ток проходит через диоды, расположенные на одних плечах, другие заперты и наоборот. Таким образом, на выходную диагональ постоянно подается выпрямленное напряжение. Этот выпрямитель наиболее эффективен и наиболее часто применяется в системах управления;

- составной части логических элементов (см. лекцию 9);
- стабилизатора напряжения (см. *стабилитроны*);
- дистанционного конденсатора переменной емкости (см. *варикапы).*

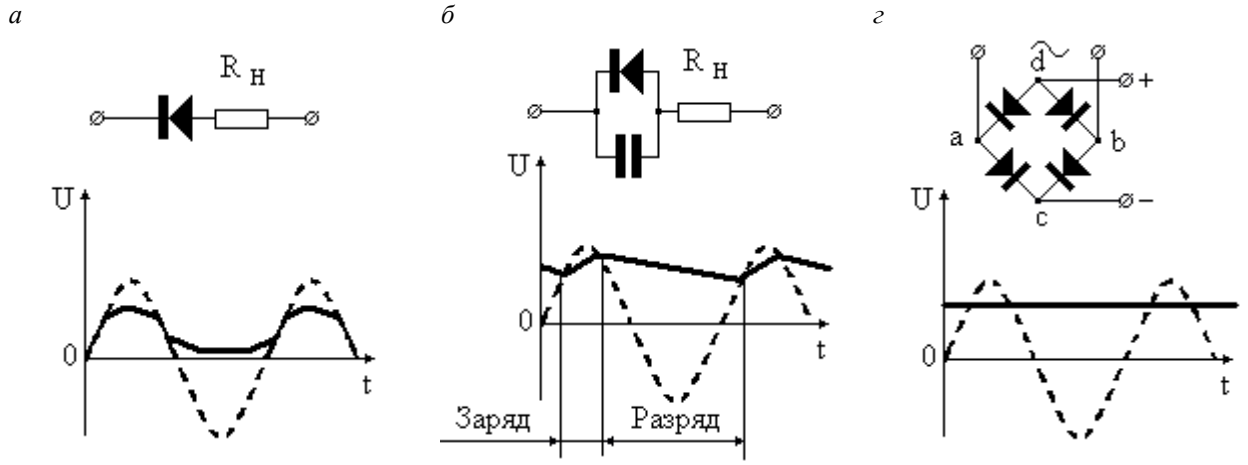


Рис. 7. Диодные выпрямители: *а* – одинарный диод; *б* – конденсаторное сглаживание; *в* – диодный мост

Транзисторы. В отличие от диодов транзисторы имеют как минимум два (иногда больше) перехода. Чаще всего используются транзисторы с двумя переходами между тремя слоями полупроводников, каждый из которых имеет свой вывод – *полупроводниковые триоды*. В зависимости от типа и расположения слоев транзисторы подразделяются на n–p–n и p–n–p-типы. Средняя область транзистора именуется *базой*, одна из крайних – *эмиттером*, другая – *коллектором* (рис. 8). На условных обозначениях стрелка показывает направление тока от плюса к минусу в выводе эмиттера. Транзистор может работать в трех режимах в зависимости от того, каковы напряжения на его переходах. Работа в *активном режиме* получается в случае, когда на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном – обратное. *Режим отсечки* или *запирания* достигается подачей обратного напряжения на оба перехода. Если на обоих переходах напряжение прямое, транзистор работает в *режиме насыщения*. В наиболее частых случаях использования транзисторов (в усилителях и генераторах частоты) транзисторы работают в активном режиме. Поэтому этот режим будет рассмотрен более подробно. Для примера рассмотрим работу n–p–n-транзистора в статике, без нагрузки, когда включены только постоянные питающие напряжения E_1 и E_2 (рис. 9,*а*). Полярность напряжений такова, что на эмиттерном переходе напряжение прямое, а на коллекторном – обратное.

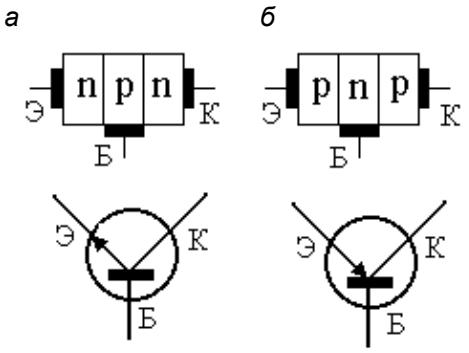


Рис. 8. Схемы слоев и обозначения транзисторов: *а* – для n–p–n-типа; *б* – p–n–p-типа

Поэтому сопротивление эмиттерного перехода мало и для обеспечения нормального тока в этом переходе достаточно небольшого напряжения E_1 (порядка десятых долей вольта). Сопротивление коллекторного перехода велико, и напряжение E_2 для протекания нормального коллекторного тока

обычно составляет единицы и десятки вольт. Напряжения между электродами связаны зависимостью

$$U_{К\text{-}Э} = U_{К\text{-}Б} + U_{Б\text{-}Э}, \qquad (4)$$

где $U_{К\text{-}Э}$, $U_{К\text{-}Б}$, $U_{Б\text{-}Э}$ – соответственно напряжения между коллектором и эмиттером, коллектором и базой, базой и эмиттером. Так как при активном режиме $U_{Б\text{-}Э} << U_{К\text{-}Б}$, следовательно,

$$U_{К-Э} \approx U_{К-Б}. \qquad (5)$$

Вольтамперная характеристика эмиттерного перехода соответствует участку прямого напряжения (первый квадрант графика см. на рис. 4), а коллекторного – участку обратного напряжения (третий квадрант).

Принцип работы транзистора заключается в том, что *прямое напряжение эмиттерного перехода* $U_{Б\text{-}Э}$ *существенно влияет на ток, протекающий через коллекторный переход*.

При увеличении $U_{Б\text{-}Э}$ уменьшается потенциальный барьер эмиттерного перехода, соответственно падает его сопротивление и возрастает эмиттерный ток $I_Э$. Электроны этого тока инжектируются из эмиттера в базу и благодаря явлению диффузии проникают сквозь базу в коллектор, увеличивая ток коллектора $I_К$. Так как коллекторный переход работает на обратном напряжении, в нем возникают объемные заряды (на рис. 9,*а* обозначены знаками + и -).

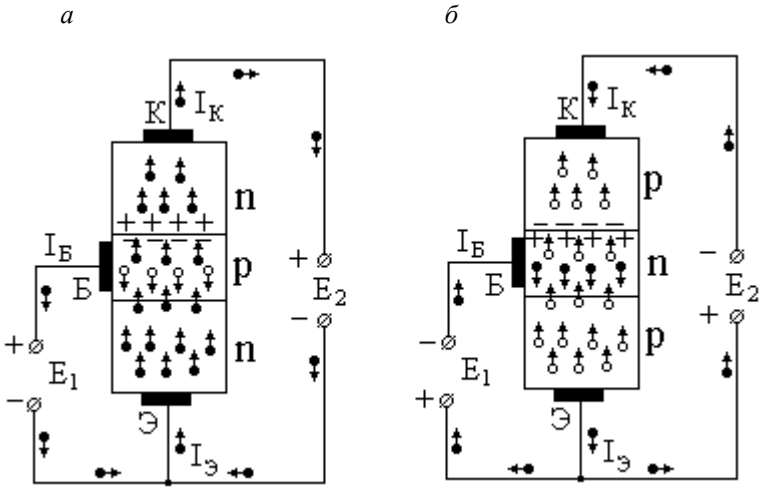


Рис. 9. Движение зарядов в транзисторе:
а – для n–p–n-типа; *б* – p–n–p-типа

Между ними возникает электрическое поле, втягивающее (*экстрагирующее*) электроны, пришедшие от эмиттера, через коллекторный переход.

Если толщина базы относительно мала и концентрация примесей (следовательно, концентрация дырок) в ней относительно невелика, большинство транзитных электронов от эмиттера на коллектор, проходя через базу, не успевают рекомбинировать с дырками базы и достигают коллекторного перехода. Рекомбинирующие электроны создают ток базы $I_Б$. Число электронов в базе должно оставаться постоянным. Следовательно, сколько транзитных

электронов рекомбинировало с дырками, столько собственных электронов базы должно покинуть ее с током $I_Б$. В соответствии с первым законом Кирхгофа

$$I_Э = I_К + I_Б. \qquad (6)$$

Ток базы представляет собой утечки основного потока коллектор – база – эмиттер и должен быть как можно меньше. Именно для этого базу и делают тонкой и слабо насыщенной дырками. Обычно $I_Б = I_Б (1 \ldots 3 \cdot 10^{-3})$. Поэтому

$$I_Э \approx I_К. \qquad (7)$$

Основное свойство транзистора, позволяющее использовать его в качестве усилителя, заключается в следующем: ***незначительные изменения напряжения на эмиттерном переходе приводят к гораздо большим изменениям коллекторного тока***. Рекомендуемое определение электродов транзистора: *эмиттером называется область, из которой инжектируются носители в базу; коллектором – область, в которую экстрагируются заряды из базы; базой – область, в которую инжектируются эмиттером неосновные для нее носители.*

Потенциальная диаграмма переходов транзистора представлена на рис. 10. Если представить электрон в виде шарика, а диаграмму – в виде вертикального профиля его беговой дорожки, можно составить механическую аналогию работы переходов: шарику необходимо затратить небольшое количество энергии, чтобы преодолеть подъем на первом переходе; преодолев его, шарик получает гораздо больше энергии, скатываясь со спуска на втором переходе.

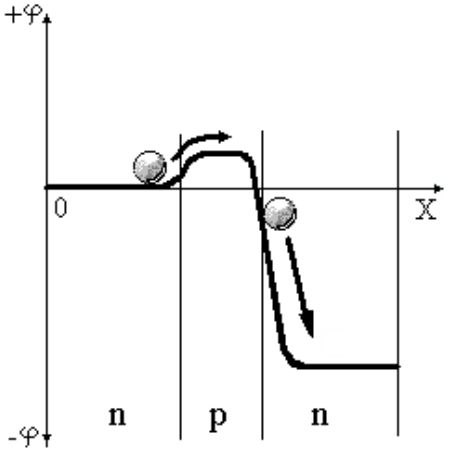


Рис. 10. Потенциальная диаграмма транзистора

Процессы, протекающие в p–n–p-транзисторе (рис. 9,*б*) аналогичны рассмотренным с точностью до наоборот – электроны и дырки меняются местами. Основными носителями заряда для базы являются электроны, а неосновными – дырки. Последние и инжектируются эмиттером на базу, чтобы затем экстрагироваться в коллектор, по пути рекомбинируя с электронами и порождая тем самым ток базы.

Так как в коллекторном переходе рассеивается больше энергии, чем в эмиттерном, площадь первого делают больше. В некоторых транзисторах малой мощности площади переходов равны. Такие транзисторы именуются *симметричными* и для них эмиттером и коллектором является любая из крайних областей.

Так же как у диода, у транзистора повышение обратного напряжения на коллекторе может вызвать пробой коллекторного перехода – сначала

обратимый электрический (лавинный и туннельный), затем при повышении напряжения – необратимый тепловой.

Из рис. 9 видно, что полупроводниковый триод представляет собой прибор, объединяющий две цепи – входную, с напряжением питания E_1, которая управляет напряжением $U_{Б\text{-}Э}$, и выходную, с напряжением питания E_2, по которой протекает управляемый ток $I_К$. Но для подключения к двум цепям нужно четыре вывода (электрода), а у транзистора их три. Следовательно, один из электродов у транзистора должен быть общим для обеих цепей. Отсюда одно из важных отрицательных свойств транзистора – *входная и выходная цепи электрически не разобщены полностью* (как говорят электрики – между этими цепями нет *электрической развязки*). Любой из электродов может быть общим. На рис. 11 приведены схемы подключения транзисторов с общим эмиттером (ОЭ), общей базой (ОБ), общим коллектором (ОК) и распространенная схема питания цепей транзистора.

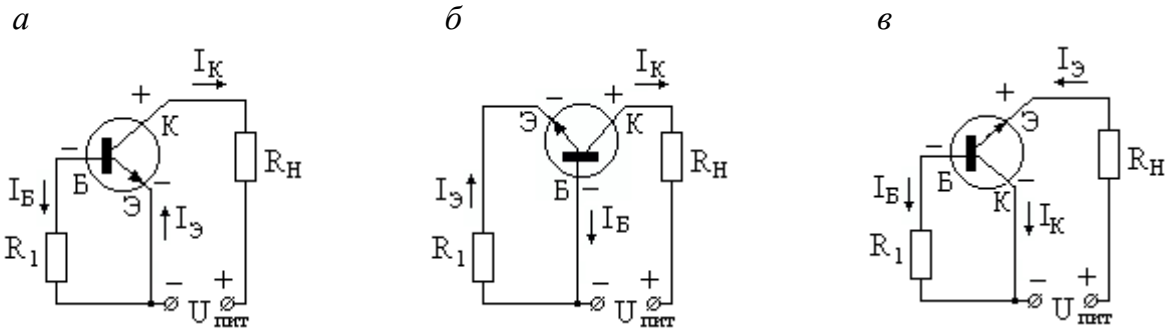


Рис. 11. Схемы подключения транзисторов с p–n–p-переходом: *а* – с эмиттером (ОЭ); *б* – с базой (ОБ); *в* – с коллектором (ОК)

Обеспечить питание цепей от двух независимых источников E_1 и E_2 технически сложно и, как правило, не нужно. Вместо этого используют питание от одного источника в выходной цепи $U_{ПИТ}$, а для того чтобы выполнить условие $E_1 < E_2$, используется понижение напряжения входной цепи при помощи последовательно включенного сопротивления R_1. Для последовательного соединения

$$U_{ПИТ} = E_1 + \Delta U_{R_1} = E_1 + I_Б R_1, \quad (8)$$

следовательно увеличение R_1 вызывает уменьшение E_1. Сопротивление R_1 для схемы ОБ именуется *эмиттерным*, для остальных схем – *базовым*. Разница потенциалов ΔU_{R_1} называется *напряжением смещения базы.*

Важнейшими характеристиками транзистора являются *входная* и *выходная.* Для удобства все

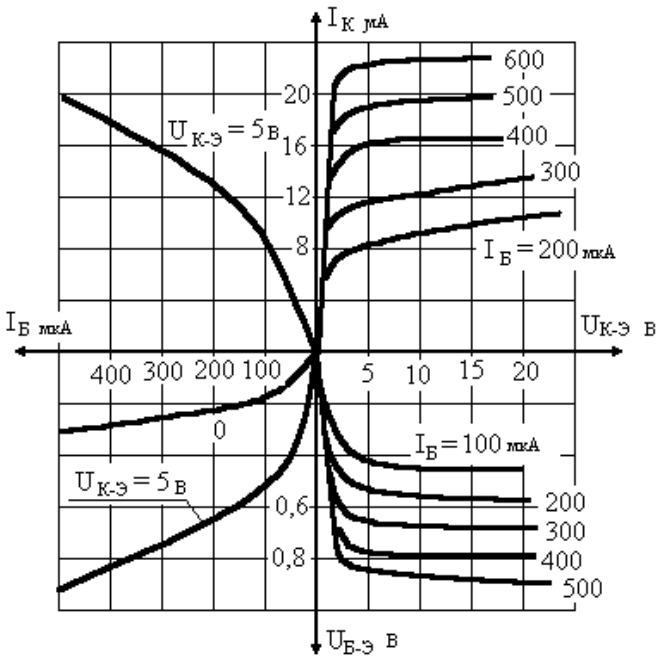


Рис. 12. Совмещенная характеристика транзистора

характеристики транзистора сводятся в четыре квадранта одного графика (рис. 12). На рисунке приведена совмещенная характеристика для транзистора, включенного по схеме ОЭ. Входная характеристика $I_Б = f(U_{Б-Э})$ графически иллюстрирует закон Ома для входной цепи транзистора, выходная $I_К = f(U_{К-Э})$.

Эти характеристики располагаются соответственно в третьем и первом квадрантах совмещенной характеристики. Обе они определяют один из переходов (входная – эмиттер-базовый, выходная – базоколлекторный) и поэтому соответствуют участкам вольтамперной характеристики диода: входная – участку прямого напряжения, выходная – обратного.

Но оба перехода транзистора связаны достаточно тесно, поэтому обе характеристики представлены не единичными линиями, а семействами кривых. Связь между входной и выходной характеристиками выражается *токовой характеристикой* $I_К = f(I_Б)$ (четвертый квадрант). Оставшийся второй квадрант занимает *потенциальная характеристика* $U_{Б-Э} = f(U_{К-Э})$. Так как в ней отражена зависимость входного напряжения от выходного, то эта характеристика именуется также *характеристикой обратной связи транзистора.* Последняя используется редко и зачастую опускается. По совмещенной характеристике можно определить следующие статические характеристики транзистора:

– коэффициент усиления по току

$$k_I = \frac{\Delta I_Б}{\Delta I_К}; \tag{9}$$

– коэффициент усиления по напряжению

$$k_U = \frac{\Delta U_{Б-Э}}{\Delta U_{К-Э}}; \tag{10}$$

– коэффициент усиления по мощности

$$k_P = \frac{\Delta I_Б \Delta U_{Б-Э}}{\Delta I_К \Delta U_{К-Э}}; \tag{11}$$

– входное сопротивление

$$R_{ВХ} = \frac{U_{Б-Э}}{I_Б}; \tag{12}$$

– выходное сопротивление

$$R_{ВЫХ} = \frac{U_{К-Э}}{I_К}. \tag{13}$$

Порядок величин этих характеристик для различных схем включения транзисторов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Важнейшие свойства основных схем включения транзисторов

Параметр	Схема ОЭ	Схема ОБ	Схема ОК
k_I	Десятки	Немного меньше единицы	Десятки
k_U	До сотен	До сотен	Немного меньше единицы
k_P	До тысяч и более	До сотен	Десятки
R_{BX}	До килоом	До десятков ом	До десятков килоом
$R_{BЫX}$	До десятков килоом	До сотен килоом	До килоом

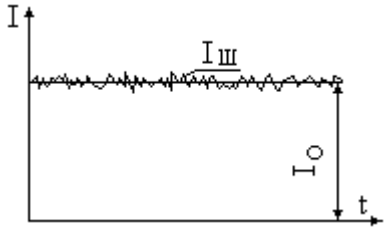


Рис. 13. Флуктуации тока

В любой электрической цепи часть электронов не участвует в направленном электрическом токе, а совершает хаотические тепловые перемещения. За счет этого даже при постоянном токе величина тока беспорядочно изменяется с крайне незначительной амплитудой и состоит из двух составляющих – постоянной I_O и переменной $I_Ш$ (рис. 13). Для выходной цепи транзистора, обладающего усилительным эффектом эти флуктуации становятся достаточно значимыми. Хаотические флуктуации тока получили наименование *собственного шума транзистора*. Название шум присвоено потому, что проще всего этот эффект наблюдать в транзисторном радиоприемнике. При отсутствии внешнего сигнала приемник издает шум определенного уровня.

Для усилителей, содержащих полупроводниковые транзисторы (так же, как и для других), уровень собственного шума необходимо учитывать при определении *порога чувствительности* – величины минимального входного сигнала, на который реагирует усилитель. Уровень собственного шума должен быть ниже порога чувствительности. Шумовое напряжение можно определить по формуле Найквиста

$$U_Ш = \sqrt{4kTRП_{ПР}}\,, \qquad (14)$$

где k – постоянная Больцмана, приблизительно $1{,}38\cdot10^{-23}$ дж/град; T – абсолютная температура; R – сопротивление; $П_{ПР}$ – ширина полосы пропускаемых частот.

В системах управления транзисторы чаще всего используются как составные части электронных усилителей и генераторов частоты.

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое физическая основа проводимости полупроводников?
2. Какова должна быть валентность донорных и акцепторных примесей по отношению к базовому веществу?
3. Что такое потенциальный барьер перехода?
4. Каков принцип действия полупроводникового диода?
5. Что такое стабилитрон, варикап?

6. Какова область применения полупроводниковых диодов?

7. Опишите распределение потенциалов в различных типах транзисторов?

8. Опишите схемы подключения транзисторов. Для чего служит сопротивление базы (эмиттера)?

9. Расшифруйте совмещенную характеристику транзистора.

10. Какие существует главные статические характеристики транзистора?

Лекция 2
Специальные полупроводниковые
и электровакуумные приборы

➢**Туннельные диоды**

Японский ученый Есаки предложил в 1958 г. *туннельный диод*, который отличался от остальных диодов тем, что основным рабочим режимом для него является туннельный пробой. Как и в обычном диоде в нем имеется один p–n-переход. Но в отличие от обычного, концентрация примесей чрезвычайно высока (порядка 10^{19}–10^{20} см$^{-3}$). Это приводит к удельному сопротивлению, в сотни и тысячи раз меньшему, чем у обычных диодов. Полупроводники со столь ничтожным сопротивлением именуются *вырожденными*. Толщина перехода в вырожденном полупроводнике в десятки раз меньше (порядка 10^{-5} мм), а потенциальный барьер примерно в два раза выше. В туннельных диодах существует диффузия носителей через переход и обратный дрейф под влиянием электрического поля на переходе. Но основную роль играет туннельный эффект. Он состоит в том, что в соответствии с законами квантовой физики, при достаточно малой толщине потенциального барьера, имеется значимая вероятность прохождения барьера электронами без изменения их энергии. Он возможен и в том случае, если энергия электрода, выраженная в электронвольтах -эВ, ниже потенциального барьера в вольтах. Необходимое условие: для электронов по другую сторону барьера должны иметься свободные уровни энергии. Процессы в туннельном диоде иллюстрируют энергетические диаграммы (рис. 14). Они представляют собой комбинацию из схем энергетических уровней (см. рис. 1) и потенциальных диаграмм перехода (см. рис. 3). Помимо их распределения они показывают уровни энергии в валентных зонах и зонах проводимости по обе стороны барьера. Вследствие контактной разницы потенциалов зоны в одной области сдвинуты по отношению к другой на высоту потенциального барьера. На диаграммах указан только туннельный ток. Диаграмма на рис. 14,*а* соответствует отсутствию внешнего напряжения. Контактный потенциальный барьер составляет в приведенном примере 0,8 эВ, а ширина запретной зоны – 0,6 эВ. Между областями существует коридор, туннель шириной 0,2 эВ, с обоих торцов которого располагаются валентные зоны. Так как условия прохождения туннеля в обе стороны одинаковы, по нему в обоих направлениях протекают туннельные токи, и суммарный ток через переход равен нулю.

При подаче на переход прямого напряжения 0,1 В (рис. 14,*б*) потенциальный барьер снижается на эту величину и составляет 0,7 эВ. С правого торца туннеля расположены валентные уровни, с левого – уровни проводимости.

а *б*

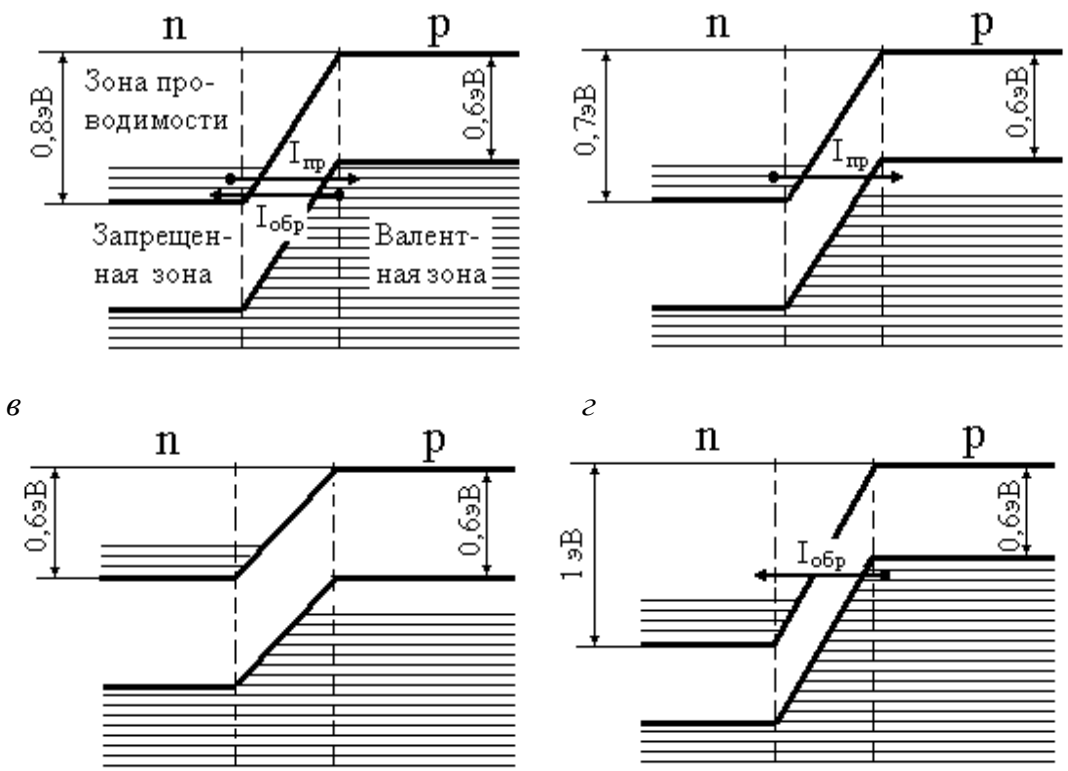


Рис. 14. Энергетические диаграммы n–p-перехода в туннельном диоде: *а* – U = 0; *б* – U = 0,1 В; *в* – U = 0,2 В; *г* – $U_{ОБР}$ = 0,2 В

Соответственно туннельный ток течет слева направо (прямой ток). При дальнейшем увеличении прямого напряжения (на рис. 14,*в* – до 0,2 В) области слева и справа от перехода еще больше смещаются и туннель перекрывается – нет ни одного «смежного» для обеих областей энергетического уровня, на котором может разместиться электрон проводимости, т. е. не выполняется условие туннельного перехода.

На рис. 14,*г* изображен переход под воздействием обратного напряжения 0,2 В. Потенциальный барьер составляет 0,8 эВ + 0,2 В = 1 эВ. Верхний валентный уровень справа расположен выше такового слева. За счет этого образуется туннель шириной 1 эВ – 0,6 эВ = 0,4 эВ, по которому течет обратный ток – справа налево. Квадрант прямого напряжения вольтамперной характеристики туннельного диода приведен на рис. 15.

В точке 0 суммарный ток отсутствует, и точка соответствует ситуации рис. 14,*а*. При повышении прямого напряжения $U_{ПР}$ в интервале 0 – А в переходе появляется и расширяется энергетический туннель. Прямой туннельный ток резко возрастает и в точ
рис. 14,*б*).

При дальнейшем повышении $U_{ПР}$ п
чезновения его в точке Б. Соответствен
который в точке Б равен нулю. Дальнейше
диффузным и полевым токами, как и
вольтамперная характеристика обычного
касается вольтамперной характеристики п
обратного туннельного тока она так же п

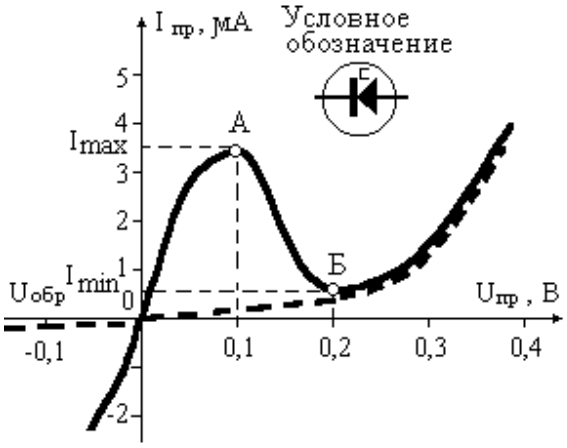


Рис. 15. Характеристика туннельного диода

Участок А–Б обладает отрицательным углом наклона к оси U, что как бы противоречит закону Ома. Поэтому у вырожденных полупроводников имеется второе название – *полупроводники с отрицательным сопротивлением.* Термин лишен физического смысла – отрицательного сопротивления не бывает – но вместе с тем очень образен, что и привело к его широкому распространению.

На рис. 15 характеристика участка А–Б обладает высокой крутизной – незначительное изменение напряжения ведет к резкому изменению тока. Это привело к широкому применению туннельных диодов в усилителях, бесконтактных переключателях, генераторах сверхвысокой (до десятков гигагерц) частоты – СВЧ.

➢Тиристоры

Другим видом полупроводниковых приборов с отрицательным сопротивлением являются тиристоры. Они подразделяются на *диодные (динисторы)* и *триодные (тринисторы)*.

Динистор обладает тремя p-n переходами по схеме n-p-n-p. Структура динистора приведена на рис. 16. Там же приведена эквивалентная схема динистора в виде двух транзисторов p–n–p и n–p–n-типов, поясняющая принцип его работы. Как видно из структуры, два перехода $П_1$ и $П_3$ – работают в прямом направлении, а $П_2$ – в обратном. В эквивалентной схеме $П_1$ и $П_3$ являются эмиттерными переходами транзисторов соответственно $Т_1$ и $Т_2$, а $П_2$ – коллекторным переходом обоих транзисторов.

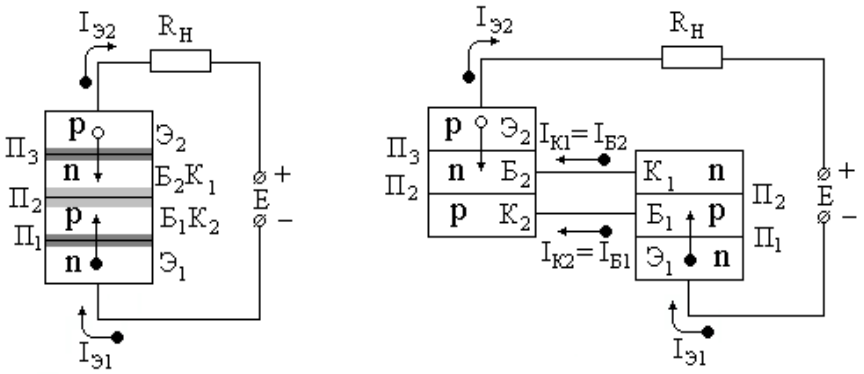


Рис. 16. Структура динистора и его эквивалентная схема

Область базы $Б_1$ транзистора $Т_1$ одновременно является коллекторной областью $К_2$ транзистора $Т_2$, а область базы $Б_2$ транзистора $Т_2$ – коллекторной областью $К_1$ транзистора $Т_1$. Соответственно этому коллекторный ток первого транзистора $I_{К1}$ является током базы второго транзистора $I_{Б2}$, а $I_{К2}$ представляет собой $I_{Б1}$. При отсутствии остальных переходов, через переход $П_2$ (коллекторный), работающий на обратном напряжении, протекал бы небольшой обратный ток, созданный неосновными носителями. Но если в базу транзистора со стороны эмиттера инжектируются в большом количестве неосновные носители, коллекторный ток возрастает пропорционально прямому напряжению эмиттерного перехода, которое и является причиной инжекции. Напряжение на коллекторе наоборот уменьшается, так как падает сопротивление коллекторного перехода. Описанная ситуация соответствует режиму насыщения обычного транзистора. Нечто подобное происходит и в

данном случае. Через переходы $П_1$ и $П_3$ в области, примыкающие к переходу $П_2$ инжектируются неосновные носители, которые уменьшают сопротивление в нем, увеличивают ток и уменьшают падение напряжения.

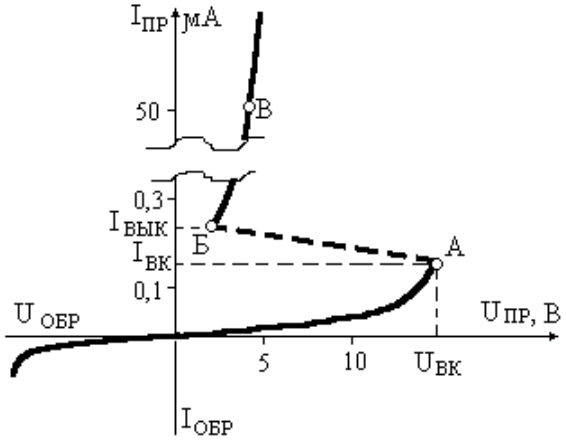


Рис. 17. Характеристика динистора

При повышении напряжения на динисторе ток сначала растет медленно, что соответствует вольтамперной характеристике обычного диода (участок 0–А на рис. 17). Прибор как бы «заперт». Сопротивление перехода $П_2$ еще велико, и так как почти все внешнее напряжение реализуется на $П_2$, напряжения на $П_1$ и $П_3$ незначительны. И поэтому прямой ток p-n переходов мал. При увеличении напряжения вследствие нелинейности характеристики ток начинает возрастать все сильнее. Но при этом число носителей, инжектируемых в области $П_2$ возрастает, сопротивление этого перехода падает, соответственно растет напряжение на переходах $П_1$ и $П_2$ и растет прямой ток, т. е. процесс начинает подстегивать сам себя. При *напряжении включения* $U_{ВК}$ (точка А) процесс приобретает лавинообразный характер.

Ток резко, скачком возрастает, при этом за счет уменьшения сопротивления $П_2$ также резко падает напряжение на этом переходе (участок А–Б). В точке Б концентрация инжектированных носителей в зоне $П_2$ достигает такой величины, что создаются объемные заряды, соответствующие прямому включению. Таким образом, все переходы динистора находятся под прямым напряжением, что соответствует режиму насыщения простого транзистора. А этот режим характеризуют большие токи при относительно малом напряжении (участок Б–В). Направление участка А–Б под отрицательным углом к оси U позволяет причислить тиристоры к полупроводникам с отрицательным сопротивлением. Резкое, скачкообразное изменение характеристики позволяет использовать тиристоры в качестве переключающей аппаратуры, в частности, для бесконтактного управления силовыми электродвигателями.

Если от одной из базовых областей сделать вывод, получится управляемый переключающий прибор, именуемый *триодным тиристором* или *тринистором*. Вольтамперная характеристика приведена на рис. 18. Подавая на вывод управления прямое напряжение, можно регулировать $U_{ВК}$. Чем больше ток $I_{УПР}$ через управляемый переход, тем ниже будет $U_{ВК}$. Параметры у тринисторов в принципе такие же, что у динисторов, с добавлением величин, характеризующих управляющую цепь.

Обычные тринисторы не запираются при помощи управляющей цепи, для их запирания необходимо уменьшить ток до величины ниже $I_{ВЫК}$. Однако разработаны тринисторы, для запирания которых достаточно через управляющий электрод подать короткий импульс обратного напряжения. Разработаны также *симметричные тринисторы*, имеющие структуру n–p–n–p–

n (вольтамперная характеристика приведена на рис. 19), отпирающиеся при любой полярности управляющего напряжения и одинаково проводящие ток в обоих направлениях.

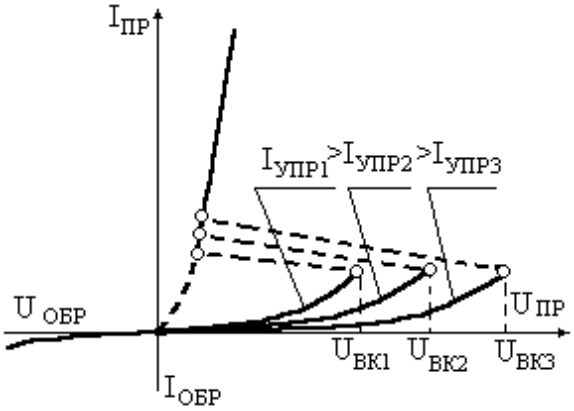


Рис. 18. Характеристики тринистора

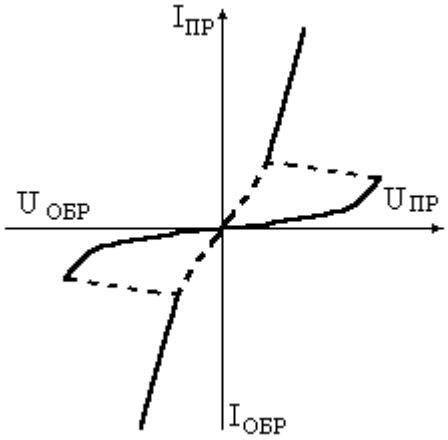


Рис. 19. Характеристика симметричного тринистора

Условные обозначения тринисторов на электросхемах приведены на рис. 20.

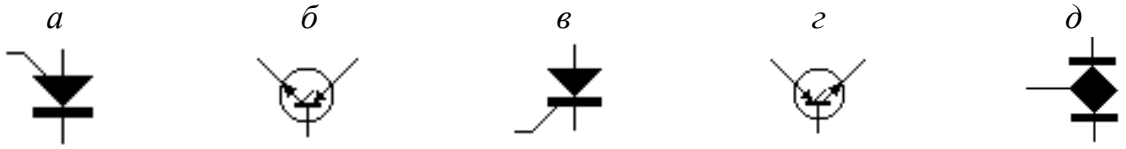


Рис. 20. Условные обозначения тринисторов: *а* и *б* – с выводом от n-области; *в* и *г* – с выводом от p-области; *д* – симметричного тринистора

➢ Полевые транзисторы

Идею *полевых* транзисторов, именуемых также *канальными* или *униполярными* (для отличия от обычных транзисторов, названных *биполярными*), предложил еще в 1952 г. один из изобретателей транзисторов Шокли. Главным достоинством полевых транзисторов является высокое входное сопротивление, соизмеримое с таковым у электродных ламп.

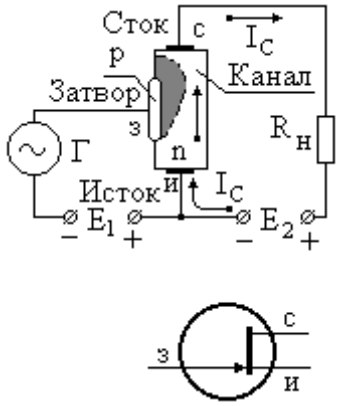


Рис. 21. Схема включения полевого транзистора с p-n переходом

Принцип устройства и включения полевого транзистора с *p–n*-переходом, а так же его условное изображение показаны на рис. 21. Пластинка из полупроводника, например, *n*-типа, имеет на противоположных концах электроды, с помощью которых она включена в выходную (управляемую) цепь усилительного каскада. Эта цепь питается от источника E_2 и в нее включена нагрузка R_H . Вдоль транзистора проходит ток основных носителей. В нашем примере это электронный ток. Входная (управляющая) цепь транзистора образована с помощью третьего электрода, представляющего собой область с другим типом электропроводности. В данном случае это *p*-область.

Источник питания входной цепи E_1 создает на единственном *p–n*-переходе данного транзистора обратное напряжение. Во входную цепь включен источник усиливаемых колебаний Г.

Физические процессы в полевом транзисторе происходят следующим образом. При изменении входного напряжения, являющегося обратным напряжением, изменяется толщина запирающего (объединенного) слоя *p–n*-перехода, показанного на рис. 21 штриховкой. Соответственно меняется поперечное сечение области, через которую проходит ток основных носителей заряда, т. е. выходной ток. Эта область называется *каналом*.

Электрод, от которого в канал втекают основные носители заряда, называют *истоком* И. Из канала носители переходят к электроду, который называется *стоком* С. Исток и сток аналогичны соответственно катоду и аноду электронной лампы. Иногда их так и называют. Управляющий электрод, предназначенный для регулирования поперечного сечения канала, называемого, *затвором* З и в какой-то степени аналогичен базе биполярного транзистора, хотя по физическим принципам своей работы затвор и база различны.

Если увеличивать по абсолютной величине входное напряжение, т. е. напряжение затвора $U_З$, то запирающий слой *p–n*-перехода становится толще, и поперечное сечение канала уменьшается. Следовательно, его сопротивление постоянному току R_0 возрастает и ток стока I_c становится меньше. При некотором запирающем напряжении $U_{З.зап}$ площадь поперечного сечения станет равной нулю и ток I_C будет весьма малым. Транзистор будет заперт. А при $U_З$ = 0 сечение канала наибольшее, R_0 имеет наименьшее значение (порядка сотен Ом), и ток I_C будет наибольшим. Для того чтобы входное напряжение наиболее эффективно управляло выходным током, основной полупроводник, в котором создан канал, применяется сравнительно высокоомный, т. е. концентрация примесей в нем относительно невелика. Тогда запирающий слой в нем получается большей толщины. Кроме того, начальная толщина самого канала (при $U_З$ = 0) должна быть достаточно малой. Обычно она не превышает нескольких микрон. Запирающее напряжение $U_{З.зап}$ при этих условиях имеет величину порядка единиц или десятков вольт.

Поскольку вдоль канала потенциал повышается по мере приближения к стоку, то на участках, ближе к стоку, обратное напряжение *p–n*-перехода увеличивается, и толщина запирающего слоя получается больше.

Управляющее действие затвора наглядно показывают *управляющие* (*стокозатворные*) *характеристики*, выражающие зависимость $I_c=f(U_З)$, при U_c=const (рис. 22). Однако эти характеристики неудобны для расчетов и на практике пользуются выходными характеристиками.

На рис. 23 изображены *выходные* (*стоковые*) *характеристики* канального транзистора $I_c=f(U_З)$, при $U_З$=const.

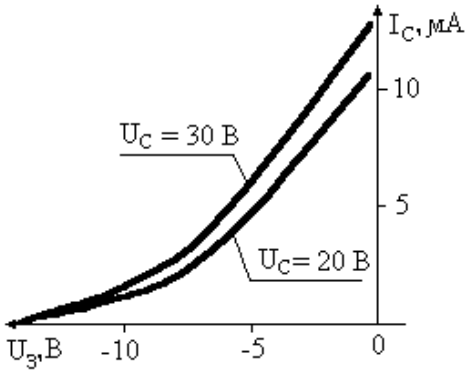


Рис. 22. Управляющие (стокозатворные) характеристики полевого транзистора

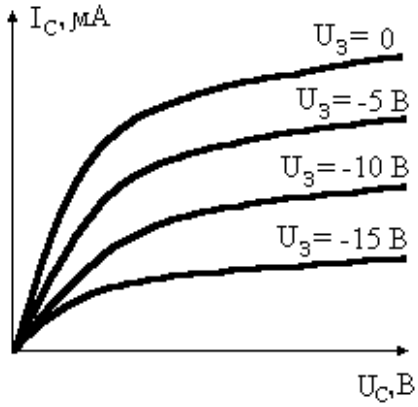


Рис. 23. Выходные (стоковые) характеристики полевого транзистора

Они показывают, что с увеличением U_c ток I_c сначала растет довольно быстро, а затем это нарастание замедляется и почти совсем прекращается, т. е. наступает явление, напоминающее насыщение. Это объясняется тем, что при повышении U_c ток должен увеличиваться, но, так как одновременно происходит повышение обратного напряжения на *p–n*-переходе, то запирающий слой расширяется, канал суживается, т. е. его сопротивление возрастает и за счет этого ток I_c должен уменьшиться.

Таким образом, происходят два взаимно противоположных влияния на ток, который в результате остается почти постоянным. При подаче более отрицательного напряжения на затвор ток I_c уменьшается и характеристика проходит ниже.

Повышение напряжения стока в конце концов приводит к электрическому пробою *p–n*-перехода и ток стока начинает лавинообразно возрастать. Напряжение пробоя является одним из предельных параметров полевого транзистора.

Работа транзистора обычно происходит на пологих участках характеристик, т. е. в области, которую часто не совсем удачно называют *областью насыщения.* Напряжение, при котором начинается эта область, иногда называют *напряжением насыщения,* а запирающее напряжение затвора иначе еще называют *напряжением отсечки.*

Помимо высокого входного сопротивления полевые транзисторы имеют ряд преимуществ по сравнению с биполярными транзисторами. Так как в полевом транзисторе ток I_C образован перемещением основных носителей, концентрация которых определяется количеством примесей и практически не зависит от температуры, то полевые транзисторы являются более температуростабильными, т. е. меньше изменяют свои характеристики и параметры при изменении температуры. Они могут хорошо работать в более широком интервале температур. При повышении температуры наблюдается только повышение тока затвора, который является током неосновных носителей, но все же он остается достаточно малым, и поэтому входное сопротивление сохраняет высокие значения. Полевой транзистор создает меньшие шумы и обладает большей стойкостью к действию ионизирующего излучения. По радиационной стойкости эти транзисторы приближаются к электродным лампам. Недостатком канальных

транзисторов является недостаточно высокая крутизна характеристики. Схемы включения полевых транзисторов в каскад в принципе совпадают со схемами включения биполярных транзисторов.

➢ **Электровакуумные приборы**

Принцип действия электровакуумных приборов основан на эффекте *электронной эмиссии* – выхода электронов из твердых или жидких тел в вакуум или газ. В обычном состоянии на поверхности проводника образуется потенциальный барьер, напряжение которого выше, чем энергия свободных электронов. Этот барьер, именуемый иногда *электронной пленкой,* препятствует выходу электронов. Для того чтобы электроны его преодолели, им необходимо сообщить дополнительную энергию. Энергия, необходимая для того чтобы преодолеть барьер, именуется *работой выхода.* Поверхность, с которой в ходе эмиссии выходят электроны, называется *эмиттирующей.* В зависимости от способа, которым электронам сообщается дополнительная энергия, эмиссия подразделяется:

– на *термоэлектронную* – за счет тепловой энергии; особенно широко распространенна в электронных приборах;

– *электростатическую* (другие названия – *автоэлектронная, холодная*) – за счет внешнего электрического поля, снижающего потенциальный барьер и ускоряющего электроны;

– *вторичную* – за счет приобретения энергии падающих на эмиттирующую поверхность электронов (именуемых в таком случае *первичными*);

– *эмиссию под ударами тяжелых частиц*; имеет определенное сходство с предыдущим способом, только источником дополнительной энергии являются более тяжелые частицы, чаще всего ионы. Ионная эмиссия является основным видом в ионных приборах с тлеющим разрядом (стабилитроны, неоновые лампы и так далее).

Электровакуумными приборами называют приборы, в которых рабочее пространство, изолированное газонепроницаемой оболочкой, имеет высокую степень разрежения или заполнено специальной средой (парами или газами), действие которых основано на использовании электрических явлений в вакууме или газе. Под вакуумом понимается такая степень разрежения, при которой электроны практически не сталкиваются с оставшимися после откачки газа молекулами. Электровакуумные приборы делятся на *электронные*, в которых проходит чисто электронный ток в вакууме, и *ионные (газоразрядные) приборы*, для которых характерен электрический разряд в газе или парах.

Особую группу электронных электровакуумных приборов составляют *электронные лампы* – приборы, предназначенные для различных преобразований электрических величин. По назначению они могут быть усилительными, выпрямительными, генераторными, частотопреобразовательными и так далее. В зависимости от числа электродов лампы разделяются на *диоды* (двухэлектродные), *триоды* (трехэлектродные) и многоэлектродные – *тетроды, пентоды, гексоды, гептоды, октоды и энноды* (соответственно четырех-, девятиэлектродные). По принципу работы лампы могут

подразделяться на различные типы, например, *магнетроны, клистроны, лампы бегущей волны*.

Большую группу составляют *электронно-лучевые приборы*, к которым относятся приемные и передающие телевизионные и осциллографические трубки.

В группу *фотоэлектронных приборов* входят электровакуумные фотоэлементы и фотоэлектронные умножители.

К *электроосветительным приборам* относятся лампы накаливания, газоразрядные и люминесцентные лампы.

Основными типами ионных приборов являются газотроны, тиратроны, стабилитроны, ртутные вентили и газовые разрядники.

Достаточно подробно рассмотреть все приведенное многообразие электровакуумных приборов в данном курсе лекций невозможно, поэтому остановим свой выбор на рассмотрении наиболее распространенных электродных ламп – диода и триода.

➢ Электровакуумный диод

Главным назначением двухэлектродной электронной лампы, называемой диодом, является выпрямление тока. Диод имеет два электрода в стеклянном, металлическом или керамическом баллоне с вакуумом. Одним электродом является *накаленный катод*, служащий для эмиссии электронов. Другой электрод – *анод* – служит для притяжения электронов, испускаемых катодом и создания потока свободных электронов. Катод и анод аналогичны эмиттеру и базе полупроводникового диода. Катоды разделяются на *непосредственного* или *прямого накала* и *катоды косвенного накала* (*подогревные*). Условные обозначения диодов приведены на рис. 24, там же приведена схема цепей диода.

Основной является *анодная цепь*, состоящая из источника напряжения E_A и пространства между анодом и катодом. Все электроды, вылетающие из катода, образуют *ток эмиссии*

$$I_e = Ne, \tag{15}$$

где N – число электронов, вылетающих за 1 с из катода, e – заряд электрона. Между анодом и катодом электроны образуют пространственный заряд, препятствующий движению электронов к аноду. Поэтому при отсутствии положительного или при отрицательном потенциале на аноде электрическая цепь катод – анод отсутствует, диод заперт. При незначительном положительном потенциале на аноде не все электроны могут преодолеть тормозящее воздействие пространственного заряда и анодный ток $I_a < I_e$. И только при достаточной величине потенциала на аноде $I_a = I_e$. Разность потенциалов между анодом и катодом называется *анодным напряжением*. Таким образом, ток в анодной цепи возможен только при положительном потенциале на аноде. В этом и заключается принцип выпрямления переменного тока. Величина анодного тока составляет от долей миллиампера (маломощные диоды для радио- и измерительной аппаратуры) до сотен миллиампер (*кенотроны* – мощные диоды для выпрямления тока в силовых цепях).

В отличие от полупроводникового у вакуумного диода при обратном напряжении обратный ток практически отсутствует.

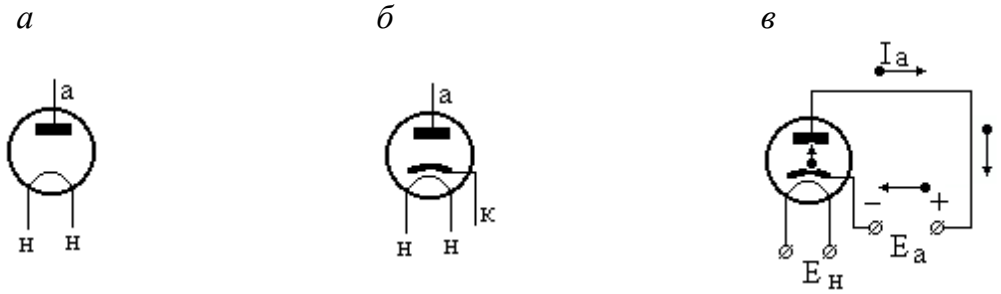


Рис. 24. Условные обозначения вакуумных диодов а) с катодом прямого накала б) с подогревным катодом в) цепи диода

➢ **Электровакуумный триод**

В отличие от диода триоды имеют третий электрод – *управляющую сетку*, расположенную между анодом и катодом. Она служит для электростатического управления анодным током. Если изменять потенциал сетки относительно катода, то будет изменяться электрическое поле и вследствие этого станет изменяться анодный ток. В этом заключается управляющее действие сетки. Так как потенциал сетки для электронов, эмиттирующих с катода, является ускоряющим (положительный) или тормозящим (отрицательный), то небольшое изменение сеточного потенциала приводит к значительному изменению анодного тока. В этом заключается усилительный эффект триода. Катод, сетка и анод вакуумного триода аналогичны эмиттеру, базе и коллектору транзистора. На рис. 25 показаны цепи триода. При положительном потенциале на сетке часть электронов оседает на ней, создавая сеточный ток I_c, аналогичный току базы транзистора. Сеточный ток бесполезен и даже вреден. По своей величине он гораздо меньше полезного анодного тока I_a, аналогичного эмиттерному току транзистора. В некоторых случаях, при отрицательном потенциале на сетке, ток полностью отсутствует, что выгодно отличает вакуумный триод от полупроводникового, где избавиться от тока базы невозможно. В проводе катода протекает катодный ток

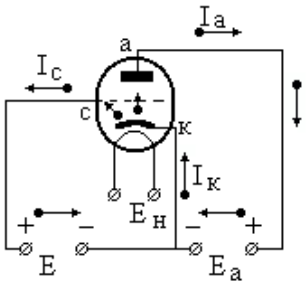


Рис. 25. Цепи триода

$$I_K = I_a + I_c. \qquad (16)$$

Катодный ток соответствует эмиттерному току транзистора. Подобно диодам, триоды обладают односторонней проводимостью и, следовательно, могут использоваться для выпрямления переменного тока. Но для этого использовать их нет смысла, так как диоды проще по конструкции и дешевле. Главное назначение триодов – усиление электрических колебаний.

Более сложные лампы с несколькими сетками применяются для тех же целей, что и триоды, но в них устранены некоторые недостатки последних.

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните принцип действия туннельного диода и дайте ему характеристику.

2. Объясните принцип действия динистора и дайте ему характеристику.

3. Объясните принцип действия тринистора и дайте ему характеристику.

4. Что такое симметричный тиристор?

5. Назовите область применения тиристоров.

6. Объясните принцип действия и устройство полевых транзисторов.

7. Назовите достоинства и недостатки полевых транзисторов по отношению к биполярным.

8. Какова физическая основа и основные виды электронной эмиссии?

9. Какие основные виды электровакуумных приборов?

10. Объясните принцип действия вакуумного диода.

11. Объясните принцип действия вакуумного триода.

Лекция 3
Функциональная классификация элементов систем управления и автоматики. государственная система приборов измерения и средств автоматики

Сигнал, т. е. модуляция несущей энергии, в цепях управления испытывает множественные преобразования. Изначальное управляющее воздействие поступает в систему управления извне. Источником управляющего воздействия может быть либо команда оператора либо изменение внешней среды или внутреннего состояния управляемой машины (механизма). В первом случае величина управляющего воздействия (нажатия на педаль или кнопку, поворота штурвала, переключения тумблера или рычага) ограничена из эргономических соображений в силу физиологических особенностей человека и не может быть значительной. Во втором случае необходимо помнить о том, что в технике получение информации – это процесс передачи энергии. Если при получении информации от контролируемого объекта (процесса) будет забрано большое количество энергии, тем самым этот объект (процесс) будет значительно искажен в процессе измерения. Следовательно, в обоих случаях управляющий сигнал на входе в систему принципиально не может обладать большой мощностью. На выходе же из системы управляющий сигнал должен обладать мощностью, соизмеримой с мощностью управляемого объекта (процесса). Поэтому у большинства систем управления сигнал при прохождении через систему должен быть увеличен по мощности в десятки и сотни раз. Помимо этого, в практике нередки случаи, когда выходной сигнал зависит не от входного напрямую, а от результатов некоторых операций с входным сигналом, т. е. сравнения его с эталонным значением, суммирования нескольких входных сигналов и так далее. В соответствии с тем, насколько разнообразны преобразования сигнала в системе, настолько разнообразны и функции отдельных элементов системы. Поэтому наиболее естественным классификационным признаком при классификации элементов систем управления является функция, которую выполняет в составе системы данный элемент, а классификация, построенная на базе этого признака, получила название **функциональной классификации элементов систем управления**. Согласно функциональной классификации элементы систем управления делятся на следующие группы: **датчики, усилители, логические элементы, преобразователи, исполнительные устройства, органы управления и приборы контроля.**

Датчики – приборы, предназначенные для получения информации о состоянии объекта или процесса, преобразования ее в модуляцию того вида энергии, который циркулирует в системе управления и передачи преобразованного сигнала в систему. Физическая природа информации на входе датчика может быть любой – перемещение объекта, его скорость, температура и так далее. На выходе – модуляция энергии (как правило – электрической) в системе. Вполне понятно, что между входным и выходным сигналом должно быть взаимно

однозначное соответствие, пропорциональность. Как уже отмечалось выше, отбор энергии от объекта в процессе измерения должен быть незначительным. Отсюда формируются следующие три **функциональных требования к датчикам**:

– преобразование энергии в вид, удобный для передачи;

– высокая точность и однозначность преобразования;

– как можно меньшее обратное воздействие на объект.

Датчики представляют весьма многочисленный класс элементов систем управления. Они подразделяются по трем основным показателям: виду входного сигнала, способу преобразования состояния выходной цепи и характеру преобразованного сигнала. *По виду входного сигнала* датчики весьма разнообразны. В подъемно-транспортных, строительно-дорожных и путевых машинах и технологическом оборудовании применяются датчики, измеряющие изменение состояния составных частей механической энергии объекта (положение, перемещение, скорость, ускорение, усилие, давление) и температуры. По способу преобразования состояния выходной цепи датчики подразделяются на параметрические и генераторные.

Параметрические датчики изменяют какой-либо параметр (например, активное сопротивление, индуктивность, емкость) выходной цепи, по которой протекает ток от внешнего источника, пропорционально состоянию измеряемого объекта (процесса).

Генераторные датчики сами вырабатывают электроэнергию, величина которой пропорциональна состоянию измеряемого объекта (процесса).

По характеру преобразованного сигнала датчики подразделяются на аналоговые (непрерывные) и дискретные (с релейной характеристикой).

Аналоговые датчики обладают непрерывной выходной характеристикой, т. е. выходной сигнал их пропорционален входному во всем диапазоне изменения входного сигнала. Графически зависимость выходного сигнала Y от входного X (характеристика датчика) выражается в виде непрерывной функции (рис. 26,*а*). Отсюда второе название этих датчиков – непрерывные. Важнейшим свойством характеристики является угол α ее наклона к оси X. Тангенс этого угла $tg\alpha = \dfrac{dY}{dX}$ есть мера чувствительности датчика – величина его реакции dY на единичное воздействие dX на входе. По виду характеристики $Y=F(X)$ все элементы систем управления и автоматики (в том числе и датчики) подразделяются на линейные и нелинейные.

Дискретные датчики обладают только двумя уровнями выходного сигнала (чаще всего «Выключено» и «Включено»). Переключение выходного сигнала с уровня на уровень происходит при достижении входным сигналом определенного значения – величины срабатывания. Графически зависимость выходной характеристики от входной представляет собой ступенчатую линию (рис. 26,*б*). Такая характеристика именуется **релейной** по названию наиболее распространенного элемента, обладающего подобной характеристикой – реле. Подробнее о релейной характеристике и ее свойствах будет рассказано в соответствующем разделе лекций.

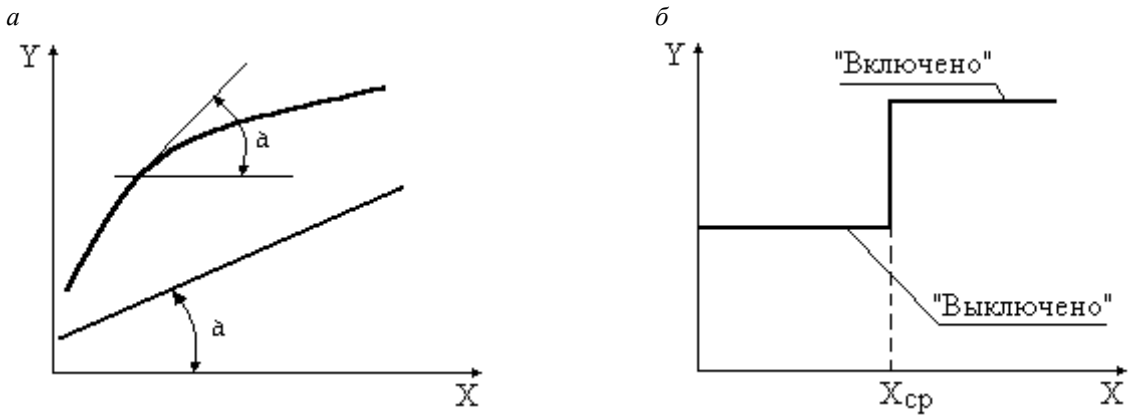


Рис. 26. Виды выходных характеристик датчиков: *а* – аналоговый датчик; *б* – дискретный датчик; X – входной сигнал; Y – выходной сигнал; $X_{ср}$ – величина срабатывания

Усилители предназначены для усиления входного сигнала. Дополнительные их функции – очистка сигнала от помех и необходимые преобразования. Входной и выходной сигналы усилителя обладают одной физической природой. В электрических цепях управления это – модуляция потока электроэнергии. Необходимые функциональные требования:

– высокий коэффициент усиления;

– минимальное обратное воздействие на входе;

– эффективное помехоподавление.

Второе из требований обусловливается принципиально малой мощностью датчика, который традиционно устанавливается на входе усилителя.

Усилители в электрических цепях подразделяются на два вида – усилители мощности и пропорциональные.

Пропорциональный усилитель изменяет пропорцию между составляющими мощности входного сигнала, например между силой тока и напряжением (трансформатор). Мощность сигнала при этом не увеличивается.

Усилитель мощности увеличивает мощность передаваемого сигнала за счет энергии внешнего источника питания. Принцип усиления мощности сигнала поясняется на рис. 27. Усилитель обладает двумя входами – питания и управления и выходом. От входа питания к выходу через усилитель проходит энергопоток от источника питания. На вход управления подается управляющий сигнал, который модулирует силовой энергопоток. При этом амплитуда модуляции **А** во много раз превышает амплитуду управляющего сигнала **а.**

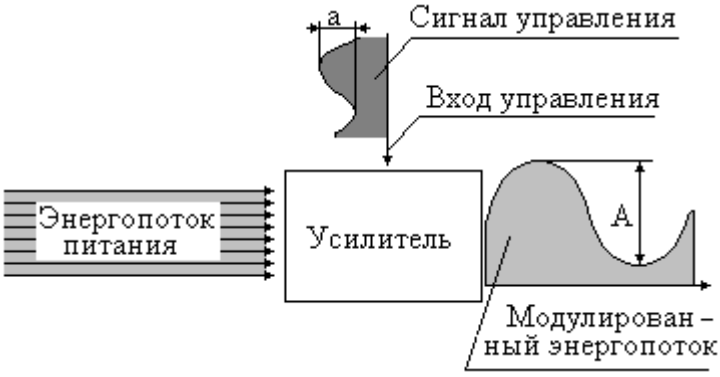


Рис. 27. Принцип усиления мощности

Электрические усилители мощности подразделяются на магнитные, электронные, электромашинные.

Логические элементы и преобразователи предназначены для логических операций с сигналами и преобразования их. Основными логическими операциями являются: повторение (логический элемент «ДА»), отрицание или инверсия (логический элемент «НЕТ»), сложение (логический элемент «ИЛИ ДА»), умножение (логический элемент «ИЛИ НЕТ»). Основным видом преобразователей вида сигнала являются аналогово-дискретные преобразователи. Принцип преобразования сигнала аналогичен таковому у датчиков дискретного типа (смотри выше). В отличие от датчиков, у аналогово-дискретных преобразователей входной и выходной сигналы обладают одной физической природой (электрической). Разновидностью аналого-дискретных преобразователей являются аналого-цифровые (шифраторы) и цифро-аналоговые (дешифраторы) преобразователи. Первые преобразуют аналоговый входной сигнал в серию кодированных импульсов в двоичной системе исчисления, число и последовательность которых соответствует по специальному коду уровня входного сигнала. Дешифраторы осуществляют обратное преобразование. Основой большинства логических элементов и преобразователей являются самые распространенные элементы электроавтоматики и управления – электромагнитные и электронные **реле**, которые составляют особую подгруппу в данной группе устройств. Кроме преобразования по виду сигнала некоторые источники к преобразованиям относят и изменение пропорции между током и напряжением аналогового сигнала, относя таким образом пропорциональные усилители к группе преобразователей. Мы в своих лекциях будем придерживаться более распространенной версии функциональной классификации, по которой пропорциональные усилители относятся к группе усилителей. Главным функциональным требованием к логическим элементам и преобразователям является высокая точность и однозначность необходимых преобразований.

Исполнительные устройства систем управления предназначены непосредственно для управления силовыми цепями электропривода, потоками воздуха и рабочей жидкости пневмо – и гидропривода, подвижными силовыми элементами механической трансмиссии.

Принято считать граничным элементом системы управления такой элемент, в котором реализуется поток энергии управления, циркулирующий в системе. Тогда исполнительными устройствами систем управления являются:

– для управления электроприводом – магнитные пускатели, контроллеры, тиристорные преобразователи для управления трехфазными асинхронными двигателями переменного тока с короткозамкнутыми и фазными роторами и потенциометрические преобразователи для управления двигателями постоянного тока, серводвигатели для управления дистанционными и автоматическими потенциометрами и конроллерами;

– управления пневмо- и гидроприводом – тяговые электромагниты, управляющие пневмо- и гидрораспределителями, сервовентилями, управляемыми клапанами;

– управления механической трансмиссией – тяговые электромагниты, электрогидравлические и электромеханические толкатели муфт сцепления и переключения, тормозов.

Главным функциональным требованием к исполнительным устройствам систем управления является их соответствие по входным характеристикам – системе управления и выходным – управляемой силовой передаче (приводу).

Органы управления и приборы контроля предназначены для связи системы управления с оператором; первые для преобразования моторных акций оператора во входные сигналы системы управления, вторые для преобразования информации о состоянии системы управления и управляемого объекта (процесса) в вид, доступный органам чувств оператора. К органам управления относятся различного рода рычаги, тумблера, штурвалы, педали, кнопки, клавиши и так далее. Приборы контроля подразделяются по роду воздействия на оператора – визуальные (зрение) и аудиоприборы (слух). По виду передаваемой информации подразделяются на приборы аналоговые (**шкальные** и **цифровые**) и дискретные (**индикаторы**). У шкальных приборов положение стрелки на шкале пропорционально уровню входного сигнала. Цифровой индикатор выдает значение уровня входного сигнала в виде цифровой информации. Индикатор выдает дискретную информацию. Наименьшим временем, необходимым оператору для оценки показаний, обладает шкальный прибор, вместе с тем точность оценки показаний у него ниже, чем у цифрового. Таким образом, шкальный прибор служит для постоянного приближенного контроля за состоянием параметра. Цифровой прибор служит для точной оценки состояния какого-либо параметра, при этом восприятие положения текущего уровня относительно пределов изменения или опасных порогов хуже, чем у приборов шкального типа. Индикатор выдает информацию о достижении контролируемым параметром определенного значения, чаще всего – предельного (например, высокой температуры жидкости в системе охлаждения двигателя внутреннего сгорания). Аудиоприборы обладают, как правило, дискретным характером, аналогичным визуальному индикатору. Применяются для разгрузки зрения оператора при перегруженности визуальной информацией и для дублирования особо важных сигналов индикаторов.

Функциональные требования к органам управления:

– соответствие эргономическим требованиям к естественным движениям оператора по расположению, траектории, величине перемещения, усилию;

– соответствие выходных параметров входным параметрам системы управления.

Функциональные требования к приборам контроля:

– соответствие эргономическим требованиям к психомоторным реакциям оператора;

– соответствие входных параметров выходным параметрам системы управления.

На базе функциональной классификации элементов управления создана более обширная классификация приборов автоматики, телемеханики,

телеметрии, измерения – единая **Государственная система приборов измерения и средств автоматики** (ГСП). Так же, как и в функциональной классификации, классификационным признаком в ГСП является функция, выполняемая элементом, но здесь деление элементов на группы более дробное. Вторым отличием классификации ГСП от функциональной классификации является более широкий спектр классифицируемых приборов.

Государственная система приборов измерения и средств автоматики создана для унификации по ряду параметров как существующих, так и вновь создаваемых приборов. В структуре ГСП реализованы следующие положения:

1) ГСП по виду модулируемой энергии (энергии управления) должна состоять из отдельных ветвей;

2) должна быть универсальной;

3) должна обеспечивать решение задач любой потребной сложности;

4) построена по блочно-модульному принципу;

5) состоит из нормальных рядов приборов, унифицированных по виду и параметрам входных и выходных сигналов, параметрам питания и габаритным размерам.

Перечисленные положения раскрываются ниже более подробно.

Первое положение

В настоящее время ГСП состоит из следующих ветвей приборов – электрической, гидравлической, пневматической, приборов прямого действия (механических). Структура ветвей однотипна (рис. 28).

Первая группа приборов предназначена для получения информации о состоянии контролируемого объекта или процесса. Состоит из двух классификационных рубрик – первичных и нормирующих преобразователей.

Первичные преобразователи служат для первичного преобразования физической природы сигнала. По аналогии с датчиками функциональной классификации они могут быть двух типов – генераторного и параметрического. На входе в первичный преобразователь сигнал может быть любой физической природы (перемещение, усилие, температура, давление и так далее), в зависимости от его вида. На выходе преобразователя должно быть пропорциональное входному сигналу изменение того вида энергии, ветви которой принадлежит преобразователь. Так, в электрической ветви приборов на выходе первичного преобразователя будет либо электроэнергия, выработанная преобразователем генераторного типа, либо изменение параметров электрической цепи преобразователя параметрического типа.

В **нормирующих** – изменения физической природы сигнала не происходит. Назначение нормирующего преобразователя – согласование выходного сигнала первичного преобразователя с входной характеристикой последующего элемента (чаще всего, усилителя). Другими словами, нормирующий преобразователь есть **схема подключения первичного преобразователя к последующему элементу системы управления.**

Вторая группа приборов служит для приема, преобразования и передачи информации по каналам связи. Большинство датчиков выдает на выходе аналоговый сигнал – пропорциональное входной информации изменение силы тока, напряжения, частоты. Но при передаче на большие расстояния по проводам за счет их внутреннего сопротивления аналоговый сигнал искажается. Во избежание этого аналоговый сигнал в шифраторах кодируется.

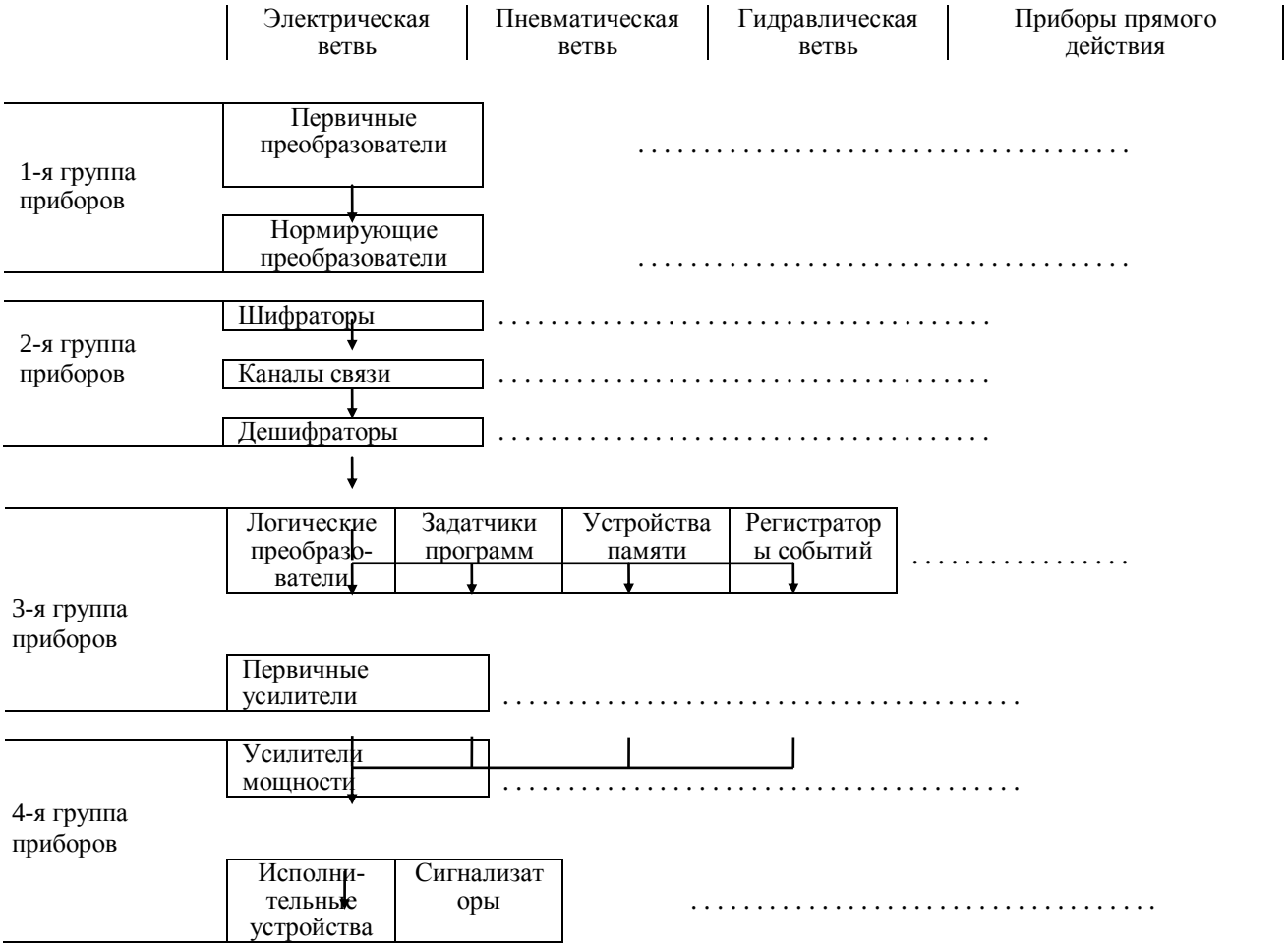


Рис. 28. Структура электрической ветви ГСП

Приборы второй группы характерны для телемеханики и телеметрии. Системы управления, изучаемые в специальности 170900 «Подъемно-транспортные дорожные, строительные машины и оборудование», не настолько развиты пространственно, чтобы возникла необходимость в кодировании сигнала при его передаче. Вместе с тем в качестве центрального управляющего устройства систем управления все большее распространение получают ЭВМ, работающие в цифровом режиме. Для связи периферийных устройств (например, датчиков) с ЭВМ необходимы **аналогово-цифровые преобразователи**, которые будут рассмотрены в соответствующем разделе лекций.

Третья группа приборов служит для преобразования, хранения, обработки информации и формирования команд управления. Состоит из логических преобразователей, задатчиков программ, устройств памяти, регистраторов.

К **логическим преобразователям** помимо рассмотренных выше повторителей (логический элемент «ДА»), инверсоров (логический элемент «НЕТ»), сумматоров (логический элемент «ИЛИ ДА»), умножителей (логический элемент «ИЛИ НЕТ») относятся блоки сравнения или блоки условного логического перехода. Более подробно последние будут рассматриваться в дисциплине «Управление техническими системами».

Второе и третье положения определяют универсальность и незавершенность структуры ГСП. Практика ставит перед системами управления все более сложные задачи. Для решения вновь возникающих задач имеющейся классификационной емкости ГСП может оказаться недостаточно. Следовательно, для осуществления третьего и четвертого положения (универсальности ГСП и пригодности ее для решения задач любой требуемой сложности) необходима потенциальная готовность ГСП к введению новых классификационных рубрик и наличие лишних, не заполненных рубрик – избыточность структуры.

Четвертое положение. Все приборы, входящие в ГСП, представляют собой функциональные блоки-модули. Они имеют унифицированные входные, выходные и внутренние характеристики. Существует целое семейство вспомогательных устройств, облегчающих монтаж схем из приборов ГСП – монтажные платы, универсальные разъемы и кабели и так далее. Проектирование и монтаж произвольной схемы любой сложности из приборов ГСП напоминает изготовление произвольной конструкции из унифицированных элементов детской игры «Конструктор».

Пятое положение. В ГСП существуют следующие нормализованные ряды унифицированных параметров: по габаритам, питанию, сигналам.

По габаритам и присоединительным размерам приборы ГСП делятся на размерные группы. Как правило, для каждого вида приборов размерная группа связана с определенным типоразмером по питанию и уровню сигнала.

По питанию электрические приборы подразделяются на группы по напряжению: постоянный ток – 0...+5 В; ±5 В; ±15 В; ±24 В; переменный ток частотой 50 Hz – 36 В; 110 В; 220 В; трехфазный переменный ток – 380 В.

Нормализованный ряд давления питания в гидросистемах – 6,3 МПа, 10 МПа, 12,5 МПа, 16 МПа, 25 МПа, 32 МПа.

Нормализованный ряд давления питания в пневмосистемах – 0,1 МПа ..... 0,5 МПа.

По типу сигнала приборы электрической ветви подразделяются на приборы с модуляцией тока, амплитуды, частоты.

По уровню сигнала (амплитуде модуляции несущей энергии) приборы с модуляцией тока подразделяются на 4 группы с амплитудой от 5 μА (первая группа) до 20 μА (четвертая группа); приборы с модуляцией напряжения – на 8

групп с амплитудой от 0....+10 мВ (первая группа) до -10 В...+10 В (восьмая группа).

Амплитуда давления сигналов приборов пневматической ветви унифицирована в пределах 0,02.....0,1 МПа.

➢ Общность и различия классификаций элементов систем управления

При сравнении между собой функциональной классификации элементов систем управления и классификации ГСП можно отметить как общие черты для обеих классификаций, так и отличия. Объединяет их, в первую очередь то, что разделение элементов на рубрики в обоих случаях производится по одному и тому же признаку – по функции, выполняемой элементом в системе управления. Вторым объединяющим признаком является сам объект классификации – элементы систем управления. ГСП отличается от функциональной классификации большей дробностью структуры. Так, единому разделу функциональной классификации «Датчики» соответствуют два раздела ГСП «Первичные преобразователи» и «Нормирующие преобразователи»; структура третьей группы приборов ГСП (для преобразования, хранения, обработки информации и формирования команд управления) гораздо более дробна, чем у соответствующего раздела функциональной классификации. ГСП в отличие от функциональной классификации является двухмерной классификацией: в ней приборы разделяются не только по выполняемой функции, но и по роду энергии. За счет того, что в ГСП включены не только приборы управления, но и измерения, телемеханики и телеметрии, объем классифицированных элементов в ней больше. У второй группы приборов ГСП (для приема, преобразования и передачи информации по каналам связи) нет аналогов в функциональной классификации. С другой стороны, весьма значительная часть приборов управления не отвечает требованиям ГСП: унификации по размерам, питанию, сигналам. И поэтому не может быть включена в ее состав. Таким образом, при большем числе рубрик ГСП, количественный объем каждой рубрики меньше. Существуют и более мелкие, частные различия. Так, усилители мощности в ГСП отделены от первичных усилителей, но вместе с тем объединены в одну группу с исполнительными устройствами и сигнализаторами; органы управления как отдельный раздел приборов управления в ГСП совсем не предусмотрены. Различия между ГСП и функциональной классификацией еще раз иллюстрируют, что любой анализ, в том числе и классификация, весьма условен, субъективен и во многом зависит от личности аналитика (классификатора).

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте, для чего нужна система управления электроприводом?
2. Определите, что из себя представляют:

– аналоговый параметрический датчик перемещения;

– дискретный параметрический датчик усилия;

– аналоговый генераторный датчик скорости.

3. Почему необходимо усиление сигнала в системе управления?

4. Откуда берется приращение мощности в усилителе?

5. Какие приборы на панели управления автомобилем (спидометр, тахометр, контроль зарядного тока, температура охлаждающей жидкости, давление масла, индикаторы указателей поворота) являются шкальными, какие – индикаторами и почему?

6. Чем отличается функциональная классификация от классификации ГСП?

7. Раскройте структуру ветви ГСП.

8. Чем обосновывается универсальность ГСП?

9. К чему приводит наличие лишних ячеек структуры ГСП?

10. Что объединяет функциональную классификацию и классификацию ГСП?

Лекция 4
Датчики положения и перемещения

Датчики являются механическими аналогами рецепторов органов чувств. Они поставляют в систему управления информацию о внешней по отношению к управляемому устройству ситуации. Существуют и датчики, сигнализирующие о внутреннем состоянии объекта, например, давление масла в системе смазки двигателя внутреннего сгорания, положение подвижных звеньев манипулятора промышленного робота и так далее. Как многообразна физическая природа процессов, за которыми следят датчики, так многообразна и природа первичного сигнала на входе в датчик. Рассмотреть все многообразие датчиков в ограниченном объеме данного курса лекций невозможно, да и не нужно. Мы ограничимся датчиками, характерными для систем управления подъемно-транспортных, строительных, дорожных, путевых машин и технологического оборудования машиностроения, строительной индустрии и путевого хозяйства. Таковыми являются: дискретные датчики положения (конечные выключатели), датчики перемещения, скорости, усилия, ускорения, давления, температуры. С этими датчиками и ознакомимся в данной лекции.

➢ Дискретные датчики положения (конечные выключатели)

Данные датчики регистрируют наличие или отсутствие наблюдаемого объекта в определенной точке (дискрете) пространства. Эта точка именуется точкой настройки или точкой срабатывания датчика. Сигнал на входе датчика может принимать только два значения – «объекта в точке настройки нет» и «объект в точке настройки есть». Выходом датчика является участок электрической цепи. В зависимости от входного сигнала ситуация в выходной цепи может быть двух видов – «выходная цепь разомкнута» и «выходная цепь замкнута». Как правило, эти датчики регистрируют переход объектом границы опасной зоны или окончание рабочего хода объекта. Отсюда второе распространенное название дискретных датчиков положения – конечные выключатели. Непосредственно с датчиком контактируют управляющие элементы, крепящиеся к наблюдаемому объекту. Если объект в точке настройки прекращает движение (работает «в упор»), то управляющий элемент именуется упором. Если объект после контакта с датчиком может продолжить перемещение (работает «на проход»), то управляющий элемент называется линейкой. С целью более точной установки точки настройки, упоры и линейки делаются регулируемыми. Дискретные датчики положения являются очень распространенными элементами систем управления и в силу этого обладают большим разнообразием типов. Классификация дискретных датчиков положения приведена на рис. 29.

Дискретные датчики положения					
Контактные (механические)		Герконовые		Бесконтактные	
Прямого действия	Мгновен-ного дейст-	Магнито-замкнутые	Магнито-замыкае-	Электронные	Индуктивн ые

	вия		мые		
				торцевые	щелевые

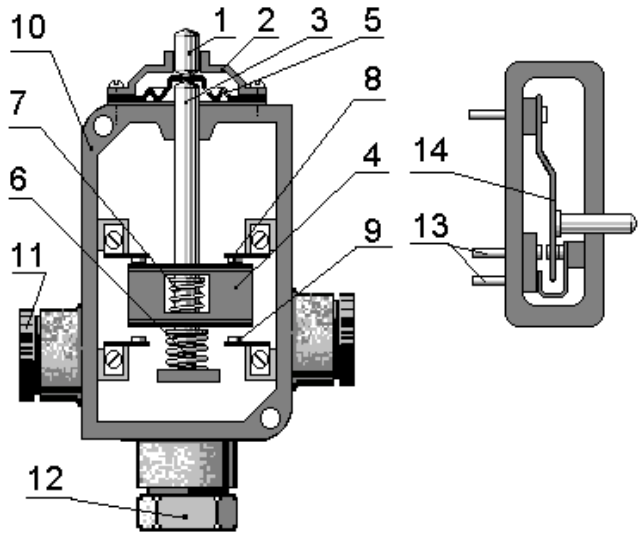
Рис. 29. Классификация дискретных датчиков положения

Контактные конечные выключатели прямого действия. У этих датчиков перемещение управляющего элемента механически жестко, напрямую, связанно с перемещением подвижного элемента выходной контактной группы (отсюда и название). Типичным представителем датчиков данного типа является конечный выключатель серии ВПК 21□□. Последние две позиции в маркировке обозначают исполнение рабочей головки выключателя и типоразмер контактной группы.

Конструкция выключателя приведена на рис. 30,*а*. Плунжер *1* сменной рабочей головки *2* связан с ползуном *3* контактного мостика *4* через герметичную мембрану *5*. Ползун снабжен возвратной пружиной *6*. Во избежание поломки контактов при большом ходе плунжера контактный мостик снабжен компенсаторной пружиной *7*. Контактный мостик может в зависимости от положения плунжера замыкать цепь или между нормально замкнутыми *8*, или между нормально разомкнутыми *9* контактами. Все элементы, за исключением рабочей головки, размещаются в герметичном корпусе из силуминового сплава *10*. Корпус снабжен тремя резьбовыми гнездами. При монтаже ненужные гнезда закрываются заглушками *11*, а в остальные вворачиваются герметичные сальниковые вводы проводов *12*. Так как электрическая часть выключателя полностью герметична, выключателю присвоена категория размещения У3 (под открытом небом, в умеренном климате).

а *б*

Рис. 30. Дискретные контактные датчики положения: *а* – конечный выключатель ВПК 211; *б* – микропереключатель типа МП; *1* – плунжер; *2* – рабочая головка; *3* – ползун; *4* – контактный мостик; *5* – мембрана; *6* – возвратная пружина; *7* – компенсаторная пружина; *8* – нормально замкнутые контакты; *9* – нормально разомкнутые контакты; *10* – корпус; *11* – заглушка; *12* – сальниковый ввод; *13* – выходные клеммы; *14* – контактный мостик



В нормальном состоянии выключателя контактный мостик замыкает контакты *8*. При нажатии управляющим упором на плунжер сначала размыкаются контакты *8*, а при продолжении хода плунжера – замыкаются контакты *9*. Свободный ход поглощается пружиной *7*.

Конечные выключатели серии ВПК соответствуют требованиям ГСП по унификации и поэтому являются объектами этой классификации. В целях повышения универсальности они выпускаются со сменными рабочими головками (рис. 31). Селективная (т. е. различающая направление движения управляющего элемента) головка (рис. 31, *в*) представляет собой двухзвеньевой ломающийся рычаг с роликом на конце. При прохождении управляющей линейки в рабочем направлении (на рисунке – слева направо), рычаг работает как одно целое, отклоняясь и нажимая на плунжер. При обратном проходе рычаг складывается, при этом первое звено не перемещается и срабатывания датчика не происходит. Конечные выключатели серии ВПК являются автономными герметичными приборами. В случае, если дискретный датчик положения является частью привода, металлоконструкции или датчика более сложного уровня, в его качестве используется микропереключатель.

Конструкция типового микропереключателя приведена на рис. 30,*б*. Как правило, микропереключатели обладают открытыми выходными клеммами *13* под пайку или болтовое присоединение проводов.

Датчики типа ВПК:

а *б* *в*

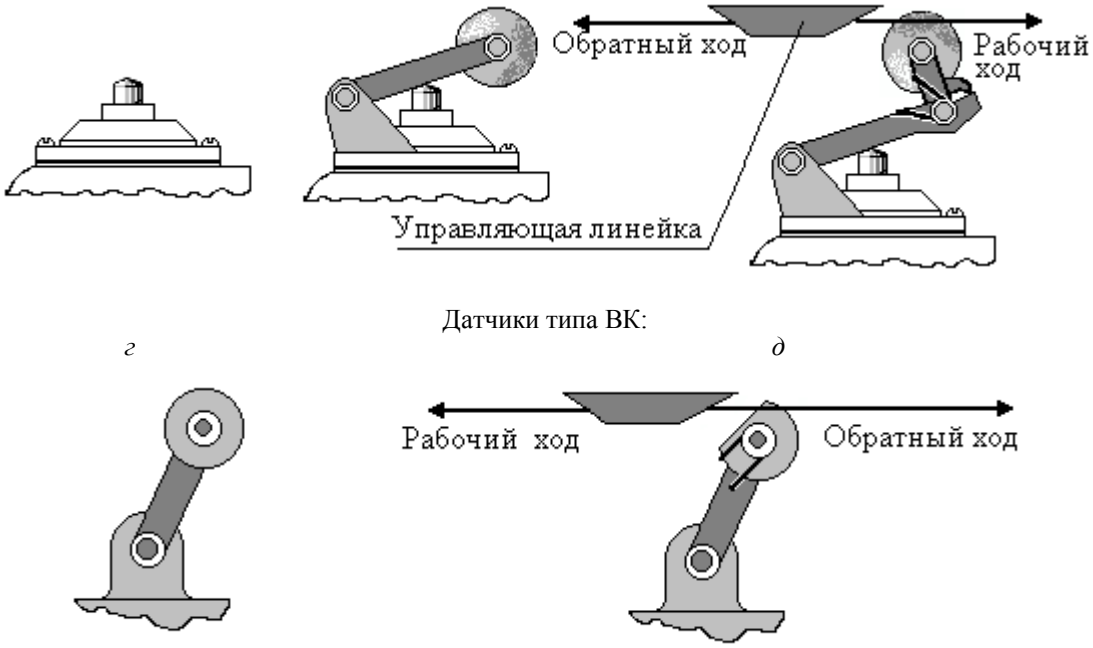
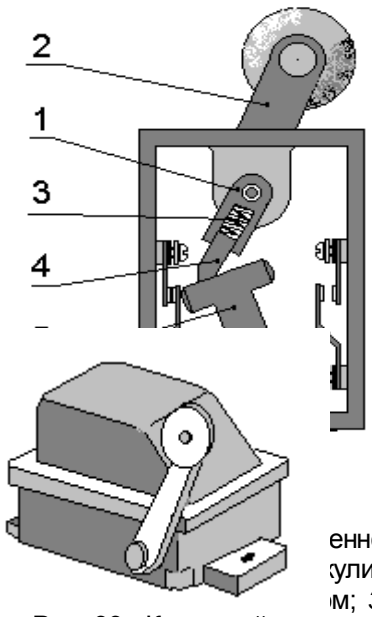


Рис. 31. Рабочие головки и рычаги дискретных контактных датчиков положения: *а* – плунжерная; *б* – неселективная роликовая; *в* – селективная роликовая; *г* – неселективный; *д* – селективный

Электромеханическая часть микропереключателя не герметична. Возвратной пружиной зачастую является выполненный в виде рессоры из пермаллоя (железно-никелевый сплав, обладающий хорошими механическими, магнитными и электрическими свойствами) контактный мостик *14*. Компенсаторные пружины, как правило, отсутствуют – в силу этого микропереключатели особенно чувствительны к точности установки управляющих элементов.

Общим достоинством контактных дискретных датчиков положения прямого действия является относительная простота конструкции. Конечные выключатели серии ВПК абсолютно автономны, обладают большим числом сменных рабочих головок и в силу этого универсальны. Микропереключатели проще, меньше по размерам, легче, но менее универсальны и негерметичны (могут располагаться только внутри герметичных привода, механизма, так далее). Недостатком дискретных датчиков вия является зависимость срока службы датчика от правляющего элемента. Так, для ВПК21 □□ при правляющего элемента более 0,5 м/с паспортная ляет с 95-процентной вероятностью 20×10^6 циклов ей скорости наработка на отказ уменьшается до 10^6 при малых зазорах между контактами возникает здушного слоя – искрение. При медленном расхо- ие происходит относительно длительное время, что тактов.

ные датчики положения мгновенного действия. В датчиков данного типа механическая и контактная ямую, а посредством специального механизма



енного
кулиса;
м; *3* –
5 –

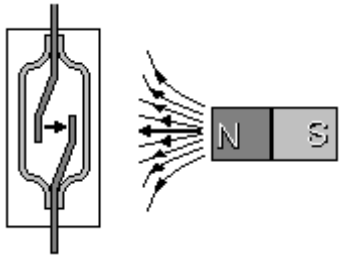
Рис. 33. Конечный выключатель КУ-70□

мгновенного действия. При этом замыкание-размыкание контактов происходит не со скоростью управляющего элемента, а с постоянной, достаточно высокой скоростью, задаваемой этим механизмом. Существует несколько типов таких механизмов. Один из них изображен на рис. 32. Кулиса *1* закреплена на одном валу с роликовым рычагом *2*, непосредственно контактирующим с управляющим элементом. Внутри кулисы установлен подпружиненный пружиной *3* ползун *4*. Ползун упирается в Т-образный контактный мостик *5*. При повороте кулисы острие ползуна скользит по верхней перекладине мостика. При прохождении острием мертвой точки, мостик выходит из состояния устойчивого равновесия и со скоростью, задаваемой пружиной, перебрасывается в другое положение. Промышленностью выпускаются датчики положения мгновенного действия следующих типов: ВК-200; ВК-300; ВПК-11□□ – универсальные, общего назначения; КУ70□ – специализированные крановые (пустые позиции – номер типоисполнения). Внешний вид конечного выключателя КУ701 приведен на рис. 33. Роликовые рычаги, характерные для датчиков мгновенного действия типов ВК и КУ, приведены на рис. 31, *г, д*. Селективный роликовый рычаг обладает скошенным роликом, подпружиненным пружиной кручения. При заходе управляющего элемента на ролик со стороны скоса (на рис. 31,*д* – слева) ролик поворачивается, пропуская упор без перемещения рычага. При заходе справа рычаг отклоняется, и датчик срабатывает. Срок службы этих датчиков не зависит от скорости перемещения управляющего элемента и составляет порядка 20×10^6 циклов срабатывания. Недостатком является относительная сложность механической части.

Герконовые датчики положения. Искрение контактов возможно только в воздушной среде, содержащей кислород. В среде инертных газов (например, аргон, гелий) и в вакууме электрический разряд не происходит. При этом значительно уменьшаются размеры контактов, а срок службы становится практически неограниченным (по паспорту – до 10^9 циклов срабатывания). Это удалось реализовать в герметичных контактных группах – герконах. Герконы являются составной частью герконовых датчиков положения и реле.

Герконовые датчики положения могут быть магнитозамыкающие (рис. 34,*а*) и магнитозамкнутые (рис. 34,*б*). Геркон представляет собой миниатюрную стеклянную ампулу, заполненную инертным газом, чаще всего аргоном. Ранее выпускались герконы с вакуумными ампулами. В нее впаяны упругие нормально разомкнутые контакты из пермаллоя. Управляющим элементом магнитозамыкающего герконового датчика является постоянный магнит. При отсутствии магнита контакты за счет собственной упругости разомкнуты.

а *б*



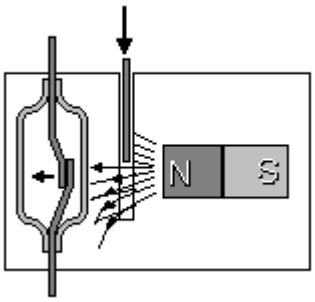


Рис. 34. Герконовые датчики положения: *а* – магнитозамыкающие; *б* – магнитозамкнутые

При приближении магнита контакты, притягиваясь к нему, замыкаются.

У магнитозамкнутого герконового датчика магнит смонтирован в одном корпусе с герконом, постоянно замыкая его контакты.

Управляющим элементом является экран, вводимый в зазор между магнитом и герконом. Магнитная связь при этом нарушается и контакты размыкаются. Герконовые датчики положения обладают многими достоинствами. Они надежны (долговечность их ограничивается только усталостной изгибной выносливостью контактов), миниатюрны, удобны в монтаже. Вместе с тем вибрация и удары могут привести к ложному срабатыванию. Последнее резко ограничивает сферу их применения. Так, отечественные промышленные роботы первоначально комплектовались преимущественно датчиками такого типа. Но удары в конце хода плохо сдемпфированных приводов приводили к частым ложным срабатываниям, что заставило отказаться от их применения. Известное распространение герконовые датчики положения получили в автоматизированном металлорежущем оборудовании, охранной сигнализации, клавиатуре ЭВМ.

Электронные бесконтактные датчики положения. В отличие от предыдущих, бесконтактные датчики положения не имеют электрических контактов в выходной цепи (отсюда и название). Принципиальная схема изображена на рис. 35. Принцип действия полупроводникового транзистора был нами рассмотрен ранее, в соответствующей лекции. Для пояснения принципа действия бесконтактного датчика нам необходимо вспомнить условие открытости эмиттерно-коллекторной цепи транзистора с n–p–n-переходом. Эмиттерно-коллекторная цепь открыта (т. е. с эмиттера на коллектор протекает ток, в десятки и сотни раз больший, чем с эмиттера на базу) если на эмиттере положительный потенциал, на базе – тоже положительный, но меньший, на коллекторе – отрицательный.

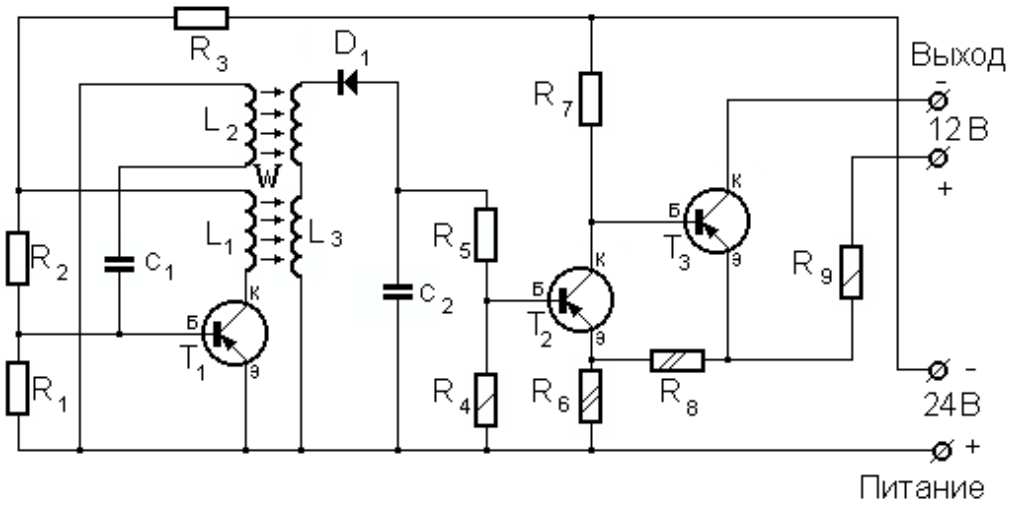


Рис. 35. Принципиальная схема бесконтактного датчика положения

Первая рабочая ситуация – на входе датчика отсутствует сигнал. Рассмотрение работы датчика начнем с транзистора T_1. Как видно по схеме, и база, и эмиттер подключены к положительной клемме питания, причем база – через сопротивление R_1 (так называемое сопротивление базы). Это сопротивление служит для создания разницы потенциалов между эмиттером и базой, которая, кроме этого, связана с отрицательной клеммой питания через цепь R_2 R_3. Коллектор связан с отрицательной клеммой питания через цепь L_1–R_3. Как видим, условие открытости соблюдено. Коллектор связан с базой цепью обратной связи L_1–R_2. Эта схема представляет собой простейший **мультивибратор –** генератор колебаний. Работает он следующим образом. В начальный момент времени транзистор открыт, и по коллектору протекает ток. На прохождение электрическим током цепи L_1–R_2 требуется некоторое время. Через это время за счет поступления с коллектора по цепи обратной связи положительного потенциала потенциал на базе возрастает, и транзистор запирается. Ток в цепи обратной связи прекращается, потенциал на базе уменьшается до первоначального значения, и цикл повторяется. Таким образом в цепи L_1–R_2 генерируется переменный ток. Параллельно эмиттерной цепи подключен колебательный контур C_1–L_2. В данном случае он является резонатором – настроен в резонанс с колебаниями, генерируемыми мультивибратором. Катушки L_1 и L_2 являются индуктором переменного магнитного поля W. Магнитное поле воспринимается приемником – индуктивностью L_3, преобразуясь в нем в переменную эдс. Далее ток поступает в контур из диода D_1 и конденсатора C_2. Они представляют собой простейший сглаживающий выпрямитель. После диода переменный ток преобразуется в отнулевой пульсирующий. В момент пика тока излишний ток заряжает конденсатор, а в момент токового провала конденсатор разряжается, сглаживая пульсацию. Выпрямленный таким образом положительный потенциал подается на базу транзистора T_2. База транзистора связанна с положительной шиной питания через сопротивление R_4, а эмиттер – через R_6, причем $R_4 < R_6$. При отсутствии на базе дополнительного отрицательного потенциала от

выпрямителя транзистор закрыт, а в данном случае – открыт. Коллектор транзистора T_2 связан с базой транзистора T_3. При открытости T_2 на базу T_3 подается положительный потенциал, T_3 также открыт, и сопротивление эмиттер-коллекторной цепи последнего незначительно. Эмиттер и коллектор транзистора T_3 связаны с выходными клеммами датчика. В нормальном состоянии выходная цепь датчика оказывается замкнутой.

Вторая рабочая ситуация – на входе датчика появляется сигнал. Управляющим элементом датчика является экран, вводимый в зазор между индуктором и приемником. При этом магнитная связь между ними нарушается, и с базы транзистора T_2 исчезает дополнительный потенциал смещения. Транзистор закрывается, положительный потенциал на базу T_3 не подается, последний закрывается. Сопротивление эмиттер-коллекторной цепи возрастает настолько, что между выходными клеммами датчика электрическая цепь практически разрывается. Датчик сработал.

Торцевой типа БТП (рис. 36,*а*) и щелевой типа КВЛ (рис. 36,*б*) датчики отличаются компоновкой. Торцевой датчик размещен в резьбовом цилиндрическом корпусе. В торце его концентрически расположены индукторы и приемник. Магнитное поле между ними имеет тороидные силовые линии. Управляющий экран приближается к этому торцу. Корпус щелевого датчика имеет вырез между индуктором и приемником. Управляющий экран вводится в этот вырез. Элементы электрических схем для герметичности заливаются компаундом.

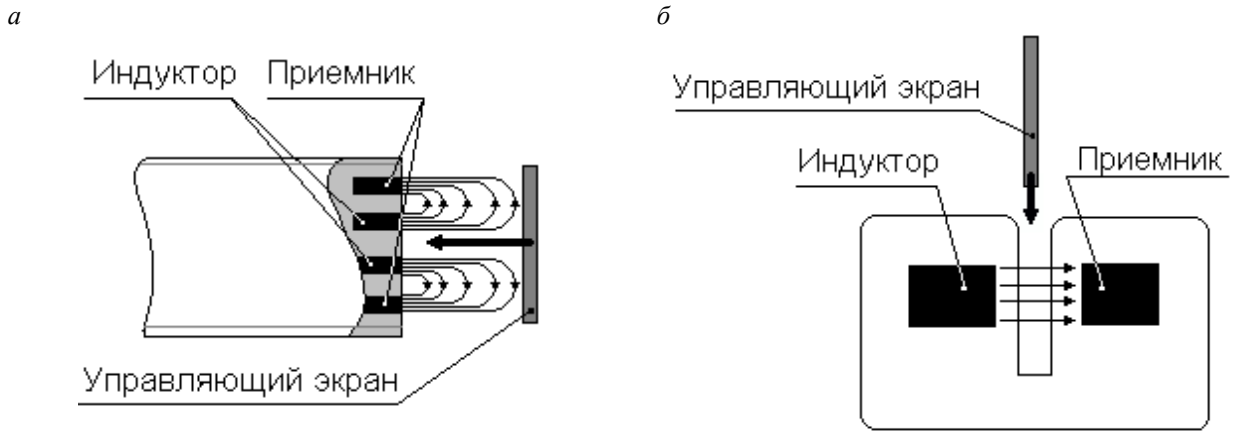


Рис. 36. Электронные бесконтактные датчики: *а* – торцевой; *б* – щелевой

Бесконтактные датчики обладают практически неограниченным сроком службы, высокой надежностью, довольно малогабаритны, не требуют эксплуатационного обслуживания и просты в монтаже. К их недостаткам можно отнести сравнительно высокую стоимость и высокие требования к качеству стабилизации напряжения питания (по паспортным данным – постоянный ток напряжением 24±0,2 В).

Индукционные бесконтактные датчики положения. Индукционные датчики стоят несколько особняком в ряду остальных датчиков положения. В отличие от контактных и герконовых датчиков, выходная цепь которых имеет состояния «Цепь разомкнута» и «Цепь замкнута» или бесконтактных электронных «Цепь практически разомкнута» и «Цепь замкнута», индукционные датчики обладают состояниями выходной цепи «Цепь обладает большим сопротивлением» и «Цепь обладает малым сопротивлением». Рассмотрим принцип действия данных датчиков на примере бесконтактного конечного выключателя (БКВ) (рис. 37). Датчик имеет две катушки индуктивности L_1 и L_2, установленные на общем магнитопроводе. Поворотный якорь является рабочим элементом выключателя, контактирующим с управляющим элементом (на рисунке не показан). Между плечами якоря и магнитопроводом имеются зазоры δ_1 и δ_2. При переключении выключателя зазоры изменяются. Известно, что полное сопротивление индукционной катушки в цепи переменного тока

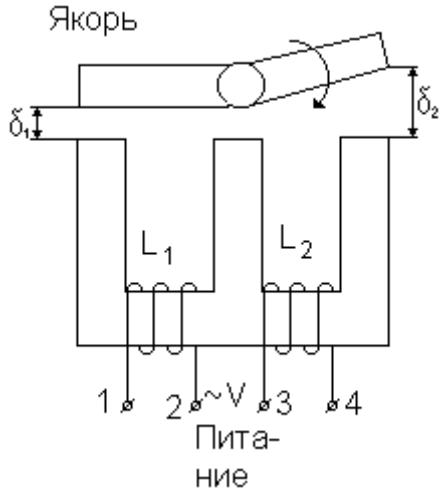


Рис. 37. Индуктивный датчик положения БКВ

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}\,, \qquad (17)$$

где R – активное сопротивление катушки, $(L\omega)$ – индуктивное сопротивление, $\omega = 2\pi f$ – угловая частота переменного тока с частотой f; L – индуктивность катушки

$$L = \frac{0{,}2\pi W^2 S 10^{-8}}{\delta}\,, \qquad (18)$$

где W – число витков катушки, S – площадь сечения потока в воздушном зазоре; δ – величина воздушного зазора. Следовательно, приняв за константы R, ω, W, S, можно записать

$$Z=F(\delta). \qquad (19)$$

Параметры датчика БКВ приняты таковыми, что сопротивление выходных цепей 1–2 и 3–4 во включенном и выключенном положении отличаются на несколько порядков (в тысячи раз).

Таким образом, одна из выходных цепей оказывается практически разомкнутой (ток по ней течет, но очень малый), а вторая – замкнутой и при переключении датчика положение цепей меняется.

К достоинствам датчика стоит отнести его высокую надежность. К недостаткам – ограничение по применимости (только в цепях переменного тока), высокие требования к стабильности частоты питающего напряжения.

➢ **Датчики перемещения**

В отличие от предыдущих датчики перемещения контролируют объект не в точке пространства, а на определенном участке его траектории. Этот участок именуется диапазоном измерения датчика. В зависимости от того, какого рода движение контролирует датчик, они подразделяются на линейные и поворотные. Все датчики перемещения являются параметрическими. Пропорционально изменению положения контролируемого объекта внутри диапазона измерения у них изменяется один из параметров выходной электрической цепи. В зависимости от вида изменяемого выходного параметра они подразделяются на датчики активного, индуктивного и емкостного сопротивления.

Датчики активного сопротивления подразделяются на датчики, контролирующие линейное перемещение объекта и поворотные. По материалу датчики подразделяются на металлические (проволочные) и угольные. Проволочные линейные датчики получили название реостаты. В электротехнике угольные поворотные датчики получили распространение в несвойственной им области – для изменения напряжения на объектах, последовательно или параллельно подключенных им. Отсюда второе название всей группы датчиков активного сопротивления – **потенциометрические**, т.е. изменяющие напряжение.

Линейные проволочные датчики активного сопротивления (реостаты). Конструкция реостата приведена на рис. 38,*а*. Основой его является катушка из лакированной проволоки, намотанной на диэлектрический сердечник. По катушке скользит подвижный контакт. На беговой дорожке контакта изоляционный лак удален. У этого и всех остальных типов датчиков активного сопротивления подвижный контакт именуется **ламелью.**

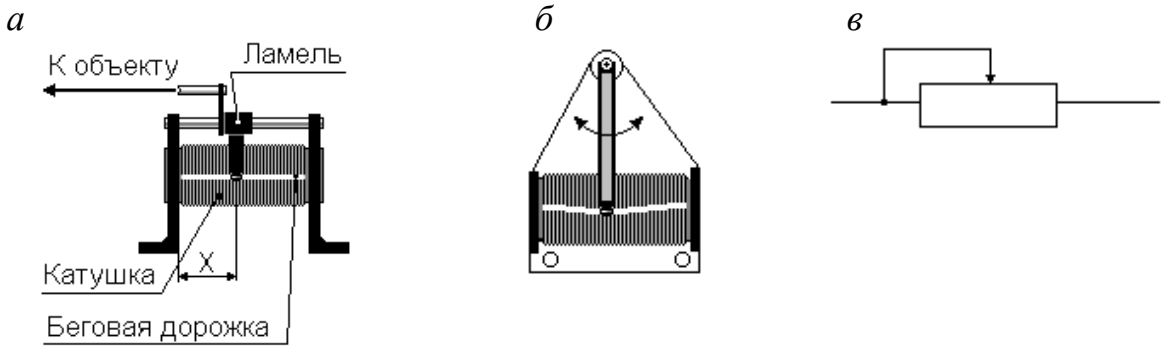


Рис. 38. Проволочные датчики активного сопротивления: *а* – проволочный линейный; *б* – проволочный поворотный; *в* – обозначения датчика на схемах

Поворотные проволочные датчики активного сопротивления. В отличие от предыдущих у этих датчиков ламель представляет собой поворотный рычаг достаточно большой длины (рис. 38,*б*). Беговая дорожка – дуга большого радиуса, приближенная к прямой. Конструктивно механическая часть этого датчика более проста. Вместе с тем зависимость сопротивления от угла поворота есть величина нелинейная, подчиненная синусоидальному закону, что необходимо учитывать при проектировании привода датчика. Пример

применения – регистрирующая часть датчиков усилия и угла поворота стрелы ограничителя грузоподъемности ОГП-1 стреловых кранов.

Линейные и поворотные угольные датчики активного сопротивления. Неподвижным контактом у этих датчиков является не проволочная спираль, а угольная пластина клиновой формы. За счет изменения сечения неподвижного контакта при перемещении ламеля сопротивление датчика изменяется по более крутой, чем у проволочных датчиков, в зависимости от перемещения, т. е. они обладают большей чувствительностью. Эти датчики применяются в путевых машинах, например, как точные потенциометры положений нивелировочного троса рихтовочных систем машин ВПР02, ВПРС500

Общим достоинством для всех датчиков активного сопротивления является их универсальность – с равным успехом они применяются в цепях как постоянного, так и переменного тока. Недостатком их является трение между ламелью и беговой дорожкой, следовательно, износ контактов и искрение.

Индуктивные датчики перемещения. К ним относятся линейные датчики, поворотные трансформаторы и сельсины.

Линейные индуктивные датчики перемещения. Для точного измерения малых расстояний (например, в автоматизированных металлорежущих станках) служат датчики с переменным зазором. Одинарный датчик приведен на рис. 39,*а*. Выходной величиной является ток в индуктивной катушке

$$I = \frac{U}{Z}, \tag{20}$$

где U – напряжение питания.

Входной величиной является зазор δ между подвижным якорем и магнитопроводом. Характеристика датчика, т. е. зависимость $I = F(\delta)$, формулы (17)–(20), имеет нелинейный характер. В цепях управления более предпочтительны устройства с линейной зависимостью выходной величины.

Для увеличения рабочего диапазона применяется дифференциальный индуктивный датчик (рис. 39,*б*). Он состоит из двух симметрично расположенных катушек индуктивности и общего якоря. Рабочий диапазон представляет собой две симметрично расположенные прямые линии, проходящие через начало координат.

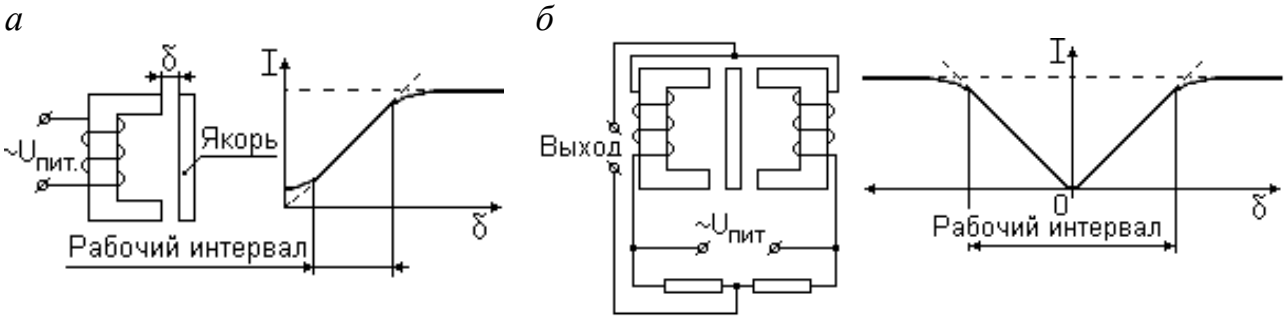


Рис. 39. Линейные индуктивные датчики перемещения: *а* – одинарный; *б* – дифференциальный

Для измерения расстояний, бóльших, чем в предыдущем случае, используются датчики с подвижным сердечником (рис. 40). Для датчиков такого типа формула (18) преобразуется в вид

$$L = \frac{0{,}2\pi W^2 S \mu_\Sigma 10^{-8}}{l}, \qquad (21)$$

где l – длина магнитопровода, μ_Σ – суммарная магнитная проницаемость среды внутри катушки. Среда состоит из двух компонентов – на участке x – сердечник и воздушный зазор δ, на участке (L–x) – только воздух. Коэффициенты магнитной проницаемости: для воздуха – μ = 1; для стали – μ = 49800.

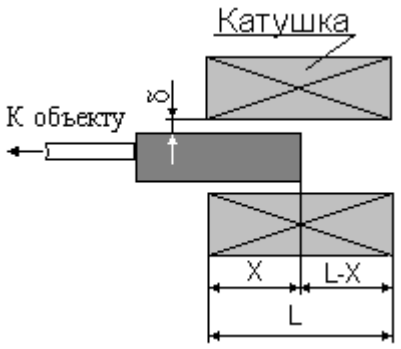


Рис. 40. Датчик с подвижным сердечником

$$\mu_\Sigma = \int \frac{d\mu}{dV}, \qquad (22)$$

где V – объем пространства внутри катушки.

Из формулы (22) видно, что датчик обладает нелинейной характеристикой. Тем не менее из-за достоинств, общих для всех индуктивных датчиков, использование их с подвижной катушкой при не очень высоких требованиях к точности измерений весьма эффективно.

Поворотные (вращающиеся) трансформаторы являются электрическими машинами с неявно выраженными полюсами и служат индуктивными датчиками угла поворота. Имеют неподвижный статор и вращающийся ротор, связанный с определяемым объектом. В пазы статора и ротора уложены по две взаимно-перпендикулярные обмотки, в статор – первичные, в ротор – вторичные. При изменении положения статора меняется и напряжение на выходе вторичных обмоток при неизменности напряжения на первичных. Так, для синусно-косинусного трансформатора СКВТ вторичное напряжение

$$U_2 = U_1 \frac{\sin\alpha}{1 + k_T \cos\alpha}, \qquad (23)$$

где U_1 – первичное напряжение; α – угол поворота; k_T – коэффициент трансформации при α = 0. Вид формулы (23) показывает, что характеристика вращающегося трансформатора нелинейна. Это является единственным недостатком данного датчика.

Сельсины представляют собой электрические микромашины с однофазной обмоткой возбуждения и трехфазной вторичной обмоткой. Полностью обратимы: в зависимости от условий могут применяться и как электродвигатели и как генераторы. Служат для измерения угловых перемещений. Принцип работы сельсина состоит в следующем. При включении статорной обмотки в сеть переменного тока напряжением $U_п$ (рис. 41,*а*), она создает

пульсирующий магнитный поток, который индуцирует в каждой фазе роторной обмотки эдс, зависящей от угла поворота ротора α:

$$E_1 = E_{max}cos\alpha;$$
$$E_2 = E_{max}cos(\alpha + 120^\circ); \qquad (24)$$
$$E_2 = E_{max}cos(\alpha + 240^\circ).$$

Величина напряжения в любой фазной обмотке позволяет судить об угле поворота ротора. Сельсины применяются попарно, причем один работает как электродвигатель, а другой – как генератор. Известны две схемы подключения сельсинов – **индикаторная** и **трансформаторная**.

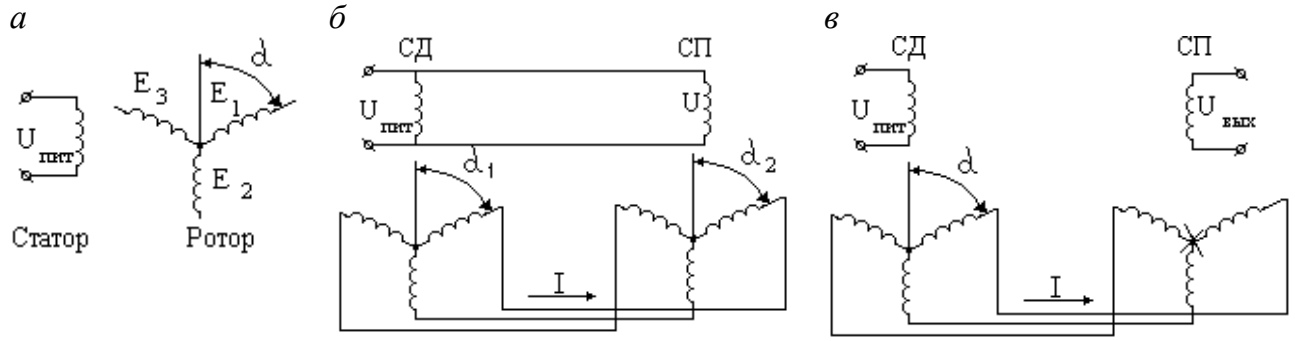


Рис. 41. Схемы сельсинов: *а* – схема обмоток; *б* – индикаторная схема; *в* – трансформаторная схема

Индикаторная схема изображена на рис. 41,*б* и служит как синхронная система дистанционной передачи информации об угле поворота, например в приводе самописца, регистрирующего положение контрольной тележки путерихтовочной машины. Сельсин-пара состоит из сельсин-датчика (СД) и сельсин-приемника (СП). Все обмотки как возбуждения $ОС_1$ и $ОС_2$, так и вторичные $ОР_1$ – $ОР_6$ – соединены параллельно. При повороте ротора СД, работающего как генератор на угол α_1, в цепях связи наводятся уравнительные токи *I*, стремящиеся повернуть ротор СП (электродвигателя) на угол α_2.

Трансформаторная схема приведена на рис. 41,*в*. Она служит как датчик угла поворота, например, в системе регулирования тягового усилия неполноприводного тягача (система следит за рассогласованием частот вращения буксующих приводных и неприводных колес). В отличие от предыдущей схемы статорные обмотки разделены. Статорная обмотка СД подключена к питанию, статорная обмотка СП является выходной: с нее снимается напряжение $U_{вых}$. Для того чтобы схема работала в трансформаторном режиме, ротор СП должен быть заторможен. Схема представляет собой спаренный поворотный трансформатор. Поворот ротора СД вызывает в цепях связи уравнительные токи *I*. Так как ротор СП заклинен, уравнительные токи наводят в статорной обмотке СП электродвижущую силу (эдс) $U_{вых}$, пропорциональную углу поворота ротора СДК общим достоинствам индуктивных датчиков перемещения стоит отнести их высокую надежность и отсутствие подвижных электрических контактов, поэтому, нет износа и искрения. К недостаткам – ограничение по применимости (только в цепях

переменного тока), высокие требования к стабильности частоты питающего напряжения.

Емкостные датчики перемещения.

Емкостное сопротивление конденсатора определяется по формуле

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}, \tag{25}$$

где f – частота переменного тока, C – емкость конденсатора,

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi\delta}, \tag{26}$$

где ε – диэлектрическая постоянная материала диэлектрика; S – площадь пластин; δ – зазор между пластинами. В емкостных датчиках перемещения используется изменение всех трех переменных правой части формулы (26).

Емкостные датчики с переменной площадью пластин. На рис. 42,*а* изображен поворотный датчик (угол измерения – до 180°). Пластины поворотной и неповоротной части чередуются. Площадью пластин конденсатора является площадь перекрытия (заштрихована). Принцип действия линейного датчика понятен из рис. 42,*б*, здесь X – текущее значение перемещения, L – диапазон измерения.

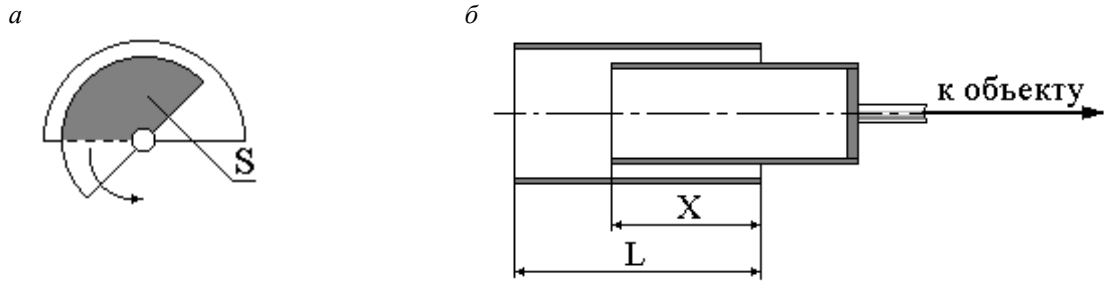


Рис. 42. Датчики с переменной площадью пластин: *а* – поворотные; *б* – линейные

Емкостные датчики с переменным зазором служат для точного измерения малых линейных перемещений. При перемещении подвижной пластины (или пакета пластин) изменяется зазор, следовательно, и емкость.

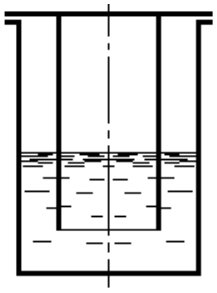


Рис. 43. Емкостной уровнемер

Емкостные датчики с переменной диэлектрической проницаемостью среды служат для измерения уровня жидкости и представляют собой бак с центральным стержнем трубчатого сечения (рис. 43).

Стенки бака являются одной из пластин конденсатора, стержень – другой. Так как жидкость и ее насыщенный пар обладают разными ε, при изменении уровня жидкости емкость конденсатора и, следовательно, его емкостное сопротивление изменяются.

Главными достоинствами емкостных датчиков перемещения являются их высокая точность и отсутствие подвижных элек-

трических контактов, т. е. отсутствие износа и искрения. Недостатком является ограниченность применимости – они достаточно эффективны только в высокочастотных цепях переменного тока.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите отличия датчиков положения и перемещения.
2. В чем главный недостаток датчиков положения прямого действия?
3. От чего зависит скорость размыкания контактов в датчике положения мгновенного действия?
4. Назовите достоинства и недостатки герконовых конечных выключателей.
5. В чем принцип действия мультивибратора ?
6. Каково условие открытости p–n–p-транзистора. Опишите режим «Выключено» бесконтактного выключателя.
7. Опишите режим «Включено» бесконтактного выключателя.
8. Назовите достоинства и недостатки датчиков перемещения активного сопротивления.
9. Назовите достоинства и недостатки индуктивных датчиков перемещения?
10. Какие ограничения применимости емкостных датчиков перемещения?

Лекция 5
Датчики скорости, усилия, температуры

➢ Датчики скорости

В электрических системах управления используются следующие датчики скорости – вычислительные, тахогенераторы, центробежные.

Вычислительные датчики скорости. Известно, что скорость можно определить, зная пройденный путь и время. Соответственно и вычислительный датчик скорости есть комбинация двух датчиков – перемещения, времени и вычислительного устройства, по их показаниям определяющего скорость. Наиболее удобно применение такого датчика при использовании в качестве центральной части системы управления одношинного процессора (ЭВМ). В качестве датчика времени используется собственный тактовый генератор процессора. Вычислительным устройством является сам процессор. При наличии в системе управления процессора такой датчик является наиболее простым по конструкции. Разновидностью вычислительных датчиков является *импульсный датчик*, предназначенный для определения частоты вращения. На вращающемся объекте устанавливается постоянный магнит, а на неподвижной части конструкции – катушка индуктивности. При прохождении магнита мимо катушки он наводит в последней электрический импульс (этот же принцип используется в магнето системы зажигания некоторых одноцилиндровых двигателей внутреннего сгорания). Катушка связанна с вычислительным устройством, которое по числу импульсов в заданное время определяет частоту вращения.

Тахогенераторы. У любого электрического генератора выходное напряжение пропорционально частоте вращения вала. На этом основан принцип действия тахогенератора. Он представляет собой малогабаритную электрическую машину постоянного или переменного тока с искусственно выпрямленной характеристикой – зависимостью выходного напряжения от частоты вращения. В отличие от всех рассмотренных ранее датчиков параметрического типа, тахогенераторы относятся к генераторному типу, т.е. они вырабатывают электроэнергию пропорционально входному воздействию.

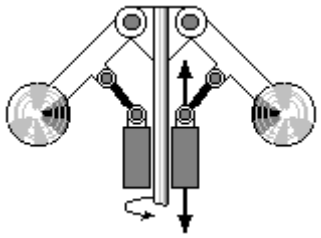


Рис. 44. Механическая часть центробежного датчика

Центробежные датчики. Конструкция датчика разработана впервые Джеймсом Уаттом. Использовался в качестве центробежного регулятора расхода пара для изобретенной им паровой машины. Механическая часть датчика приведена на рис. 44. При вращении вала грузы на рычагах расходятся под действием центробежной силы, преодолевая силу тяжести центрального груза. В некоторых датчиках центральный груз заменен пружиной Перемещение центрального груза пропорционально угловой частоте вращения. Такие датчики получили большое распространение в механических системах автоматики, например, в автоматической системе защиты двигателя грузового автомобиля

от самопроизвольного повышения частоты вращения (работа двигателя «в разнос»).

При использовании в качестве центрального груза электрического коммутатора получаем электромеханическую систему автоматического регулирования заглубления отвала бульдозера в зависимости от частоты вращения двигателя. Если центральный груз связать с любым из рассмотренных ранее датчиков перемещения, получится пропорциональный центробежный датчик скорости. Чаще всего эти датчики используются в сочетании с конечным выключателем как предельные – они срабатывают в режиме «Включено» – «Выключено» при достижении предельно максимальных или предельно минимальных оборотов вала.

➢ **Датчики усилия**

Усилие *F*, масса *m* и ускорение *a* связаны вторым законом Ньютона $F = m\,a$. Следовательно, измеряя силу инерции тела известной массы, косвенным путем можно определить ускорение. Давление есть усилие деленное на площадь. При известной площади давление можно определить измеряя усилие. Отсюда вывод: усилие, ускорение и давление измеряются одними и теми же датчиками усилия.

Известны следующие типы датчиков усилия: упругие, тензометрические, магнитострикционные, пьезоэлектрические.

Упругие датчики усилия. Это наиболее распространенный тип датчиков. Они представляют собой комбинацию из упругого элемента и любого из рассмотренных выше датчика перемещения. Упругие элементы обладают жесткостной характеристикой

$$F = cH, \tag{27}$$

где *F* – усилие, *H* – деформация элемента, *c* – жесткость элемента.

В упругих датчиках усилия применяются упругие элементы с линейной или приближенной к линейной характеристикой (27) (рис. 45,*а*). В этом случае *c* представляет собой постоянную величину – тангенс угла наклона характеристики к оси *H*. При нелинейности *F* жесткость сама является функцией – производной первого порядка от *F*

$$c = F'(H). \tag{28}$$

В упругих датчиках усилия происходит двойное преобразование: сначала усилие в упругом элементе преобразуется в перемещение подвижного конца элемента, затем это перемещение в датчике перемещения преобразуется в изменение одного из параметров (активного, индуктивного или емкостного сопротивления) выходной цепи. На рис. 45, *б, в* и *г* приведены основные типы упругих элементов датчиков усилия. Винтовая пружина обладает линейной жесткостной характеристикой и служит для преобразования усилия в перемещение в довольно большом диапазоне. Характеристики скобы и кольца нелинейны. Они близки к линейным на сравнительно небольшом участке, что ограничивает диапазон измеряемых усилий. Вместе с тем в отличие от винтовых

пружин, они обладают высокой нагрузочной способностью при относительно небольших габаритах.

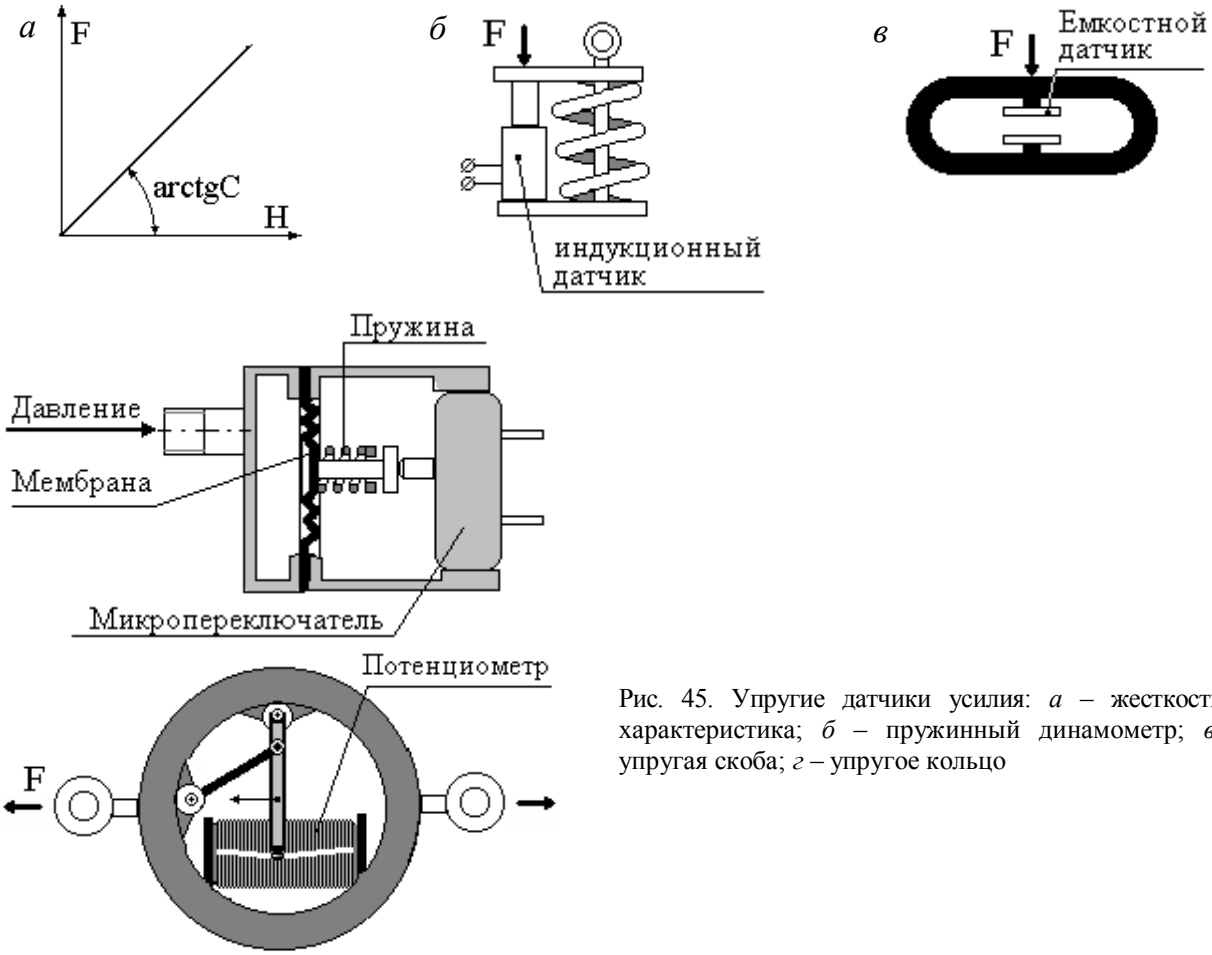


Рис. 45. Упругие датчики усилия: *а* – жесткостная характеристика; *б* – пружинный динамометр; *в* – упругая скоба; *г* – упругое кольцо

Примером является широко распространенное в гидроприводе электрогидравлическое реле давления (РД) (рис. 46). Принцип действия понятен из этого рисунка. Электрическую часть представляет микропереключатель типа МП.

Тензометрические датчики усилия. Известно, что сопротивление металлического проводника R прямо пропорционально его длине L и обратно пропорционально площади сечения S

$$R = \rho \frac{L}{S}, \tag{29}$$

где ρ – удельная проводимость проводника.

Следовательно, чем длиннее и тоньше проводник, тем его сопротивление выше. На этом основан принцип действия тензометрических датчиков или тензометров. Тензометр (рис. 47) представляет собой проводник из тонкой (диаметр 0,02–0,05 мм) проволоки, расположенный между двумя слоями диэлектрической бумаги или пленки (самоклеящейся). Тензометр наклеивается на конструкцию, нагрузку на которую необходимо определить. При деформации (растяжении или сжатии)

Рис. 47. Тензометр

конструкции тензометр растягивается или сжимается вместе с ней, соответственно меняется его сопротивление.

Таким образом, тензометр можно считать упругим датчиком усилия, в котором упругий элемент является внешним по отношению к самому датчику.

Магнитострикционные датчики усилия. Магнитные свойства ферромагнетиков зависят от их структуры. В ряде миниатюрных областей ферромагнетика магнитные поля электронов расположены параллельно друг другу. Эти области – *домены* – являются миниатюрными постоянными магнитами. Они расположены хаотически. Поэтому общее магнитное поле ферромагнетика в спокойном состоянии равно нулю. При сжатии ферромагнетика его структура упорядочивается. Домены поворачиваются, ориентируясь своей магнитной осью поперек направления силы сжатия. Ферромагнетик начинает обладать своим собственным магнитным полем, величина которого пропорциональна усилию сжатия. Такова суть магнитострикционного эффекта, положенного в основу одноименного датчика. Датчик представляет собой индукционную катушку с сердечником из ферромагнетика, подверженным сжатию измеряемым усилием. При сжатии сердечник обретает свойства постоянного магнита. Магнитное поле его изменяет индукционное сопротивление катушки.

Пьезоэлектрические датчики усилия. Пьезоэлектрический эффект заключается в том, что у некоторых полупроводников (например, у титаната бария) при сжатии кристалла поперек его главной электрической оси на перпендикулярных этой оси торцах возникает электрический потенциал, пропорциональный сжатию. Обратный пьезоэлектрический эффект, когда при подаче потенциала на торцы кристалла он сжимается и разжимается. Прямой и обратный пьезоэлектрический эффект широко распространен в радиотехнике, например в акустических системах. На прямом эффекте основан и принцип действия пьезоэлектрического датчика усилия. Он (рис. 48) состоит из двух полупроводниковых пластин *1*, зажатых в обойме *2*. Необходимо отметить, что пьезоэлектрический датчик относится к довольно редкому виду генераторных датчиков – он вырабатывает электроэнергию в количестве, пропорциональном входному сигналу.

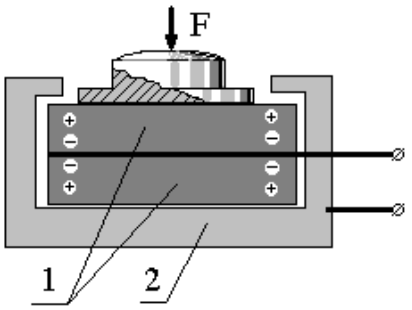


Рис. 48. Пьезоэлектрический датчик: *1* – полупроводниковые пластины; *2* – обойма

➢ Датчики температуры

Из многочисленных датчиков в нашей области (подъемно-транспортные, строительные, путевые машины и технологические комплексы) наиболее популярны металлические и полупроводниковые терморезисторы, датчики на основе манометрической улитки, термопары, биметаллические предельные датчики температуры.

Терморезисторы подразделяются на металлические и полупроводниковые. Последние именуются **термисторами**. Зависимость их сопротивления R от температуры T имеет вид:

– для металлического проводника

$$R = R_0(1 + \beta T), \tag{30}$$

– для полупроводника

$$R = R_0 e^{-\gamma T}, \tag{31}$$

где R_0 – сопротивление при T = 0, β и γ – температурные коэффициенты.

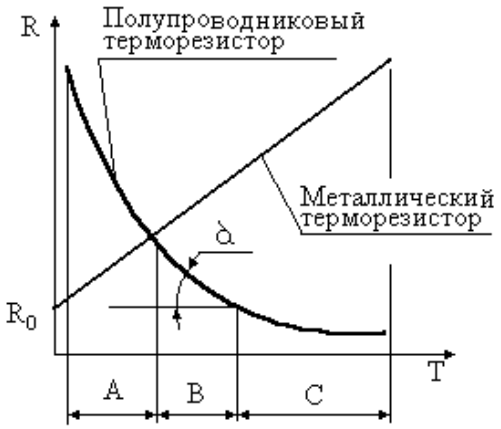


Рис. 49. Характеристики терморезисторов

Сравнительная характеристика (зависимость сопротивления от температуры) металлических и полупроводниковых терморезисторов приведена на рис. 49. Из рисунка видно, что характеристика металлического терморезистора во всем диапазоне измерения линейна, а характеристика полупроводникового терморезистора -нелинейна и обратна. Важнейшим свойством характеристики является угол α ее наклона к оси Т. Тангенс этого угла есть мера чувствительности датчика. У линейной характеристики металлического терморезистора чувствительность постоянна во всем диапазоне. По другому у полупроводникового терморезистора. Его диапазон можно разделить на три участка – А, В и С. На участке А чувствительность полупроводникового терморезистора явно выше, чем металлического, на участке В – примерно равна, а на участке С – явно меньше. Отсюда области применения терморезисторов: металлического – для измерения температуры в сравнительно широком диапазоне, полупроводникового – для более точного измерения в узком диапазоне (участок А).

Манометрический датчик температуры. Основным элементом этого датчика является манометрическая улитка – свернутая в спираль металлическая трубка (рис. 50). Поперечное сечение гнутой трубки меньше, чем прямой. Поэтому при повышении внутреннего давления трубка стремится увеличить свой объем – распрямиться. Этот же эффект используется для измерения давления манометром, откуда и название улитки. При измерении температуры внутренний объем трубки герметичен и заполнен жидкостью. Так как жидкость практически несжимаема, изменение температуры приводит к изменению давления и повороту свободного конца трубки. Этот поворот регистрируется поворотным датчиком перемещения (например, емкостным как изображено на данном рисунке). Таким образом, в манометрическом датчике температуры осуществляется тройное

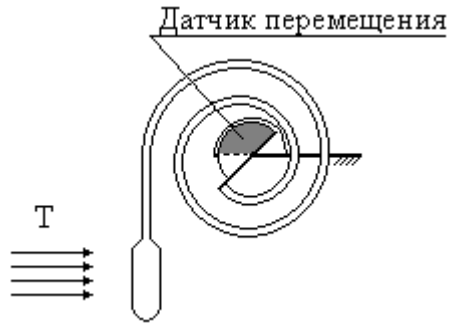


Рис. 50 Манометрический датчик температуры

преобразование первичного воздействия: температура – давление – поворот – изменение сопротивления.

Термопары являются датчиками генераторного типа. В основу действия положен термоэлектрический эффект: при нагревании спая двух металлов или сплавов с большой разницей электропроводимости (например, в термопаре ТХК – хромель–копель), между этими металлами появляется электродвижущая сила, пропорциональная температуре нагрева. Используются для измерения довольно высоких температур (ТХК – до 700 °С, ТХА – до 1200 °С).

Биметаллический предельный датчик температуры представляет собой электрический контакт, пластина которого изготовлена из двух металлов с большой разницей коэффициента теплового расширения. При нагревании пластины от внешнего источника тепла или протекающего по ней тока, за счет разницы теплового расширения она изгибается, размыкая контакт. Эти датчики получили большое распространение в качестве тепловых реле, встраиваемых в магнитные пускатели и служащих для защиты трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором от перегруза.

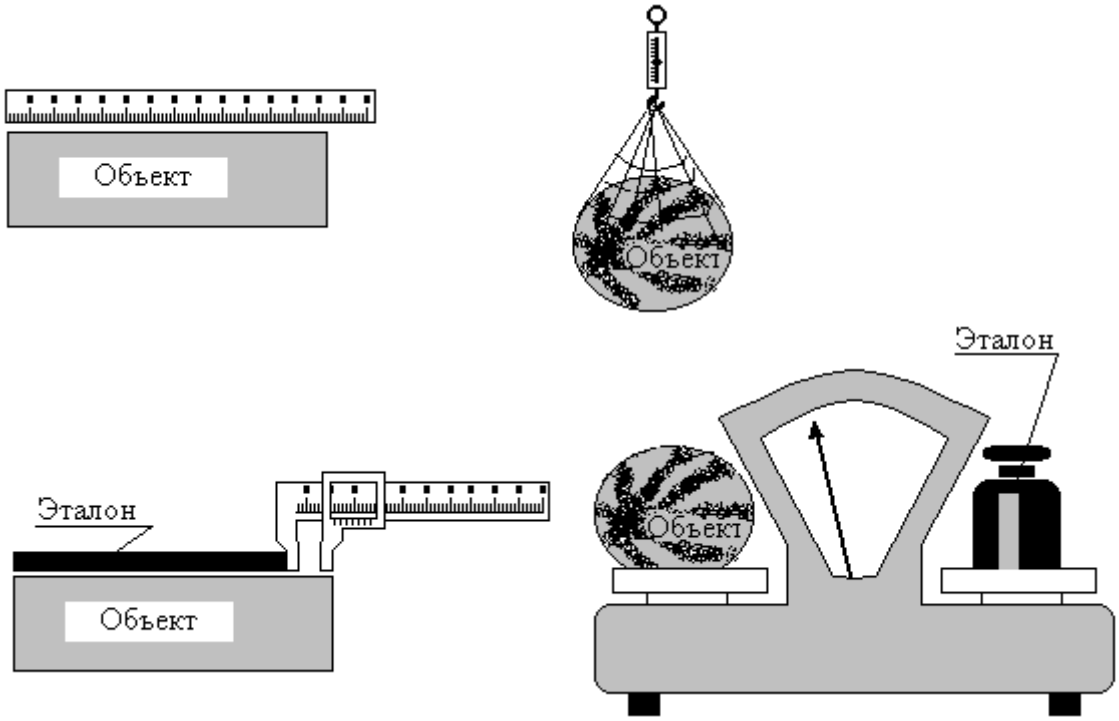
Контрольные вопросы и задания

1. Какие из рассмотренных датчиков относятся к генераторному типу?
2. Назовите принцип действия вычислительного датчика скорости.
3. На чем основана работа тахогенератора?
4. Какие физические эффекты используются в датчиках усилия?
5. Почему для измерения усилия, ускорения и давления используются подобные датчики?
6. Объясните является ли тензометр упругим датчиком?
7. Сравните область применения металлического и полупроводникового терморезисторов.
8. Какие физические эффекты используются в датчиках температуры?
9. Какие преобразования проходит сигнал в манометрическом датчике температуры?

Лекция 6
Схемы подключения датчиков

При воздействии на датчики параметрического типа, рассмотренные в предыдущих двух лекциях, меняется активное, емкостное или индуктивное сопротивление выходной цепи. Для того чтобы изменение сопротивления преобразовалось в электрический сигнал, т. е. в изменение количества электрической энергии, необходима специальная электрическая **схема подключения датчика** к системе управления. Эти схемы получили в классификации ГСП даже отдельную рубрику и именуются **нормирующими преобразователями.** Так как получение информации от объекта, преобразование ее и передача далее в систему управления есть процесс измерения какого-либо параметра объекта, мы вынуждены прибегнуть к терминам и основным положениям **теории измерения**. Из этой теории известно, что объект можно измерить тремя различными способами: **непосредственным измерением, дифференциальным сравнением с эталоном и нулевым сравнением.** На рис. 51 приведены примеры использования этих способов при измерении длины и массы объекта.

а



б

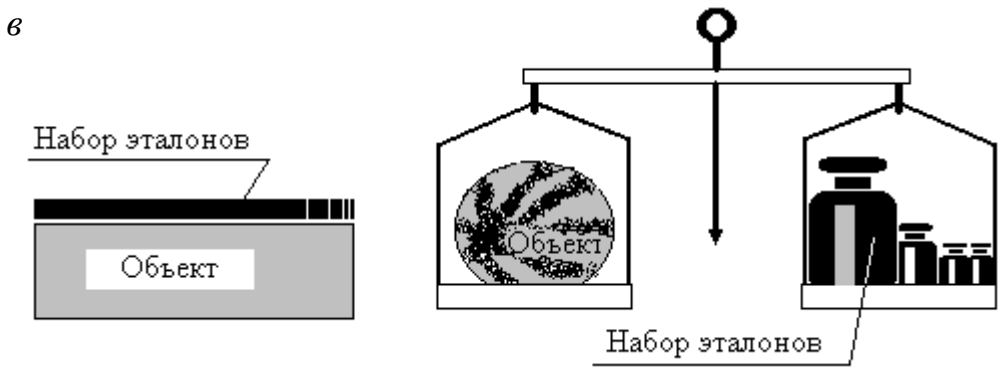


Рис. 51. Способы измерения: *а* – непосредственное измерение; *б* – дифференциальное сравнение; *в* – нулевое сравнение

При *непосредственном измерении* параметр объекта измеряется во всей своей величине непосредственно измерительным прибором (в приведенных примерах – слесарной линейкой и пружинными весами – безменом). Данный способ требует наименьшего инструментального обеспечения, но вместе с тем и наименее точен. Объясняется это следующим. Точность измерения связана с его диапазоном. Так, цена деления (величина, обратная точность измерения) слесарной линейки длиной 500 мм составляет 1 мм, штангенциркуля ШЦ-250 (диапазон измерения 250 мм) – 0,1 мм, микрометра МК-50 (диапазон измерения 50 мм) – 0,01 мм. Данный же способ измерения обладает наибольшим диапазоном – измеряется весь объект, следовательно, и точность измерения будет наименьшей.

Для пояснения остальных способов необходимо ввести понятие **эталона**. В нашем случае эталон – дополнительный элемент (прибор, инструмент и т.д.), используемый при измерении, величина которого определяется вне самого процесса измерения объекта (до него или после).

При *дифференциальном сравнении* объект сравнивается с эталоном (в приведенных примерах – с мерной плиткой и гирей) и измеряется разница (лат. дифференциал) между объектом и эталоном. Так как разница всегда меньше целого, точность измерения в данном случае выше, чем в предыдущем. Величина эталона определяется до измерения объекта. Инструментальное оснащение измерительного процесса увеличивается за счет эталона.

И, наконец, при *нулевом сравнении* измеряемый объект полностью уравновешивается с эталоном (в приведенных примерах – с набором мерных плиток и набором гирь). Другими словами, разница между объектом и эталоном сводится к нулю. Сам процесс измерения сводится к регистрации факта равенства объекта и эталона. Так как диапазон измерения (нуль) наименьший, то и точность данного способа наибольшая. Величина эталона определяется (вычисляются суммарные длина плиток и масса гирь) после процесса измерения. Инструментальное оснащение наиболее сложное.

Ниже будут рассмотрены схемы подключения датчиков, основанные на всех трех способах измерения.

➢ Схемы подключения, основанные на непосредственном измерении

Последовательное подключение датчика (рис. 52,*а*). На этой и последующих схемах для простоты изложения измерительный прибор будет изображаться вместо остальной системы управления. Тогда сопротивление R_H (по схеме – внутреннее сопротивление измерительного прибора) будет являться сопротивлением остальной системы управления. Датчик на данной схеме приведен в виде переменного сопротивления R_1, текущее значение которого X зависит от состояния объекта измерения. Входной величиной является X, выходной – сила тока I. Зависимость между ними (характеристика датчика вместе со схемой подключения) показана на графике и описывается законом Ома для последовательного соединения

$$I = \frac{U}{X + R_H}. \qquad (32)$$

Как видно из графика (рис. 52,*в*), характеристика эта нелинейна и носит обратный характер (при увеличении X уменьшается I). В среднем участке А характеристику можно условно считать линейной с погрешностью нелинейности δ. Эта погрешность является граничным условием точности данной схемы подключения, которая составляет обыкновенно 5...8 % от диапазона измерения А.

Параллельная (шунтовая) схема подключения (рис. 52,*б*). В отличие от предыдущей схемы закон Ома для параллельного соединения

$$I = \frac{U}{R_\Sigma} = \left| R_\Sigma = \frac{XR_H}{X + R_H} \right| = \frac{U(X + R_H)}{XR_H} = \frac{U}{R_H} + \frac{U}{X}. \qquad (33)$$

Внешний вид характеристики соответствует таковому у последовательного соединения. Характеристика так же является нелинейной и обладает обратным характером. Точность данной схемы такова же, как у последовательной.

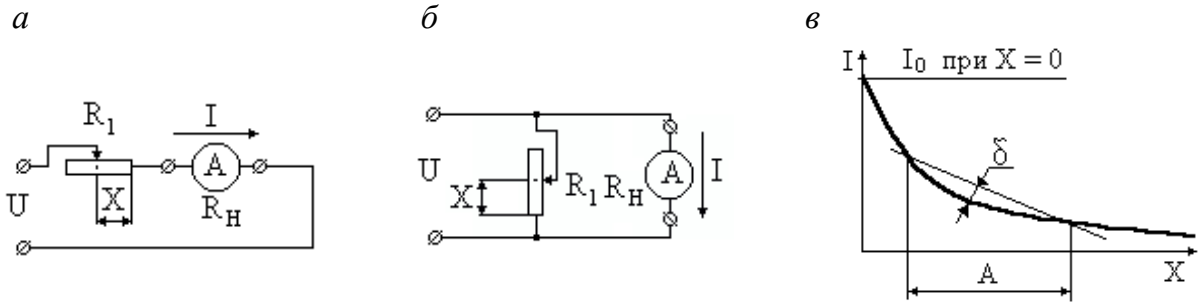


Рис. 52. Подключение датчиков: *а* – последовательное; *б* – параллельное; *в* – характеристика соединений

Делитель напряжения (потенциометрическая схема) (рис. 53) представляет собой разновидность параллельного подключения датчика. Схема широко распространена в радиотехнике для изменения напряжения (отсюда и название). Выражение (33) для нее будет выглядеть

$$I = U\frac{X}{R_1 R_H(1+\frac{X}{R_H}-\frac{X^2}{R_1 R_H})}. \qquad (34)$$

Влияние величины X в числительной части выражения (34) более значимо, чем в знаменательной. Характеристика схемы имеет прямой характер, а так как влияние X в знаменательной части не пренебрежимо мало, то характеристика обладает явной нелинейностью. Ее прямой характер выгодно отличает данную схему от предыдущих. При увеличении $R_н$ нелинейность δ уменьшается, но при этом снижается чувствительность датчика – его возможность реагирования на малые возмущения на входе. Оптимальное сочетание для потенциометрических схем

$$R_H \approx 4R_1, \qquad (35)$$

при этом точность схемы примерно равна 8...10 % диапазона измерения.

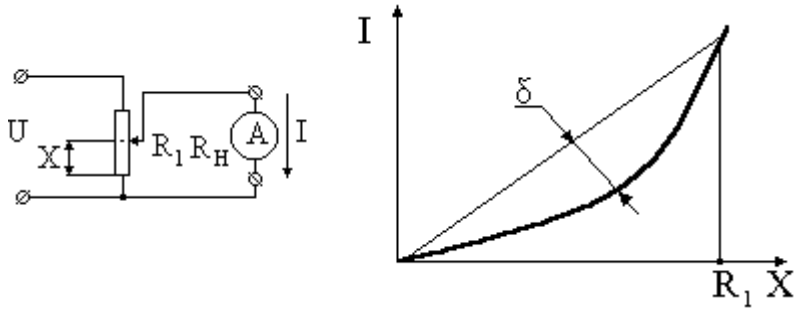


Рис. 53. Схема делителя напряжения

Общим достоинством всех схем непосредственного измерения является их простота: в них не входит ни одного элемента, кроме датчиков и соединительных проводов. Недостатком этих схем является относительно низкая точность (5…10 % диапазона измерения). Отсюда сфера применения этих схем: для подключения датчиков либо с дискретной характеристикой, либо применяемых для грубой оценки обстановки.

➢Схемы подключения, основанные на дифференциальном сравнении

Мостовая схема (рис. 54). Датчиком является потенциометр R_1. На рис. 54 показана наиболее простая схема – мост сопротивлений постоянного тока. Диагональ моста 1–2 называется **диагональю питания**, а диагональ 3–4 – **измерительной**. Клеммами 3 и 4 схема подключается к системе управления (в нашем случае – к амперметру).

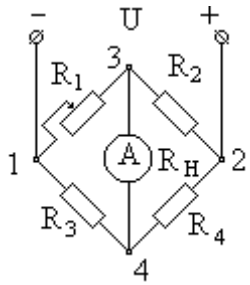


Рис. 54. Мостовая схема

От точки 1 в точку 2 электрический ток может проходить двумя маршрутами: 1–3–2 и 1–4–2. В каком направлении и какой величины ток будет протекать по соединяющей эти маршруты измерительной диагонали зависит от величины сопротивлений R_1, R_2, R_3 и R_4..

Ток в измерительной диагонали

$$I_{3-4} = \frac{U_{3-4}}{R_H}, \tag{36}$$

где $U_{3\text{-}4}$ – разница потенциалов между точками 3 и 4:

$$U_{3-4} = U_{1-3} - U_{1-4}. \tag{37}$$

Для $U_{1\text{-}3}$ и $U_{1\text{-}4}$ из закона Ома

$$\begin{aligned} U_{1-3} &= I_{1-3}R_1; \\ U_{1-4} &= I_{1-4}R_3. \end{aligned} \tag{38}$$

где силы токов

$$\begin{aligned} I_{1-3} &= \frac{U}{R_1 + R_2}; \\ I_{1-4} &= \frac{U}{R_3 + R_4}. \end{aligned} \tag{39}$$

Решая совместно формулы (36)–(39), получаем напряжение и силу тока в измерительной диагонали

$$\begin{aligned} U_{3-4} &= U\left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right); \\ I_{3-4} &= U\,\frac{R_1R_4 - R_2R_3}{R_н(R_1 + R_2)(R_1 + R_2)}. \end{aligned} \tag{40}$$

Наиболее интересным является состояние моста, при котором по измерительной диагонали ток не течет, т. е. $U_{3\text{-}4}$= 0. Это состояние именуется **балансом моста**. Приравняв к нулю формулу (40), нетрудно вывести условие баланса

$$R_1R_4 = R_2R_3 \tag{41}$$

и балансовую величину переменного сопротивления

$$R_1 = \frac{R_2R_3}{R_4}. \tag{42}$$

Из анализа формул (40)–(42) видно, что **ток в измерительной диагонали пропорционален разнице между текущим и балансным состоянием моста**, т. е. реализован дифференциальный способ сравнения, причем эталоном является балансное состояние моста.

Сказанное выше справедливо и для мостов переменного тока, причем в плечи моста можно ставить резисторы сопротивления, индуктивности, емкости

или их сочетания. Поэтому мосты переменного тока гораздо универсальнее, чем постоянного. Формулы (40)–(42) для переменного тока принимают вид:

$$U_{3-4} = U\left(\frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}\right);$$
$$I_{3-4} = U\frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{Z_н(Z_1 + Z_2)(Z_1 + Z_2)}; \quad (43)$$

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3; \quad (44)$$

$$Z_1 = \frac{Z_2 Z_3}{Z_4}, \quad (45)$$

где $\overline{Z}_i$ – полное сопротивление *i*-го элемента (величина векторная):

$$\overline{Z}_i = \overline{R}_i + \overline{XL}_i + \overline{XC}_i, \quad (46)$$

R, XL, XC – соответственно активное, индуктивное и емкостное сопротивления.

Мостовая схема подключения датчиков получила большое распространение благодаря своим достоинствам. К ним относятся универсальность (схема стыкуется с параметрическими датчиками любых типов и может работать как на постоянном, так и на переменном токе) и высокая точность (до 0,5 % диапазона измерения, что вполне достаточно для решения подавляющего числа задач управления) при относительной простоте. Некоторым недостатком схемы на переменном токе является сложность ее настройки на балансное состояние – необходимо последовательно и раздельно настроить все три составляющие полного сопротивления.

Дифференциальная схема подключения в отличие от мостовой может работать только на переменном токе и с датчиками с изменяемыми активным и индуктивным сопротивлением. Вместе с тем, при точности, не уступающей таковой у мостовой схемы, они проще в настройке, что является причиной их применимости. Известны четыре типа дифференциальных схем, приведенные на рис. 55. Они подразделяются по виду изменяемого параметра на схемы с переменным активным и индуктивным сопротивлением, каждая из которых может, в свою очередь, быть с одинарным или двойным изменением.

Дифференциальные схемы с переменным активным сопротивлением приведены на рис. 55, *а* и *б*. Датчиками здесь являются потенциометры R_1 – состоянию объекта измерения соответствует положение ламели. Принцип действия рассмотрим на наиболее простом примере – одинарной схеме с переменным активным сопротивлением. Схема состоит из двух замкнутых контуров, имеющих смежный участок *a–b*. Точки *a* и *b* – места подключения схемы к системе управления (на рисунке заменена амперметром). У каждого контура имеется свой источник питания – вторичные обмотки L_1 и L_2 трансформатора $Тр_1$. Ток в контурах

$$I_1 = \varepsilon_1 Z_1$$
$$I_2 = \varepsilon_2 Z_2, \quad (47)$$

где ε_1, ε_2 – электродвижущие силы соответствующих контуров, Z_1, Z_2 – суммарные полные сопротивления контуров. Электродвижущие силы в контурах направлены так, что на смежном участке a – b они противоположны, т. е. суммарный ток на этом участке

$$I_{a-b} = I_1 - I_2 . \qquad (48)$$

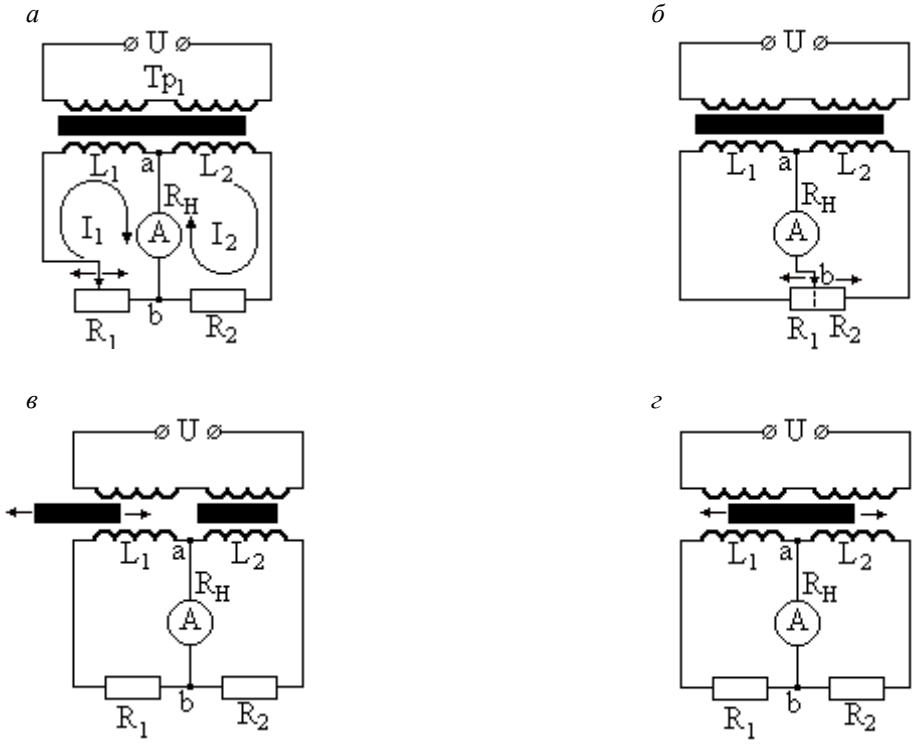


Рис. 55. Дифференциальные схемы подключения: с переменным активным сопротивлением: *а* – одинарная; *б* – двойная; с переменным индуктивным сопротивлением: *в* – одинарная; *г* – двойная

При равенстве токов $I_1 = I_2$ наступает состояние баланса – суммарный ток на участке a – b равен нулю. При изменении состояния датчика (потенциометра R_1) изменяется сопротивление первого контура и соответственно I_1. Состояние баланса нарушается. Ток, протекающий по участку a – b пропорционален разности между текущим состоянием датчика и состоянием баланса, что соответствует способу измерения дифференциальным сравнением.

Принцип действия остальных схем аналогичен, но имеются и различия. В схемах двойного действия (рис. 55, *б* и *г*) изменение состояния объекта вызывает изменения в обоих контурах, причем противоположного характера. В то же время при равном с одинарной схемой изменении состояния датчика ток рассогласования $I_{a\text{-}b}$ (выходной сигнал схемы) будет в два раза выше, т. е. чувствительность данных схем в два раза выше, а диапазон варьирования входного сигнала при заданном диапазоне выходного – в два раза меньше. В схемах с переменной индуктивностью (рис. 55, *в* и *г*) датчиком являются одна или обе вторичные обмотки L_1 и L_2 трансформатора, а подвижным элементом датчика – сердечник одной или обеих обмоток. Перемещение сердечника приводит к изменению магнитной проницаемости среды внутри трансформатора, что вызывает двойственное изменение в схеме: во-первых,

изменяется коэффициент трансформации (см. курс «Электрические машины»), следовательно, электродвижущая сила вторичной обмотки, во-вторых, изменяется индуктивное сопротивление вторичной обмотки [см. формулу (21)]. Оба эти изменения согласованно приводят к изменению тока [формула (47)]. Поэтому, чувствительность этих схем выше, чем с переменным активным сопротивлением. Кроме того, у схем с переменной индуктивностью отсутствует подвижный электрический контакт, следовательно, нет износа и искрения. Все это привело к большей распространенности последних схем (особенно двойного действия как самой чувствительной из рассмотренных) по отношению к схемам с переменным активным сопротивлением.

Схемы подключения, основанные на дифференциальном сравнении, обладают по сравнению с остальными средними значениями сложности и точности и поэтому получили наибольшее распространение в системах управления.

➢Схемы подключения, основанные на нулевом сравнении

Применяются при необходимости особой точности измерения. Применение их ограничивается высокой сложностью. Как правило, используются в настроечно-регулировочных подсистемах. Известны два способа уравновешивания объекта измерения и эталона – **автоматический баланс** и **компенсация**. Со схемами, основанными на этих способах, мы и познакомимся ниже.

Схема подключения «Автобалансный мост» приведена на рис. 56 и представляет собой целую автоматическую систему с собственным усилителем, исполнительным механизмом и обратной связью, хотя ее функция совпадает с функцией датчика – получение, преобразование и передача в систему информации о состоянии объекта.

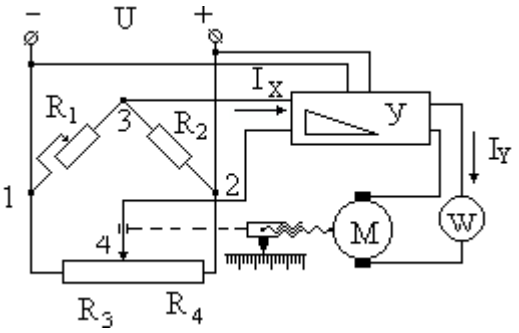


Рис. 56. Автобалансная схема

Регистрирующая часть схемы напоминает обычный мост сопротивлений за одним исключением – сопротивления R_3 и R_4 объединены в регулирующий потенциометр R_3–R_4. При разбалансировке моста (возникает при изменении состояния датчика R_1) в диагонали 3–4 возникает ток I_X. Он подается на вход усилителя У. Коэффициент усиления по мощности усилителя достаточен, чтобы он на выходе управлял вспомогательным сервоэлектродвигателем М (лат. servus – раб, слуга). I_Y – ток на выходе усилителя. Двигатель М механически связывается с ламелью регулирующего потенциометра R_3–R_4, перемещая его в сторону уменьшения разбалансировки. При наступлении состояния баланса ток I_X исчезает, и двигатель М выключается. Измерение автобалансной схемой основано на положении о том, что количество энергии, необходимое для приведения системы в устойчивое положение, равно (без учета кпд) количеству энергии, затраченному на выведение системы из этого состояния. О состоянии объекта измерения судят либо по энергии,

потребленной двигателем (на рисунке показан ваттметр), либо визуально – по положению ламеля потенциометра R_3–R_4. Точность измерения составляет сотые доли процента от диапазона измерения.

Компенсационная схема подключения. Принцип компенсации заключается в том, что электродвижущая сила, пропорциональная входному сигналу на датчике, уравновешивается равной по величине и противоположной по направлению электродвижущей силой источника питания схемы, который затем и измеряется. В компенсационной схеме используются только датчики генераторного типа. Известны двух- и трехконтурные схемы с ручной и автоматической компенсацией. В качестве примера на рис. 57 приведена двухконтурная схема с ручной компенсацией и термопарой в качестве датчика.

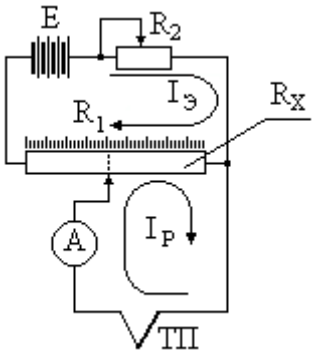


Рис. 57. Компенсационная схема

Схема состоит из двух контуров – эталонного и рабочего. Источником тока в эталонном контуре является батарея Е, в рабочем – термопара ТП (она же датчик). Потенциометр R_2 эталонного контура служит для его поднастройки в случае изменения электродвижущей силы батареи. Потенциометр R_1 оттарирован. Контуры обладают общим участком – правой по рисунку от ламеля частью потенциометра R_1 – R_X. Балансное состояние схемы наступает при равенстве токов $I_Э$ и I_P.

Так как эдс контуров направлены противоположно, на общем участке ток отсутствует. В этом месте контуры как бы разорваны и ток не протекает в них обоих. Состоянию баланса соответствует нулевое показание амперметра. Так как $I_Э = I_P$, то для эдс, вырабатываемой термопарой

$$\varepsilon = \frac{I_Э}{R_X}, \qquad (49)$$

т. е. эдс датчика обратно пропорционально сопротивлению R_X с высокой точностью, гарантируемой стабильностью $I_Э$. В состояние баланса схема приводится перемещением ламеля потенциометра R_1, отградуированного непосредственно в единицах измеряемого параметра (в данном случае – градусах). Измерение происходит следующим образом: перемещением ламеля добиваются нулевого показания амперметра, потом со шкалы потенциометра считывают значение входного сигнала датчика. Из того, что в момент измерения ток в контурах не течет, следует важнейшее свойство компенсационной схемы – **в процессе измерения энергия от объекта не отбирается**, т. е. обратное воздействие датчика на объект равно нулю. Отсюда важное следствие – собственная точность компенсационной схемы **абсолютна**. Реальная точность зависит только от собственной точности элементов схемы, что составляет, как правило, сотые и тысячные доли процента от диапазона измерения. Компенсационные схемы наиболее сложные и наиболее точные из рассмотренных. В трехконтурных схемах добавлен контрольный контур с

высокостабильным источником питания (например, ртутно-кадмиевым гальваническим элементом). Контрольный контур служит для настройки компенсационным способом тока эталонного контура. В схемах с автоматической компенсацией применяется сервопривод ламеля, аналогичный таковому в автобалансной схеме (рис. 56). Вместо амперметра в рабочий контур включается входная цепь усилителя.

Несколько особняком в ряду схем подключения датчиков стоят **электросиловые преобразователи**. Их обособленность объясняется тем, что, во-первых, они специализированы и служат только для измерения усилия, во-вторых, у них нет четкой границы между датчиком и схемой подключения. Известны два типа электросиловых преобразователей – с силовой и магнитной компенсацией. Оба они измеряют способом компенсации, только в первом случае компенсируются усилия в механической системе преобразователя, а во втором – магнитные поля электромагнита.

Электросиловой преобразователь с силовой компенсацией. Схема преобразователя приведена на рис. 58,*а*. Рабочим элементом, контактирующим непосредственно с объектом, является многоплечий рабочий рычаг *1*. Одно из плеч этого рычага через передающий рычаг *2* и тягу *3* связано с двуплечим балансным рычагом *4*. Остальные плечи свободны и служат для подключения измеряемого усилия P_1, P_2 или P_3. Свободные плечи обладают разной длиной, что позволяет при одном диапазоне выходного сигнала использовать несколько диапазонов входного усилия. Одно из плеч балансного рычага является сердечником дифференциального трансформатора L_1 – L_2 – L_3 – L_4 . При ближайшем рассмотрении этот трансформатор является не чем иным, как дифференциальной схемой подключения датчика с переменной индуктивностью в обоих контурах (см., рис. 55,*г*), причем датчиком является плечо балансного рычага. Смежный участок a–b контуров дифференциального трансформатора является одновременно входной цепью X встроенного усилителя мощности У. Выходная цепь Y усилителя является одновременно цепью питания силового электромагнита YA. Сердечник электромагнита присоединен ко второму плечу балансного рычага. Выходным сигналом преобразователя является сила тока I_Y в цепи питания электромагнита (на рис. 58 выход преобразователя представлен амперметром). Работает преобразователь следующим образом. При отсутствии усилия на рабочем рычаге левое плечо балансного рычага занимает строго симметричное положение между обмотками дифференциального трансформатора. Токи в его обоих контурах равны и противоположно направлены, на смежном участке a – b контуров токи взаимно уничтожаются. На входе в усилитель сигнал отсутствует, следовательно, отсутствует и на его выходе. Ток через обмотку электромагнита не протекает, показания амперметра равны нулю, система находится в состоянии нулевого равновесия. При появлении на каком-либо из свободных плеч рычага *1* усилия, рычажная система перемещается, сердечник дифференциального трансформатора смещается от центрального положения, на участке a – b появляется ток рассогласования. Усилитель усиливает этот ток и подает на электромагнит. Последний развивает выравнивающее усилие P_B,

пропорциональное и противоположное первоначальному возмущению. Система приходит в состояние силового равновесия, причем ток в цепи питания электромагнита строго пропорционален возмущающему усилию.

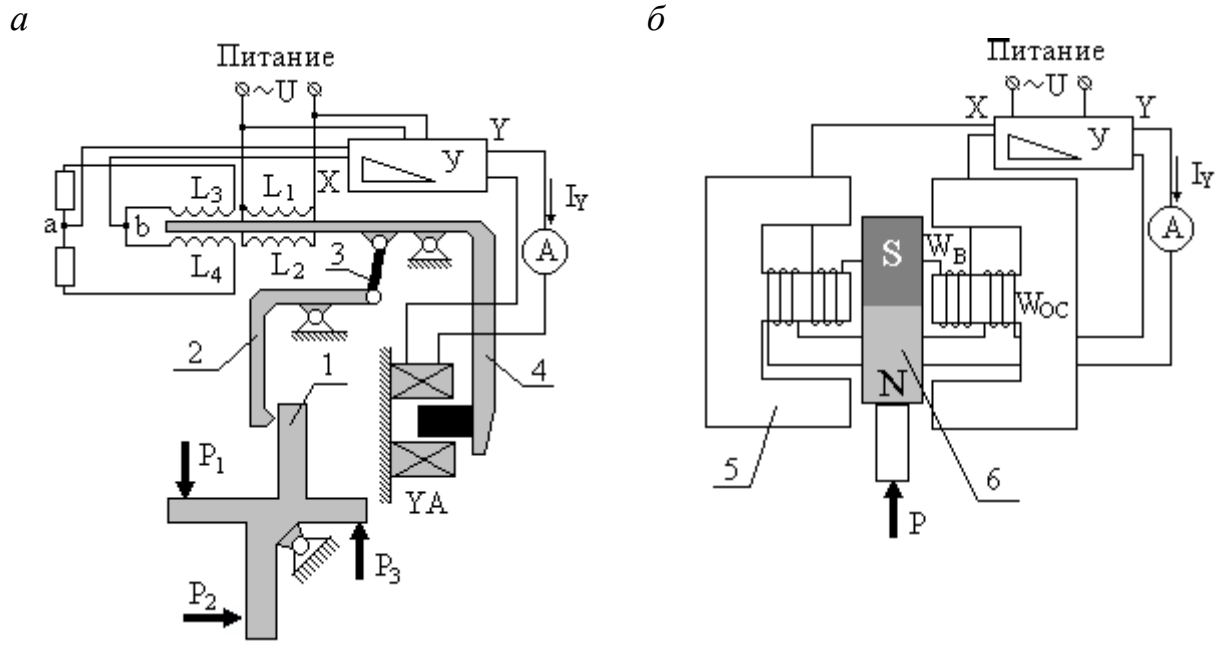


Рис. 58. Электросиловые преобразователи: *а* – с силовой компенсацией; *б* – с магнитной компенсацией: *1* – рабочий рычаг; *2* – передающий рычаг; *3* – тяга; *4* – балансный рычаг; *5* – сердечник; *6* – якорь

Электросиловой преобразователь с магнитной компенсацией (рис. 58,*б*). Преобразователь не имеет механической системы, за счет этого он проще по конструкции и меньше по габаритам. Основой конструкции является сердечник *5*, на котором намотаны две катушки – входная катушка W_B и катушка обратной связи W_{OC}. Входная катушка играет роль индуктивного датчика перемещения, а катушка обратной связи – силового электромагнита. Якорем (подвижным сердечником) служит постоянный магнит *6*.

Входная катушка соединена со входом усилителя мощности У, а катушка обратной связи – с выходом. В состоянии равновесия якорь расположен строго симметрично относительно входной обмотки и сердечника. При воздействии на якорь измеряемого усилия P состояние баланса нарушается, в цепи входной катушки и на входе в усилитель появляется ток. Усиленный ток подается на катушку обратной связи, которая развивает усилие, равное и противоположное возмущающему. Выходным сигналом, как и в предыдущем случае, служит ток на выходе усилителя.

Контрольные вопросы и задания

1. Перечислите способы измерения, сравните сложность их инструментального оснащения и точность.

2. Опишите схемы подключения датчиков, основанные на непосредственном измерении: принцип действия, область применения, достоинства и недостатки, точность измерения.

3. Опишите мостовую схему подключения датчиков: способ измерения, принцип действия, область применения, достоинства и недостатки, точность измерения.

4. Опишите дифференциальные схемы подключения датчиков: способ измерения, принцип действия, область применения, достоинства и недостатки, точность измерения.

5. Опишите схему подключения автобалансный мост: способ измерения, принцип действия, область применения, достоинства и недостатки, точность измерения.

6. Опишите компенсационную схему подключения датчиков: способ измерения, принцип действия, область применения, достоинства и недостатки, точность измерения.

7. Опишите электросиловые преобразователи: виды, способ измерения, принцип действия.

Лекция 7
Усилители

Как уже отмечалось выше (см. лекцию 3), усилители предназначены для усиления входного сигнала, как правило, от датчика, причем входной и выходной сигналы усилителя обладают одной физической природой. Электрические усилители мощности подразделяются на магнитные, электронные, электромашинные.

➢ **Магнитные усилители**

Принцип действия магнитного усилителя основан на изменении магнитной проницаемости сердечника индукционной катушки под воздействием магнитного поля управления. Проще всего принцип действия можно пояснить на примере *магнитного дросселя насыщения* (рис. 59). На схеме этого и последующих усилителей датчик или иной управляющий усилителем элемент будет представлен в виде генератора переменного сигнала $Г_X$, а исполнительное устройство или иной управляемый усилителем элемент – сопротивлением R_H. Магнитный дроссель имеет сходство с трансформатором, но это сходство чисто внешнее. Пусть имеется сердечник, на который намотаны две обмотки – управления $О_у$ и рабочая $О_Р$. Обмотка $О_у$ включена во входную цепь усилителя. В эту же цепь включены источник управляющего сигнала $Г_X$ и гасящая индуктивность $L_Г$. В выходную цепь обмотки $О_Р$ включены нагрузка R_H и источник питания переменного тока напряжением U. Сила тока, протекающего в сопротивлении нагрузки, при пренебрежении емкостью выходной цепи

$$I_н = \frac{U}{\sqrt{R_н^2 + X^2}}, \qquad (50)$$

где X – индуктивное сопротивление,

$$X = \omega L, \qquad (51)$$

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота переменного тока с частотой f, L – индуктивность [см. формулу (21)]

$$L = \frac{0{,}2\pi W^2 S \mu 10^{-8}}{l}, \qquad (52)$$

где W – число витков обмотки, S – площадь сечения магнитопровода, l – длина магнитопровода, μ – магнитная проницаемость магнитопровода.

а *б*

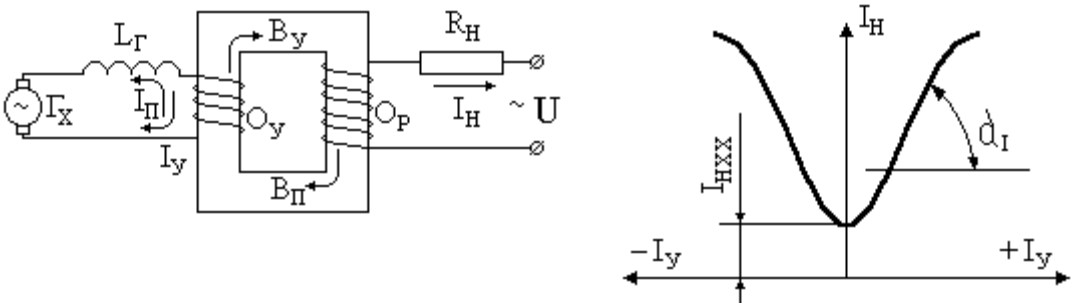


Рис. 59. Магнитный дроссель насыщения: *а* – схема подключения; *б* – характеристика

При наличии магнитного поля для ферромагнетиков магнитная проницаемость есть тангенс угла наклона α_B кривой намагничивания к оси напряженности магнитного поля (рис. 60)

$$\mu = tg\alpha_e = \frac{dB}{dH}, \qquad (53)$$

где B – магнитная индукция, H – напряженность магнитного поля. Из анализа формул (50)–(53) можно сделать вывод, что $I_H = f(H)$. Напряженность магнитного поля, в свою очередь, зависит от тока $I_У$ в обмотке $O_У$. На нелинейной кривой намагничивания можно выбрать участок с большим α_B, т. е. с большим приращением B при незначительном изменении H. Именно на этом основан усилительный эффект магнитного усилителя. Переменный ток $I_У$ управления от $Г_X$ во входной цепи наводит в сердечнике поток магнитной индукции $B_У$. Этот поток изменяет магнитную проницаемость сердечника и, следовательно, полное сопротивление выходной цепи. Это вызывает изменение тока I_H. При этом амплитуда изменения тока нагрузки может превышать амплитуду управляющего тока до десятков раз. Зависимость $I_H = f(I_У)$ – токовая характеристика усилителя – приведена на рис. 59,*б*. Из рисунка видно, что дроссель насыщения безразличен к полярности входного сигнала. Коэффициент усиления по току

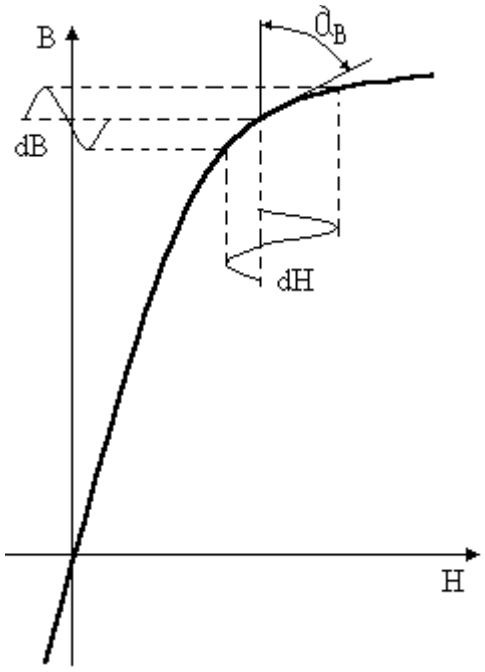


Рис. 60. Кривая намагничивания

$$K_I = tg\alpha_I = \frac{dI_н}{dI_У}. \qquad (54)$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P = \frac{UdI_н - UdI_{HXX}}{E_X dI_У} = \frac{Z_H dI_H^2 - Z_H I_{HXX}^2}{Z_X dI_У} = \frac{Z_H}{Z_X}\left[K_I^2 - \left(\frac{I_{HXX}}{dI_У}\right)^2\right], \qquad (55)$$

где E_X – напряжение входного сигнала, Z_H и Z_X – соответственно полные сопротивления выходной и входной цепей, I_{HXX} – ток нагрузки холостого хода. Как видно из формулы (55), коэффициент усиления по мощности – величина того же порядка, что и квадрат коэффициента усиления по току. Для усилителей без обратной связи $K_P = 5…80$.

К сожалению, все электромагнитные процессы обладают высокой обратимостью. Переменный ток в выходной цепи порождает паразитный поток магнитной индукции $B_П$, который наводит паразитный ток $I_П$ во входной цепи. Одним из главных функциональных требований к усилителям, рассмотренных в лекции 3, является как можно меньшее обратное воздействие на входе. Здесь это требование не выполняется – ток $I_П$ может принимать довольно большие значения. Для частичного уменьшения тока $I_П$ служит гасящая индуктивность $L_Г$. Но эта индуктивность уменьшает и ток управления, из за чего растет порог чувствительности усилителя, так как он не замечает слабых сигналов управления. Из-за этого магнитные дроссели насыщения не получили большого распространения и используются в основном для усиления дискретных сигналов.

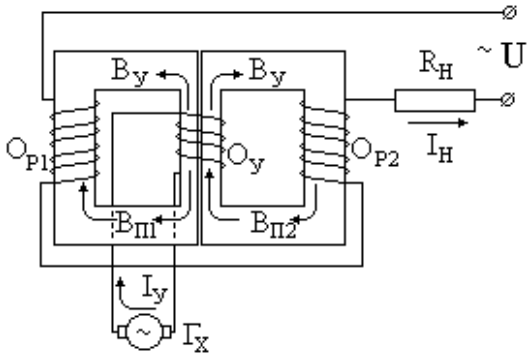


Рис. 61. Магнитный дроссельный усилитель

Гораздо более эффективным является подавление паразитной магнитоиндукции методом ее компенсации в дроссельных магнитных усилителях (двойных магнитных дросселях). Секция дроссельного магнитного усилителя представлена на рис. 61. Магнитопровод дроссельного магнитного усилителя состоит из двух независимых контуров. На центральные стержни контуров навита обмотка управления $O_У$, на крайние – рабочие обмотки O_{P1} и O_{P2}. Последние соединены так, что возбуждаемые ими магнитопотоки B_{P1} и B_{P2} в центральных стержнях магнитопровода направлены навстречу друг другу и паразитные токи в обмотке $O_У$, возникающие под их влиянием, взаимно уничтожают (компенсируют) друг друга.

Для увеличения коэффициента усиления используют подмагничивание магнитопровода с использованием *положительной обратной связи*.

Для этого на центральные стержни навивается обмотка обратной связи O_C, соединенная с выходной цепью как показано на рис. 62. На обмотку O_C, расположенную на входном участке магнитопровода, сигнал подается от выходной цепи, эта связь именуется обратной (прохождение сигнала в противоположном основному направлению). Так как полярность сигнала в основном направлении и в обратной связи одинакова, эта связь именуется положительной. Сигнал от выходной цепи, уже усиленный, подается обратно для повторного усиления. Таким образом, обмотка O_C является вторым каскадом усиления. Наличие в линии обратной связи диодного выпрямителя приводит к тому, что на управляющий участок магнитопровода подается

положительное подмагничивающее поле смещения. Это поле приводит к смещению токовой характеристики влево, в зону отрицательных токов управления (рис. 62,*б*, где пунктиром показана характеристика усилителя без обратной связи), что имеет два важных следствия. Во первых, несимметричное положение токовой характеристики говорит о том, что этот усилитель становится *поляризованным,* т. е. он по разному реагирует на входные сигналы разной полярности. Во вторых, из-за наличия поля смещения, усилитель реагирует на гораздо более слабые входные сигналы; следовательно, его коэффициент усиления возрастает. На графике это показано поворотом характеристики против часовой стрелки. Коэффициент усиления по мощности становится равным 400…500.

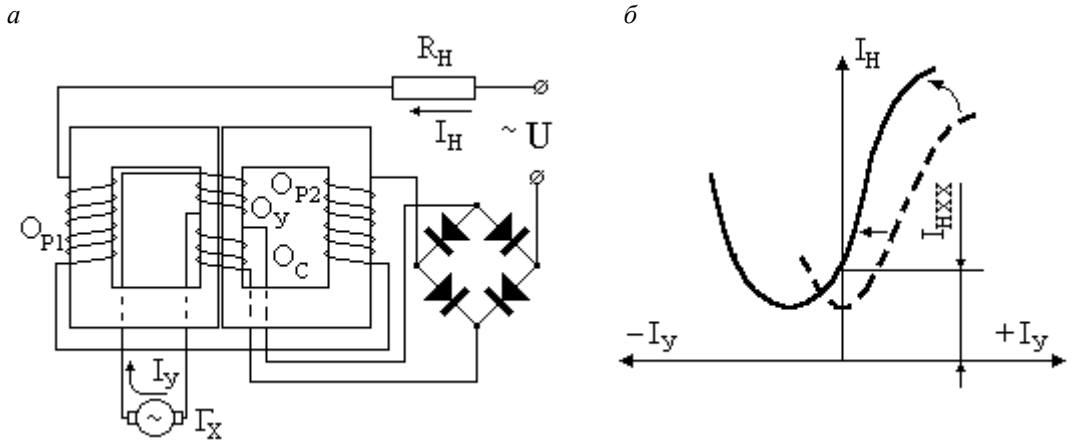


Рис. 62. Магнитный усилитель с обратной связью: *а* – схема подключения; *б* – характеристика

При определенном условии, а именно

$$aW_{OC} > aW_{OP}, \tag{56}$$

где aW_{OC} и aW_{OP} – количество витков обмоток соответственно обратной связи и рабочей, усилитель с обратной связью получает новое качество – его характеристика становится релейной.

Вид такой характеристики приведен на рис. 63. Характеристика состоит из двух линий: срабатывания А – Б – В – Г и отпускания Г – Д – Е – А.

На участке А – Б линии срабатывания токи управления в $O_У$ и O_C еще недостаточны для качественного изменения напряженности магнитного поля, и ток нагрузки возрастает, но крайне незначительно. При значении тока управления I_{CP} начинается рабочий участок Б – В линии срабатывания. Он за счет высокого коэффициента усиления настолько крут, что практически представляет собой вертикальную

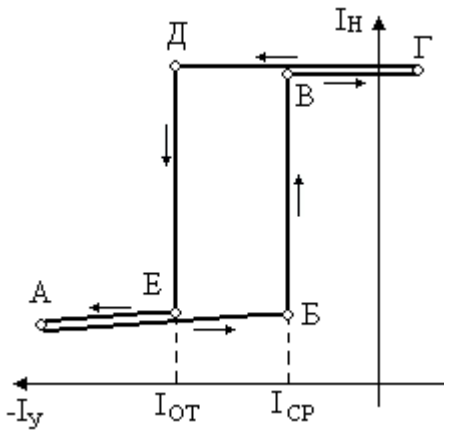


Рис. 63. Релейный режим работы магнитного усилителя

линию. В точке В наступает насыщение сердечника и далее линия срабатывания идет горизонтально. Уменьшению силы тока от точки Г до точки А соответствует линия отпускания. Как видно из графика, рабочий участок Д – Е линии отпускания сдвинут по отношению к рабочему участку Б – В линии срабатывания. Внешний вид графика на рис. 63 весьма схож с графиком магнитного гистерезиса. Это сходство не случайно. Характеристика усилителя и есть петля магнитного гистерезиса, только в других координатах – не в координатах В – Н (см. рис. 60), а в функционально связанных с ними координатах $I_У$ – $I_Н$. Линии срабатывания соответствует кривая намагничивания, линии отпускания – кривая размагничивания. Как в графике гистерезиса, так и в характеристике релейного режима работы разница между восходящей и нисходящей ветвями связана с невосполнимыми потерями энергии на перемагничивание сердечника. В лекции 3, приводились внешний вид и главная отличительная особенность релейной характеристики элемента. В частности, там отмечалось, что выходной сигнал может иметь только два (в трехпозиционных реле – триггерах – три) фиксированных значения и перевод элемента с одного значения выходного сигнала в другое происходит скачкообразно. Если пренебречь незначительным изменением $I_Н$ на интервалах А – Б и Е – А, то график на рис. 63 полностью соответствует описанию релейной характеристики. Отсюда и наименование режима – релейный. Поэтому магнитно-дроссельный усилитель применяется в качестве бесконтактного реле. Но об этом более подробно в следующей лекции.

Характерными представителями магнитных усилителей являются торроидные типа ТУМ, например ТУМА5-11. Сердечник его представляет собой тор с центральным стержнем. В сечении сердечник соответствует рис. 61. Усилитель имеет два комплекта рабочих обмоток. Это позволяет ему выдавать выходной сигнал в два адреса (свойство *размножения сигнала*). На центральном стержне намотано семь обмоток управления. Это позволяет получать сигналы управления из семи различных адресов и вырабатывать выходной сигнал от суммы входных (свойство *логического суммирования* входных сигналов). Помимо этого, на центральный стержень навита обмотка обратной связи, что позволяет усилителю работать в режимах двухкаскадного усиления и релейном.

К достоинствам магнитных усилителей следует отнести их простоту, высокую надежность, довольно высокий коэффициент усиления по мощности (до 500 в усилителях с положительной обратной связью), высокую мощность выходного сигнала (до сотен ватт). К недостаткам следует отнести большие габариты (по сравнению с электронными усилителями, это касается электромашинных, то тут сравнение в пользу магнитных) и ощутимое запаздывание выходного сигнала. Явление, именуемое *временной инерцией*, объясняется тем, что на перемагничивание сердечника необходимо затратить определенное количество энергии. Как и любой процесс перераспределения энергии, перемагничивание сердечника идет с определенной скоростью, следовательно, требует определенного времени. Временная инерция магнитных усилителей в зависимости от их мощности составляет от десятых долей секунды до нескольких

секунд у наиболее мощных. Для подъемно-транспортных, строительных и путевых машин вопросы габаритов большого значения не имеют. При значительных массах, а следовательно, и значительной инерции рабочих органов этих машин, потеря секунды-другой на передачу сигнала управления тоже не имеет принципиального значения. То есть недостатки магнитных усилителей не принципиальны для данных машин, что делает магнитный усилитель основным типом усилителей для них.

➢ Электронные усилители

Полупроводниковые усилители. Принцип действия полупроводникового триода достаточно подробно освещался в лекции 1. Поэтому сейчас мы приступим непосредственно к рассмотрению работы усилителя на его базе. Существует три схемы подключения транзистора: с общими эмиттером, базой, коллектором. Помимо этого, существует два типа транзисторов – p–n–p и n–p–n. Всего шесть возможных сочетаний схемы и типа транзистора. Рассматривать все сочетания в данном курсе нецелесообразно. Из табл. 1 лекции 1 выбираем схему соединения с общим эмиттером. При сравнительно высоких допускаемых сопротивлениях на входе и выходе (первое – до килоом, второе – до десятков килоом) и при относительно высоких мощностных показателях входной и выходной цепей, эта схема обладает наибольшим коэффициентом усиления по мощности (до тысяч и более) и наиболее соответствует условиям систем управления машин. Итак, рассмотрим в качестве примера однокаскадный полупроводниковый усилитель с общим эмиттером на базе транзистора с p–n–p-переходом (данные транзисторы обладают неплохими мощностными показателями). Схема каскада усилителя постоянного тока приведена на рис. 64. На схеме: генератор переменного тока $Г_X$ – элемент, вырабатывающий сигнал управления (в схемах управления – датчик); сопротивление $R_Н$ – элемент, потребляющий усиленный сигнал (в схемах управления чаще всего – исполнительный механизм); $R_Б$ – сопротивление базы.

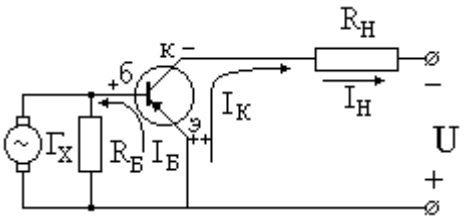


Рис. 64. Схема каскада

Припомним условие открытости транзистора с p–n–p-переходом: транзистор открыт (т. е. по цепи эмиттер – коллектор протекает коллекторный ток I_K, в сотни раз превосходящий паразитный ток базы $I_Б$ по цепи эмиттер – база) при положительном потенциале на эмиттере положительном, но меньшем на базе и отрицательному по отношению к ним обоим потенциалу на коллекторе. Рассмотрим случай отсутствия сигнала управления от $Г_X$. Эмиттер подсоединен к плюсу питания, база – так же, но через сопротивление $R_Б$ коллектор через нагрузку $R_Н$ – к минусу питания. Сопротивление $R_Б$ создает между базой и эмиттером разницу потенциалов, причем положительный потенциал на базе меньше. Условие открытости при отсутствии входного сигнала, как видим, соблюдается и по коллекторной цепи течет ток холостого хода $I_{K.XX}$. В случае, если на базу подается отрицательный потенциал управления, разница потенциалов между базой и эмиттером увеличивается, и увеличивается ток

коллектора. При положительном потенциале управления ток коллектора уменьшается.

Графически работу усилительного каскада иллюстрирует потенциально-временная диаграмма (рис. 65). Она построена на основе совмещенной характеристики транзистора (см. рис. 12, лекция 1).

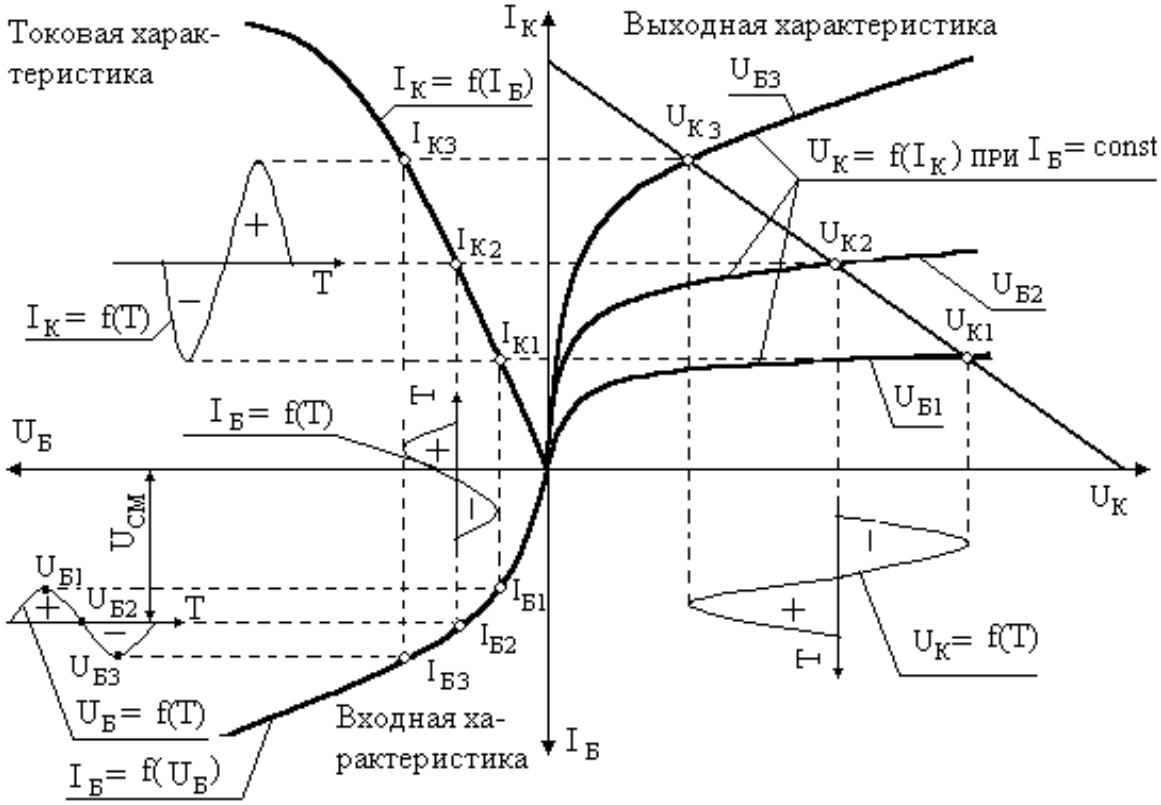


Рис. 65. Потенциально-временная диаграмма

Потенциально-временная диаграмма служит для графоаналитического определения характеристик усилительного каскада. Характеристика $U_К = f(U_Б)$ из второго квадранта графика за ненадобностью устранена и для наглядности в третьем, четвертом и первом квадрантах добавлены оси времени Т. Диаграмма читается по часовой стрелке в последовательности квадрантов 3 – 4 – 1 – 2. В третьем квадранте на оси Т изображено напряжение на базе $U_Б = U_{СМ} + U_X = f(T)$. Здесь $U_Б$ – напряжение на базе, $U_{СМ}$ – постоянная составляющая, проходящая от питания через $R_Б$, U_X – собственно входной сигнал от $Г_X$. Линиями связи его крайние $U_{Б1}$ и $U_{Б3}$ и среднее $U_{Б2}$ значения соединены с входной характеристикой $I_Б = f(U_Б)$. Значения тока базы в точках $I_{Б1}$, $I_{Б2}$ и $I_{Б3}$ соответствуют напряжениям $U_{Б1}$, $U_{Б2}$ и $U_{Б3}$. От точек пересечения $I_{Б1}$, $I_{Б2}$ и $I_{Б3}$ линии связи проведены на токовую характеристику $I_К = f(I_Б)$ в четвертый квадрант. Соответствующие точки на этой характеристике – $I_{К1}$, $I_{К2}$ и $I_{К3}$.

Коэффициент усиления по току

$$K_I = \frac{\Delta I_К}{\Delta I_Б} = \frac{I_{К3} - I_{К1}}{I_{Б3} - I_{Б1}}. \qquad (57)$$

Коэффициент усиления по мощности

$$K_P = \frac{\Delta P_H}{\Delta P_X} = \frac{(I_{K3}^2 - I_{K1}^2)R_H}{(I_{Б3}^2 - I_{Б1}^2)R_X}, \qquad (58)$$

где R_X – сопротивление входной цепи. Из формул (57) и (58) видно, что коэффициент усиления по мощности является величиной того же порядка, что квадрат коэффициента усиления по току. Для того чтобы определить коэффициент усиления по напряжению, пользуются первым квадрантом.

Туда переносятся точки I_{K1}, I_{K2} и I_{K3} (на характеристике $U_K = f(I_K)$ соответственно точки U_{K1}, U_{K2} и U_{K3}). Тогда коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{\Delta U_K}{\Delta U_Б} = \frac{U_{K3} - U_{K1}}{U_{Б3} - U_{Б1}}. \qquad (59)$$

Из диаграммы видно, что у каскада с p–n–p транзистором фазировка выходного сигнала противоположна фазировке входного. Такие усилители именуются *инверторами* (преобразующими). При совпадении фазировок входного и выходного сигналов усилители именуются *повторителями*. Такими являются, например, усилители на базе n–p–n-транзисторов. Диаграмма наглядно показывает влияние сопротивления базы на коэффициенты усиления. В самом деле, изменение $R_Б$ приводит к изменению разницы потенциалов U_{CM} между эмиттером и базой. На приведенном примере увеличение $R_Б$ приводит к опусканию линии U_{CM}. Характеристики транзистора нелинейны и это приводит к изменению пропорций между $U_Б$, $I_Б$, I_K и U_K, следовательно, и изменению коэффициентов усиления. К сожалению, такая же зависимость (только в обратном порядке) существует между сопротивлением нагрузки и коэффициентами усиления. Как мы помним, для индуктивностей, имеющих ферромагнитный сердечник, индуктивное (т. е. полное) сопротивление зависит от намагниченности сердечника, которая при подаче тока возрастает от нуля до определенной величины. Если эта индуктивность находится в выходной цепи полупроводникового усилителя, то при любом изменении выходного тока коэффициенты усиления изменяются (что приводит к еще большему изменению тока). Отсюда вывод – использование полупроводниковых усилителей при наличии в выходной их цепи ощутимых индуктивностей нецелесообразно. Далее мы рассмотрим типовые исполнительные устройства систем управления. Сейчас достаточно только отметить что все они представляют собой электромагниты, т. е. индуктивные катушки с ферромагнитным сердечником. Следовательно, *полупроводниковые усилители не применяются в качестве выходных усилителей мощности в системах управления машин.* Главные области применения полупроводниковых усилителей в системах управления машин следующие:

– предварительное усиление сигнала для последующих логических операций и сами эти операции (например, входные операционные усилители в системах

управления путевых машин типа ВПР-1200, ВПРС-500). Более подробно об этом в следующей лекции;

– предварительное усиление сигнала для малогабаритного реле. Так как реле – элемент дискретного действия, для него изменения коэффициентов усиления несущественны.

Ограниченность применения является одним из основных недостатков полупроводниковых усилителей. Вторым – является нестабильность характеристик при изменении температуры. К достоинствам полупроводниковых усилителей следует отнести малогабаритность, малую потребляемую мощность, относительно низкую стоимость и высокий коэффициент усиления. Последний легко увеличивается при повышении каскадности усилителя. На рис. 66 приведена схема двухкаскадного усилителя с общим эмиттером. Как видно из схемы, первый каскад является базовой (входной) цепью второго. Для введения дополнительного потенциала смещения второго каскада первый каскад шунтируется сопротивлением $R_{Б2}$.

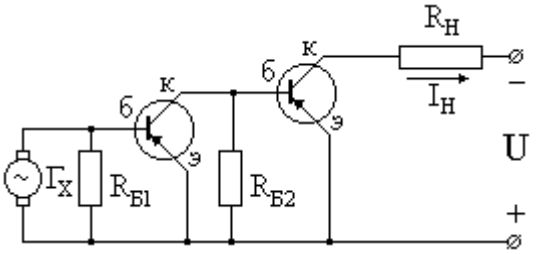


Рис. 66. Двухкаскадный полупроводниковый усилитель

Ламповый усилитель. В лекции 1, достаточно подробно уже рассматривались физические основы работы электронных ламп. Схема однокаскадного усилителя постоянного тока на базе лампового триода приведена на рис. 67,*а*, а его характеристики – на рис. 67,*б*. Приведена наиболее распространенная схема с общим катодом, аналогичная полупроводниковому усилителю с общим эмиттером (для сравнения см. схему на рис. 64). Катод аналогичен эмиттеру, сетка – базе, анод – коллектору. Цепь накала катода на схеме не показана.

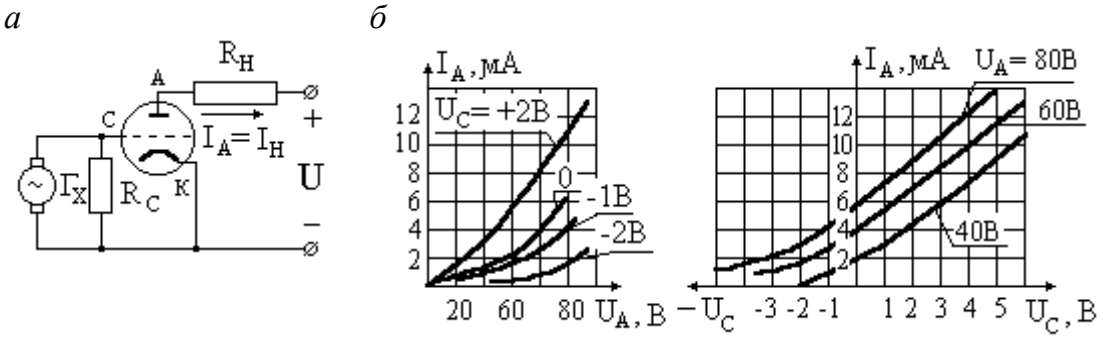


Рис. 67. Однокаскадный ламповый усилитель постоянного тока: *а* – схема; *б* – характеристики

На характеристиках: I_A – анодный (рабочий) ток; U_C- напряжение на сетке (управляющее); U_A – напряжение на аноде. Все три величины функционально связаны между собой, поэтому характеристики представляют собой семейства номограмм. На сетку подаются: постоянная составляющая, т. е. напряжение смещения от питания через сопротивление R_C и переменная составляющая от $Г_X$. Коэффициент усиления есть тангенс угла наклона характеристики $I_A = f(U_C)$ к оси U_C. При изменении R_C характеристики $I_A = f(U_C)$ смещаются (например, при

увеличении R_C – влево). При этом в одном и том же сечении за счет нелинейности характеристики меняется угол ее наклона, следовательно, коэффициент усиления. Таким образом, R_C является аналогом $R_Б$ в полупроводниковом и так же, как последнее влияет на коэффициент усиления. Переменная составляющая U_C есть сигнал, требующий усиления. Вообще между полупроводниковым и ламповым усилителем можно провести много аналогий. Аналогичен и графоаналитический метод определения параметров каскада по его характеристикам. Вместе с тем есть и отличия: аналогичный току базы ток сетки практически отсутствует и на характеристиках не отражен, характеристики лампового усилителя в рабочем диапазоне более линейны.

Ламповые усилители более габаритны, чем полупроводниковые, более дороги, требуют дополнительной энергии на нагрев катода, начинают работать только через некоторое время после включения напряжения (когда нагреется катод). Вместе с тем их характеристики более линейны и они обладают меньшей температурной нестабильностью, чем полупроводниковые. Недостатки ламповых усилителей объясняют их гораздо меньшую, чем у полупроводниковых, применимость в системах управления, а их достоинства (по отношению к полупроводниковым) объясняют то, что они все же применяются.

Из полупроводниковых усилителей известны так же усилители на базе варикапов и туннельных диодов (см. лекцию 1), из ламповых – на базе многоэлектродных ламп. Все они предназначены для особых условий работы и различных специфических назначений, как правило, не обладают высокими мощностными показателями, в системах управления машин распространения не получили и в данном курсе рассматриваться не будут. Исключение составляют обладающие высокими мощностными показателями тиристоры. Но так как характеристика приближена к релейной, то они применяются как мощные бесконтактные переключатели и будут рассматриваться далее, в лекции, посвященной исполнительным устройствам.

Электромашинные усилители. В электротехнике получили определенное распространение *двухмашинные агрегаты,* представляющие собой соосные электродвигатель и генератор. Они служат для преобразований электроэнергии – либо для преобразования переменного тока с высоким показателем трансформации, когда обычные трансформаторы не очень эффективны (например, сварочные генераторы), либо для преобразования постоянного тока в переменный (например, одноякорный преобразователь в системе энергоснабжения путевой машины ВПР-1200). Могут они служить и для усиления по мощности электрического сигнала. В этом случае они именуются *электромашинными усилителями* (ЭМУ).

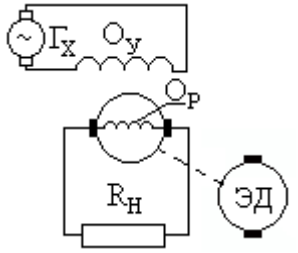


Рис. 68. Однокаскадный ЭМУ

Простейшим однокаскадным ЭМУ является обыкновенный генератор постоянного тока с независимым возбуждением, приводимый во вращение электродвигателем ЭД (рис. 68). Статорная обмотка $О_У$ является обмоткой управления, включенной во входную

цепь усилителя и получающей сигнал управления от $Г_X$. Роторная обмотка $О_Р$ является источником энергии для выходной цепи, в которую включена нагрузка $R_Н$. Приращение мощности в выходной цепи по отношению к входной берется за счет механической энергии электродвигателя. Коэффициент усиления по мощности однокаскадного ЭМУ сравнительно невысок – 50…200. Мощность управления от 1 Вт.

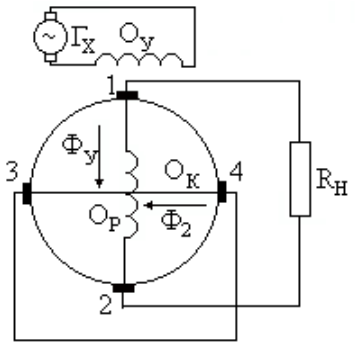


Рис. 69. Двухкаскадный ЭМУ с короткозамкнутой обмоткой

Наибольшее распространение за счет высокого коэффициента усиления по мощности получили двухкаскадные ЭМУ с поперечной короткозамкнутой обмоткой (рис. 69), иногда в литературе именуемые *амплидинами.*

Амплидин представляет собой двухполюсную электрическую машину, обмотки якоря которой расположены перпендикулярно друг другу и контактируют с двумя парами щеток – 1 – 3 и 2 – 4.

Обмотка статора $О_У$ создает управляющий магнитный поток $Ф_У$. Роторная обмотка $О_К$ расположена поперек этого потока и является короткозамкнутой. В силу того, что наибольшая эдс возникает в проводнике, расположенном поперек потока, и обмотка короткозамкнута (а что такое ток короткого замыкания представляют себе все без особых пояснений), то в обмотке $О_К$ возникает весьма большая эдс. Это первый каскад усиления. Ток обмотки $О_К$ создает в свою очередь магнитный поток $Ф_2$, наводящий в перпендикулярно расположенной роторной обмотке $О_Р$ эдс второго каскада, которая и подается от щеток 2 – 4 на нагрузку. Коэффициент усиления по мощности таких ЭМУ составляет $4 \cdot 10^2$ .....$2{,}5 \cdot 10^4$. Выходная мощность – до 100 кВт, время реакции на сигнал (инерционность) – 0,1....0,3 с. При наличии нескольких обмоток управления ЭМУ может производить алгебраическое сложение нескольких входных сигналов. ЭМУ часто применяют для управления исполнительными двигателями постоянного тока. Достоинствами ЭМУ являются высокая выходная мощность, безразличие к нагрузке управления, высокий коэффициент усиления. Недостатки – большие габариты и масса, сложность (следовательно, высокая стоимость и пониженная надежность), наличие коллектора, отсюда: износ щеток и опять снижение надежности.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем принцип действия магнитного дросселя насыщения?
2. Назовите основной недостаток магнитного дросселя насыщения.
3. Объясните принцип действия магнитного дроссельного усилителя.
4. Назовите достоинства и недостатки магнитных усилителей?
5. Расшифруйте потенциально-временную диаграмму каскада полупроводникового усилителя.
6. Назовите достоинства и недостатки полупроводниковых усилителей.

7. Почему полупроводниковый усилитель не используется как выходной в системах управления?

8. Назовите достоинства и недостатки ламповых усилителей по отношению к полупроводниковым.

9. Объясните принцип действия двухкаскадного ЭМУ.

10. Назовите достоинства и недостатки ЭМУ.

Лекция 9
Логические элементы и преобразователи

➢ Основные логические операции

Математическая логика рассматривает три основные логические операции: *умножение, сложение* и *отрицание.*

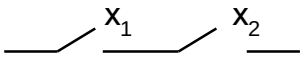
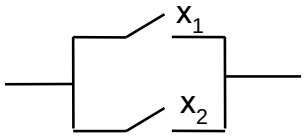
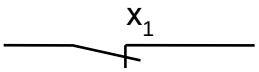
Под логическим умножением входных величин x_1 и x_2 (логическая связка И) понимается выражение

$$y = x_1 x_2 \tag{61}$$

Если за x_1 и x_2 принять участки цепи, имеющие два состояния, например, нормально разомкнутые контакты, то выражению (61) будет соответствовать последовательное соединение их в соответствии с табл. 2. Приняв разомкнутое состояние контакта за 1, а замкнутое – за 0, можно составить таблицу состояний (см. табл. 2).

Таблица 2

Состояние величин при основных логических операциях

Логическая операция	Логическая связка	Реализация в виде контактов	Значение величин		
			x_1	x_2	y
Умножение	ДА		0	0	0
			1	0	0
			0	1	0
			1	1	1
Сложение	ИЛИ		0	0	0
			1	0	1
			0	1	1
			1	1	1*
Отрицание	НЕТ		1	–	0
			0	–	1

* – 1+1 – здесь не число, а символ числа

Анализируя таблицу, видим, что взаимосвязь между приведенными величинами полностью соответствует правилам алгебраического умножения: 0×0=0; 1×0=0; 0×1=0; 1×1=1.

Под логическим сложением входных величин x_1 и x_2 (логическая связка ИЛИ) понимается выражение

$$y = x_1 + x_2 . \tag{62}$$

Этому выражению соответствует отображение в виде параллельных нормально разомкнутых контактов. Таблица состояний величин соответствует правилам алгебраического сложения с учетом примечания к табл. 2.

Под логическим отрицанием входной величины x_1 (логическая связка НЕТ) понимается выражение

$$y = \overline{x}_1, \tag{63}$$

где черточка означает отрицание. Отображение логического отрицания – в виде нормально замкнутого контакта.

➢ **Математические свойства логических операций**

Эти свойства почти полностью сходны с обычными математическими преобразованиями, особенно если рассматривать операции внутри одного разряда в двоичной алгебре.

1. Закон перемещения

$$\begin{aligned} &x_1 x_2 = x_2 x_1; \\ &x_1 + x_2 = x_2 + x_1. \end{aligned} \tag{64}$$

2. Закон сочетания

$$\begin{aligned} &x_1(x_2 x_3) = (x_1 x_2) x_3; \\ &x_1 + (x_2 + x_3) = (x_1 + x_2) + x_3. \end{aligned} \tag{65}$$

3. Закон распределения

$$\begin{aligned} &x_1 x_2 + x_1 x_3 = x_1(x_2 + x_3); \\ &x_1(x_2 + x_3) = x_1 x_2 + x_1 x_3. \end{aligned} \tag{66}$$

4. Закон повторения

$$\begin{aligned} &x_1 x_1 x_1 = x_1; \\ &x_1 + x_1 + x_1 = x_1. \end{aligned} \tag{67}$$

5. Закон нулевого множества

$$\begin{aligned} &x_1 \cdot 0 = 0; \\ &x_1 + 0 = x_1. \end{aligned} \tag{68}$$

6. Закон универсального множества

$$\begin{aligned} &x_1 \cdot 1 = x_1; \\ &x_1 + 1 = 1. \end{aligned} \tag{69}$$

7. Закон дополнительности

$$\begin{aligned} &x_1 \overline{x_1} = 0; \\ &x_1 + \overline{x_1} = 1. \end{aligned} \tag{70}$$

8. Закон двойной инверсии

$$\overline{\overline{x}} = x^{*}. \tag{71}$$

---

* – двойная черта означает двойное отрицание

9. Закон инверсии

10.

$$\overline{x_1 x_2} = \overline{x_1} + \overline{x_2}$$
$$\overline{x_1 + x_2} = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2}$$

10. Закон поглощения

$$x_1(x_1 + x_2) = x_1;$$
$$x_1 + x_1 x_2 + \ldots\ldots + x_1 x_n = x_1. \qquad (73)$$

11. Закон склеивания

$$x_1 x_2 + x_1 \overline{x_2} = x_1;$$
$$(x_1 + x_2)(x_1 + \overline{x_2}) = x_1. \qquad (74)$$

➢ **Логические функции**

Под логической функцией понимается выражение вида

$$y = f(x_1; x_2; x_3; \ldots x_n). \qquad (75)$$

Используя основные математические свойства логических операций, можно получить основные логические функции, которые выражают основные закономерности логических высказываний, а именно:

– запрет $y = x_1 \overline{x_2}$ (76)

– несовместимость $y = y_1 \overline{x_2} + \overline{x_1} x_2$ (77)

– память $y = (x_1 + y)\overline{x_2}$ (78)

– «стрелка Пирса» $y = \overline{x_1 + x_2}$ (79)

– «штрих Шеффера» $y = \overline{x_1 x_2}$ (80)

Достаточно важной и весьма распространенной является логическая функция «память» (выражение (78), где x_1 – сигнал записи информации, x_2 – сигнал стирания информации, y – состояние памяти). На рис. 81 приведено характерное воплощение этой функции в виде схемы управления реле Y толчковыми кнопками X_1 (пусковая) и X_2 (стоп) с постановкой реле на самоблокировку через собственный контакт Y, шунтирующий X_1.

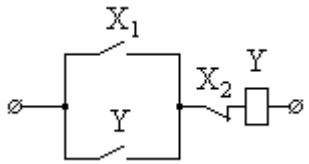


Рис. 81. Реализация функции памяти

Самыми важными являются последние две функции «стрелка Пирса» и «штрих Шеффера», потому что с их помощью можно записать любое логическое высказывание.

Ниже, на рис. 82–84, представлено аппаратное обеспечение логических операций табл. 2 в виде электромагнитных реле и бесконтактных схем на основе диодов и транзисторов.

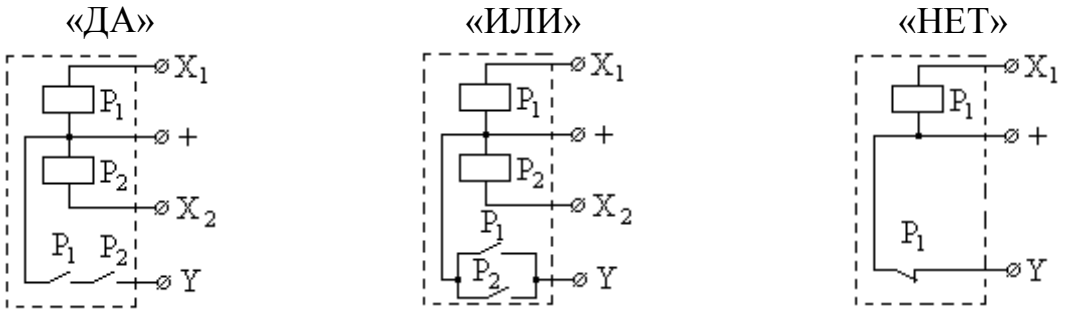


Рис. 82. Реализация логических операций на реле

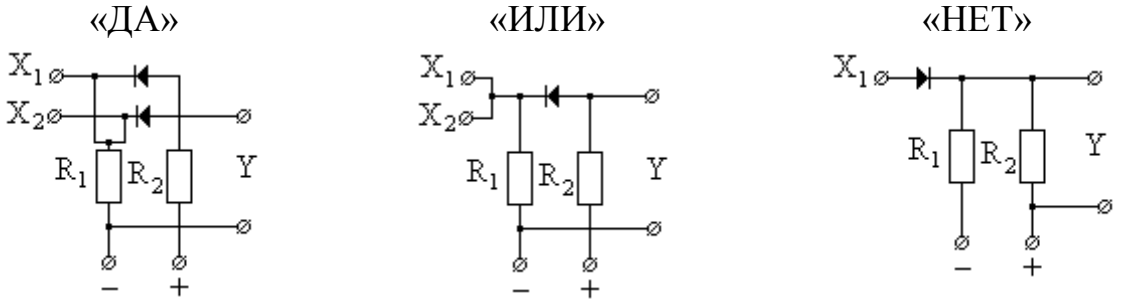


Рис. 83. Реализация логических операций на диодах

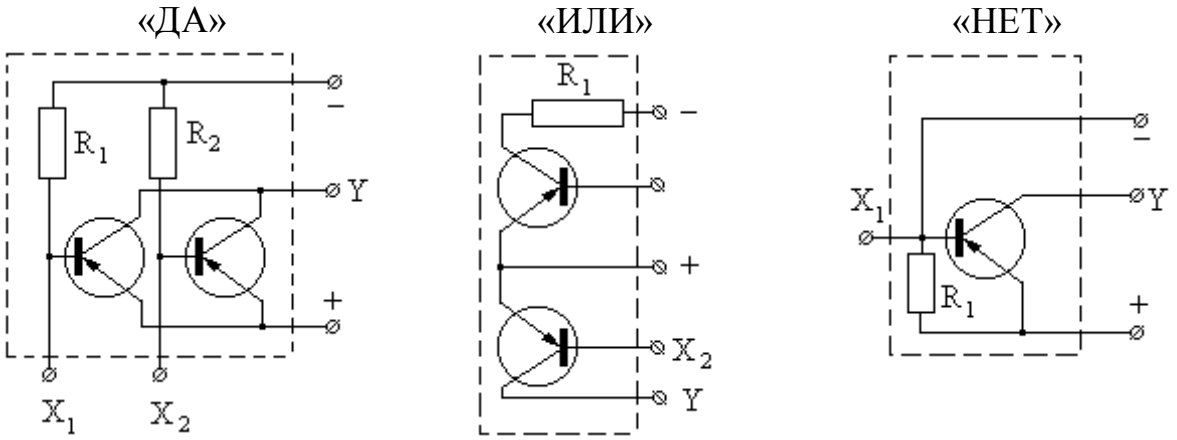


Рис. 84. Реализация логических операций на триодах

Логический элемент «ДА» именуется так же *конъюктором*, логический элемент «ИЛИ» – *дизъюнктором*, а элемент «НЕТ» – *инвертором.* Два параллельных инвертора дают более сложный логический элемент – «ИЛИ – НЕТ», реализующий логическую функцию отрицания сложения $y = \overline{x_1 + x_2}$ – «стрелку Пирса». Выше уже отмечалось, что она является одной из двух базовых функций. При ее помощи можно выразить все остальные логические функции. Логический элемент «ИЛИ – НЕТ» на германиевых диодах (элемент И-108) является основой функционального комплекта логических элементов

«Логика – И». При помощи логических операций и функций, реализованных в логических элементах, удается формализовать процесс синтезирования схем релейного управления. Подробнее об этом в курсе «Управление техническими системами».

➢ Аппаратное обеспечение алгебраических операций при помощи функциональных преобразователей

Функциональные преобразователи широко распространенны в системах управления. Они выполняют отдельные операции умножения, дифференцирования, интегрирования, связанные с суммированием сигналов с учетом знака. Кроме того, существуют так называемые *операционные усилители,* которые могут использоваться как универсальные функциональные преобразователи.

➢ Сумматоры

Для суммирования сигналов одной физической природы и выполнения роли элементов сравнения применяются *сумматоры*. Они выполняют роль элементов сравнения. Примеры сумматоров на базе потенциометров приведены на рис. 85.

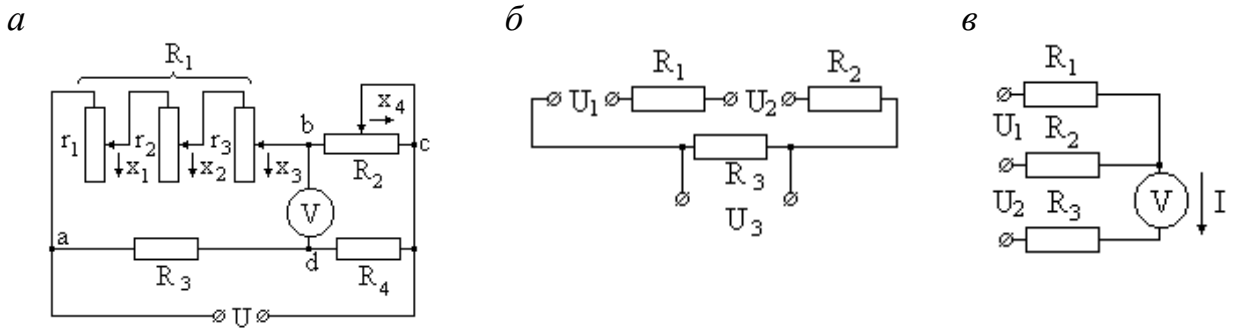


Рис. 85. Сумматоры: *а* – механических перемещений; *б* – последовательных напряжений; *в* – параллельных

Схема на рис. 85,*а* предназначена для электрического суммирования механических перемещений. Схема представляет собой мост сопротивлений. Слагаемыми являются перемещения x_1, x_2 и x_3 ламелей (подвижных контактов) потенциометров r_1, r_2 и r_3, суммой – перемещение x_4 ламеля потенциометра r_2. Потенциометры r_1, r_2 и r_3 в сумме составляют сопротивление R_1, включенное в плечо a – b моста. Потенциометр R_2 включен в симметричное плечо b – c . В остальные плечи включены постоянные сопротивления R_3 и R_4. Диагональ a – c является диагональю питания, диагональ b – d – измерительной. Сопротивления потенциометров линейно пропорциональны перемещению их ламелей. При балансе моста

$$R_2 = \frac{R_1 R_4}{R_3} = \frac{R_4}{R_3}(r_1 + r_2 + r_3). \qquad (81)$$

Состояние $x_4 = x_1 + x_2 + x_3$ регистрируется нулевым состоянием вольтметра.

На схеме (рис. 85,*б*) производится суммирование последовательно включенных напряжений $U_3 = U_1 + U_2$. На рис. 85,*в* – то же суммирование напряжений, только параллельно включенных и результат суммирования представлен в виде силы тока *I*. Перечисленные схемы производят алгебраическое суммирование, т. е. учитывают полярность напряжений или направление перемещения ламеля.

➢ **Множительно-делительные устройства**

Эти устройства могут выполняться на различных элементах, в том числе и на потенциометрах. На рис. 86 приведена мостовая схема множительно-делительного устройства. Сопротивления плеч моста линейны и равны:

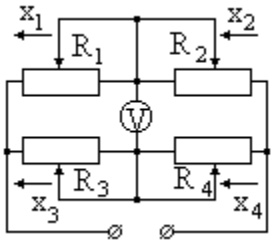


Рис. 86. Множительное устройство

$$R_1 = k_1 x_1;$$
$$R_2 = k_2 x_2;$$
$$R_3 = k_3 x_3;$$
$$R_4 = k_4 x_4; \qquad (82)$$

где x_1, x_2, x_3 и x_4 – перемещения ламелей соответствующих потенциометров, k_1, k_2, k_3 и k_4 – коэффициенты пропорциональности. Из условия равновесия мостовой схемы

$$k_2 = \frac{k_1 k_4}{k_2 k_3} \frac{x_1 x_4}{x_3} = k \frac{x_1 x_4}{x_3}, \qquad (83)$$

где $k = \dfrac{k_1 k_4}{k_2 k_3}$ – общий коэффициент пропорциональности моста.

Зависимость (83) показывает, что рассмотренная схема выполняет одно умножение и одно деление над тремя величинами – x_1, x_3 и x_4 (x_2 – результат). При равенстве перемещений x_2 и x_3 можно выполнять операцию извлечения квадратного корня.

Примем

$$x_2 x_3 = X^2 = k x_1 x_4, \qquad (84)$$

отсюда

$$X = \sqrt{k x_1 x_4}\,. \qquad (85)$$

При равенстве перемещений x_1 и x_4 и постоянстве сопротивления R_3 можно производить возведение в квадрат

$$x_2 = \frac{k_1 k_4}{k_2 k_3} \frac{x_1 x_4}{x_3} = \frac{k_1 k_4}{k_2 R_3} x_1^2\,. \qquad (86)$$

Множительно-делительные свойства моста могут использоваться и для выполнения других алгебраических операций.

➢ **Дифференцирующие устройства**

В них выходная величина есть производная от входной, т. е. является скоростью изменения входной величины. Известны электромеханические и электронные дифференцирующие устройства. Электромеханические построены на базе тахогенераторов – генераторных датчиков скорости, выходное напряжение у которых пропорционально частоте вращения вала. Схема дифференцирующего устройства на базе тахогенератора постоянного тока приведена на рис. 87,*а*. Тахогенератор $T_г$ возбуждается статорной обмоткой $О_в$. При вращении в роторной обмотке наводится эдс

$$E = k_{T_г}\omega = k_{T_г}\frac{d\varphi}{dt}, \qquad (87)$$

где $k_{T_г}$ – коэффициент передачи; ω – угловая скорость ротора; φ – угол поворота ротора. Дифференцируемой величиной здесь является φ, производной – E. Для удобства необходимо, чтобы дифференцируемая величина и производная обладали одной физической природой. Для этого используется компенсационная схема подключения.

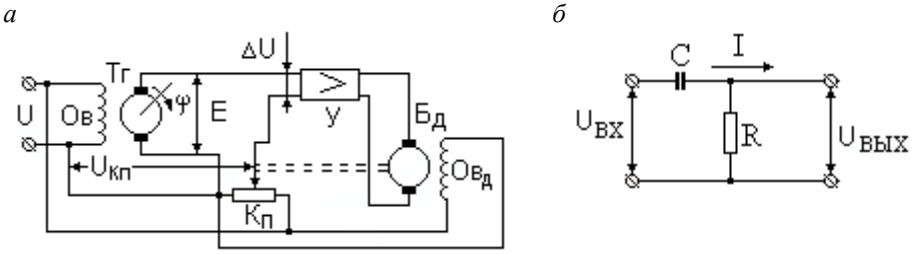


Рис. 87. Дифференцирующие устройства: *а* – электромеханическое; *б* – электронное

Напряжение с выхода потенциометра $K_п$ $U_{кп}$ направлено встречно эдс тахогенератора E и на вход усилителя $У$ подается разница $\Delta U = E - U_{Kп}$. Выходной сигнал усилителя подается на ротор балансного серводвигателя $Б_д$. Вал последнего механически связан с ламелью потенциометра и перемещает ее до наступления балансного состояния $\Delta U = 0$ или $E = U_{Kп}$. При этом угол поворота ротора двигателя α будет пропорционален частоте вращения тахогенератора, следовательно, будет являться производной от угла поворота его ротора φ по времени.

В электронном дифференцирующем устройстве (рис. 87,*б*) в качестве дифференцирующего элемента используется емкость C. Ток I, проходя по относительно большому сопротивлению R, создает падение напряжения $U_{вых} = IR$. Но значение тока может быть определено через напряжение $U_{вх}$ без учета R, как

$$I = C\frac{dU_{вх}}{dt} \qquad (88)$$

Поэтому

$$U_{вых} = RC\frac{dU_{вх}}{dt}, \qquad (89)$$

т. е. выходное напряжение есть производная от входного. Но при учете R в формуле (88) напряжение на пластинах конденсатора будет равно не $U_{вх}$, а разнице $U_{вх} - U_{вых}$. В этом случае уравнение дифференцирующей цепи будет иметь вид

$$\frac{dU_{вых}}{dt} + \frac{1}{RC}U_{вых} = \frac{dU_{вх}}{dt}. \qquad (90)$$

Решение уравнения (90) при нулевых начальных условиях

$$U_{вых} = RC\frac{dU_{вх}}{dt}(1 - e^{-t/RC}). \qquad (91)$$

Из формул (90) и (91) видно, что дифференцирование в электронном устройстве производится приблизительно. Точность дифференцирования тем выше, чем меньше постоянная дифференцирования RC.

➢ **Интегрирующие устройства**

Могут быть электромеханическими и электронными, в них выходная величина равна интегралу от входной.

Электромеханические интеграторы могут создаваться на базе тахогенераторов (рис. 88,*а*). Интегрирование производится по времени. Функция интегрирования Y задана профилем функционального потенциометра Фп. У этого потенциометра сердечник выполнен с переменным сечением так, что длина витков – перемена и по длине сердечника подчиняется функции Y. Напряжение $U_{фп}$, снимаемое с потенциометра, также подчиняется закону изменения Y.

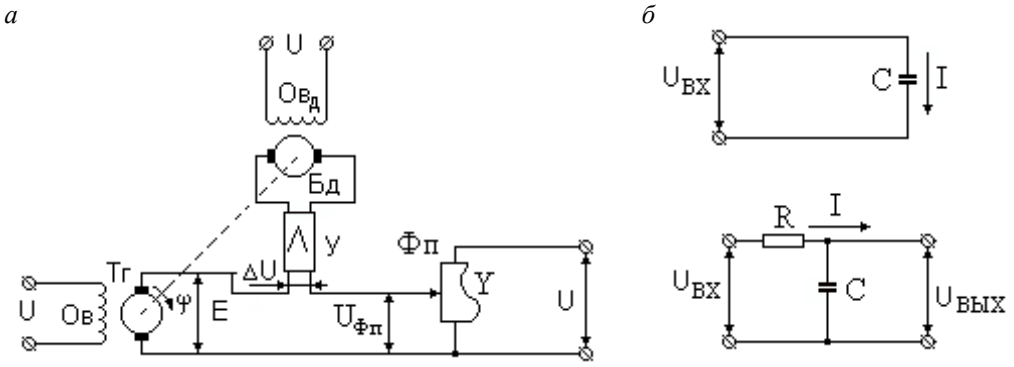


Рис. 88. Интегрирующие устройства: *а* – электромеханическое; *б* – электронные

При перемещении ламеля с постоянной скоростью v его перемещение за время t будет vt. Напряжение в этом случае

$$U_{Фп} = kUvt = kUY, \tag{92}$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Тахогенератор механически связан с балансным серводвигателем $Б_д$. В статическом режиме эдс тахогенератора равна напряжению $U_{фп}$ или

$$k_{T_г} U \frac{d\varphi}{dt} = kUY, \tag{93}$$

где φ – угол поворота тахогенератора. Из формулы (93)

$$\varphi - \varphi_0 = \frac{k}{k_{T_г}} \int_0^t Ydt, \tag{94}$$

где φ_0 – начальный угол поворота ротора тахогенератора.

Электронные интегрирующие устройства могут быть построены на базе емкости (рис. 88,*б*). Известно, что заряд на пластинах конденсатора

$$q = CU, \tag{95}$$

где C – емкость конденсатора, U – напряжение на его пластинах. Заряд q можно определить по выражению

$$q = \int_0^t Idt. \tag{96}$$

Из формул (95) и (96) получаем

$$U = \frac{1}{C} \int_0^t Idt, \tag{97}$$

т. е. напряжение на конденсаторе пропорционально интегралу от тока. При определении выходного напряжения $U_{вых}$ так же, как и в случае емкостного дифференцирующего устройства, активное сопротивление R оказывает отрицательное влияние на точность интегрирования. Окончательно

$$U_{вых} = \frac{1}{C} \int_0^t Idt = \frac{1}{RC} \int_0^t U_{вх} dt - \frac{1}{RC} \int_0^t U_{вых} dt. \tag{98}$$

Первое слагаемое представляет собой искомый интеграл, второе – ошибку интегрирующей *RC*-цепи.

➢ **Операционные усилители**

Эти усилители широко распространенны в системах автоматического управления. На их основе можно реализовывать функциональные и вычислительные устройства, способные с достаточной точностью выполнять необходимые математические операции. Операция суммирования выполняется на усилителе, структура которого представлена на рис. 89,*а*. В этом и последующих усилителях в качестве собственно усиливающего элемента

используются как правило одно- двухкаскадные полупроводниковые усилители на базе транзисторов с p–n–p-переходом. Выходное напряжение усилителя

$$U_{вых} = kU_a,$$

где k – коэффициент усиления усилителя.

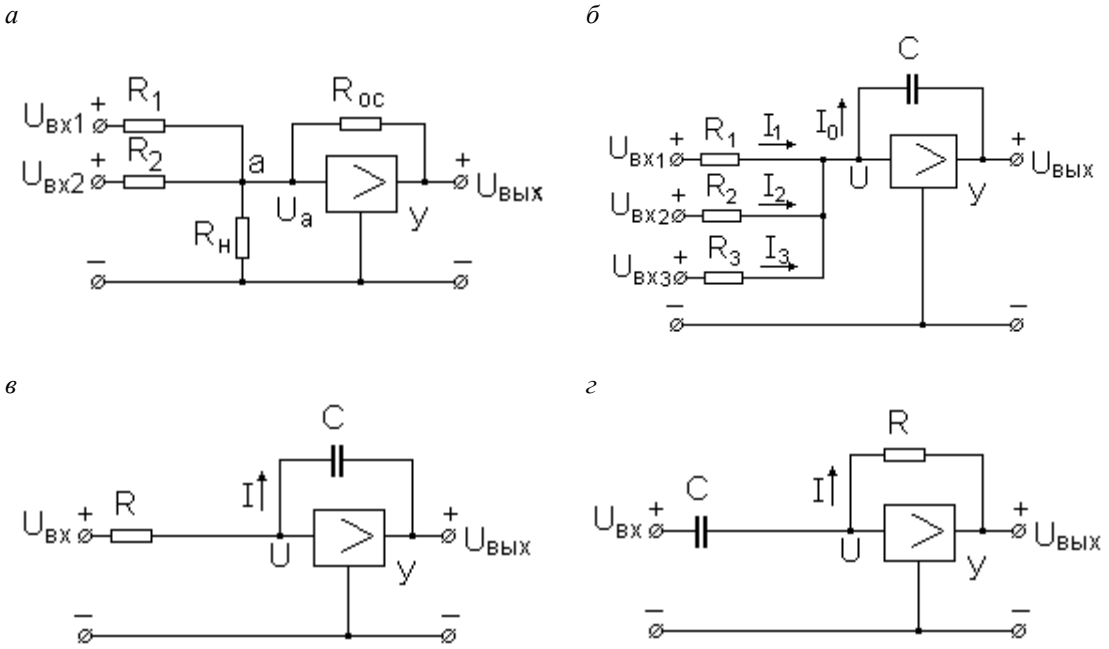


Рис. 89. Схемы операционных усилителей: *а, б, в* – суммирующих; *г* – дифференцирующего

Так как

$$U_a = k_1U_{вх1} + k_2U_{вх2}\ , \qquad (99)$$

то

$$U_{вых} = k(k_1U_{вх1} + k_2U_{вх2}). \qquad (100)$$

Для работы усилителя с наименьшими погрешностями надо, чтобы коэффициент усиления k был постоянным. Для стабилизации значения k в операционных усилителях применяют отрицательную обратную связь.

На рис. 89,*а* обратная связь осуществляется через резистор $R_{ос}$. Через этот резистор к суммирующей точке а подводится напряжение $U_{вых}$, которое можно рассматривать как дополнительное (третье) входное напряжение схемы. Следовательно,

$$U_a = k_1U_{вх1} + k_2U_{вх2} + k_0U_{вых}. \qquad (101)$$

Ввиду того, что усилитель изменяет знак входного напряжения на обратный, соотношение между входным и выходным напряжением имеет вид $U_{вых} = -kU_a$. Отсюда

$$U_a = -\frac{1}{k}U_{вых}. \qquad (102)$$

Подставим полученное значение напряжения U_a и определим из него $U_{вых}$

$$U_{вых} = -\frac{1}{k_0 + \frac{1}{k_0}}(k_1 U_{вх1} + k_2 U_{вх2}). \qquad (103)$$

Если коэффициент усиления k достаточно большой, то соотношение $1/k$ будет много меньше значения k_0. Поэтому отношением $1/k$ можно пренебречь. Следовательно,

$$U_{вых} = -(\frac{k_1}{k_0} U_{вх1} + \frac{k_2}{k_0} U_{вх2}). \qquad (104)$$

Для коэффициентов k_1, k_2 , k_0 имеют место соотношения:

$$\begin{aligned} k_1 / k_0 &= R_{ос} / R_1; \\ k_2 / k_0 &= R_{ос} / R_2. \end{aligned} \qquad (105)$$

Тогда выражение для входного напряжения можно представить:

$$U_{вых} = -(\frac{R_{ос}}{R_1} U_{вх1} + \frac{R_{ос}}{R_2} U_{вх2}). \qquad (106)$$

Операционный усилитель (см. рис. 89,*а*) производит суммирование входных переменных, умножает каждое слагаемое на постоянный коэффициент, меняет знак суммы на обратный.

Операцию интегрирования входной величины производит операционный усилитель, представленный на рис. 89,*б*. Интегрирующий конденсатор C включен в цепь отрицательной обратной связи. Если ток на входе усилителя равен нулю, то ток I, проходящий через резистор R, будет равен току, проходящему через резистор C. Ток I на резисторе R будет

$$I = \frac{U_{вх} - U}{R}. \qquad (107)$$

Ток, проходящий через конденсатор C,

$$I = C\frac{d(U - U_{вых})}{dt}. \qquad (108)$$

Приравнивая эти выражения

$$C\frac{d(U - U_{вых})}{dt} = \frac{U_{вх} - U}{R} \qquad (109)$$

и учитывая, что выходное напряжение усилителя $U_{вых} = -kU$, получим

$$U = -\frac{1}{k} U_{вых} \tag{110}$$

Подставив формулу (110) в (109) и произведя необходимые преобразования, получим дифференциальное уравнение интегрирующего усилителя

$$\frac{dU_{вых}}{dt} + \frac{1}{RC(k+1)} U_{вых} = -\frac{k}{RC(k+1)} U_{вх}. \tag{111}$$

Проинтегрируем это уравнение

$$U_{вых} = -\frac{k}{k+1}\frac{1}{RC}\int_0^t U_{вх} dt - \frac{1}{RC(k+1)}\int_0^t U_{вых} dt. \tag{112}$$

Первый член выражения (112) представляет собой искомый интеграл, второй – ошибку интегрирования. При достаточно большом k (у усилительных элементов операционных усилителей этот коэффициент достаточно велик) можно считать, что $\frac{k}{k+1} \approx 1$, а $\frac{1}{(k+1)} \approx 0$. Поэтому последним интегралом, как правило, пренебрегают и операция интегрирования окончательно выглядит

$$U_{вых} = -\frac{1}{RC}\int_0^t U_{вх} dt. \tag{113}$$

Интегрирующий усилитель производит интегрирование входной величины по времени, умножает результат интегрирования на постоянный коэффициент и меняет знак результата по отношению к входному сигналу.

На интегрирующем усилителе можно выполнять и суммирование нескольких входных величин (см. рис. 89,*в*). Операции интегрирования и суммирования входных величин $U_{вх1}$, $U_{вх2}$ и $U_{вх3}$ могут быть записаны с учетом ранее полученных зависимостей как

$$U_{вых} = -\int_0^t \left(\frac{1}{R_1 C} U_{вх_1} + \frac{1}{R_2 C} U_{вх_2} + \frac{1}{R_3 C} U_{вх_3} \right) dt. \tag{114}$$

Каждое из слагаемых умножается на свой коэффициент, соответственно $\frac{1}{R_1 C}$, $\frac{1}{R_2 C}$ и $\frac{1}{R_3 C}$.

Операционный усилитель будет выполнять функцию дифференцирования, если емкость включить непосредственно во входную цепь усилителя (рис. 89, *г*). В этом случае выражение (111) для $U_{вых}$ примет вид

$$U_{вых} = -RC\frac{k}{k+1}\frac{dU_{вх}}{dt} - RC\frac{1}{k+1}\frac{dU_{вых}}{dt}. \tag{115}$$

Как уже отмечалось в комментариях к формуле (112), $\frac{k}{k+1} \approx 1$, а $\frac{1}{(k+1)} \approx 0$, поэтому вторым членом правой части выражения (115) – ошибкой дифференцирования, как правило, пренебрегают, и операция дифференцирования окончательно выглядит

$$U_{вых} = -RC\frac{dU_{вх}}{dt}. \qquad (116)$$

Дифференцирующий операционный усилитель производит дифференцирование входной величины по времени, умножает результат на постоянный коэффициент и меняет знак производной по отношению к входному сигналу.

Операционные усилители в силу своей универсальности, малогабаритности и сравнительно высокой точности получили большое распространение в системах управления строительных и дорожных машин. В частности, они используются как входные преобразователи сигналов в подсистемах управления путевых машин типа ВПРС-500, ВПР-02 и подобных.

➢ Аналоговый и цифровой способы отображения и передачи информации

В системах управления используются аналоговый и цифровой способы отображения и передачи информации.

При *аналоговом способе* величине значения входного сигнала соответствует уровень энергии информационного энергопотока. Например, контролируемый объект переместился на 327 мм. С ним связан датчик перемещения потенциометрического типа. Расстояние между витками – 1 мм. Следовательно, ламель потенциометра переместился на n = 327 витков. Сопротивление витка R_B = 0,5 Ом. Легко определить, что изменение сопротивления потенциометра будет $\Delta R = R_B n = 0{,}5 \cdot 327 = 163{,}5$ (Ом). Примем, что датчик подсоединен к входу усилителя по наиболее простой схеме последовательного подключения. Изменение силы тока для последовательного соединения, согласно закону Ома

$$\Delta I = \frac{U}{\sqrt{\Delta R^2 + R_У^2}}, \qquad (117)$$

где $R_У$ – сопротивление входной цепи усилителя. Приняв последнее для простоты крайне незначительным и напряжение питания U = 24 В, получим изменение силы тока

$$\Delta I = \frac{U}{\Delta R} = \frac{24}{163{,}5} = 0{,}147 \text{ А}.$$

Итак, перемещению объекта на 327 мм соответствует изменение информационного энергопотока на входе в усилитель на 0,147 А. Аналоговая

передача информации наиболее логична по своей сути и традиционна для систем управления. Но с сигналом по пути следования происходят и нежелательные изменения. Провода имеют свое сопротивление, подвергаются воздействию наведенных магнитных полей, происходит утечка тока через изоляцию и так далее. Все это приводит к появлению *погрешности передачи информации* тем большей, чем меньше уровень энергопотока и чем длиннее путь сигнала.

При *цифровом способе отображения и передачи информации* уровню сигнала соответствует последовательность импульсов, представляющая собой запись исходной информации в цифровом двоичном коде. Желательно вспомнить принципы двоичной алгебры: каждый разряд двоичного числа может принимать только два значения – 0 и 1, что очень удобно для аппаратной реализации, нулю соответствует отсутствие импульса, а единице – наличие. То же самое число 327 в двоичной форме примет вид

$$327 = 256 + 64 + 4 + 1 = 1 \cdot 2^8 + 0 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 0 \cdot 2^5 +$$
$$+ 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 101000101.$$

Следовательно, при цифровом способе отображения входной информации «перемещение объекта равно 327 мм» соответствует последовательность импульсов 1-0-1-0-0-0-1-0-1. Каждый из разрядов приведенного двоичного числа представляет собой элементарную единицу информации – *бит*. Для цифровой передачи информации важное значение имеет длина отдельного числа, т. е. число его разрядов в двоичном исчислении. При передаче и хранении информации в цифровой системе управления длина чисел должна быть строго одинаковой – иначе система не сможет определить границу между двумя сигналами или записями. Длина отдельного числа именуется разрядностью системы и является ее важнейшим информационным показателем. Единица информации, равная числу с принятой в данной системе разрядностью, именуется *байтом*. Так, в приведенном примере разрядность числа равна 9 и соответственно байт в данной системе содержит 9 разрядов или 9 бит информации. Отсюда видна разница между битом и байтом: бит может принимать только два значения – 0 и 1, а байт – (2^n – 1) значений (в приведенном примере – 2^9 – 1 = 511 значений, следовательно, используя 9 разрядов, можно передать информацию о перемещении объекта в диапазоне 0–511 мм с точностью 1 мм). Цифровой способ не подвержен погрешностям передачи информации, так как величину импульса можно изначально принять достаточно высокой, чтобы пренебречь этими погрешностями. Цифровая информация очень удобна в хранении – «запомнить» ее могут устройства, обладающие двумя устойчивыми состояниями. Вместе с тем цифровая форма связана с изначальной погрешностью записи. Длина байта изначально задает соотношение между диапазоном и точностью измерения. Разумеется, точность можно повысить, но это связано с увеличением разрядности. Преимущества цифрового способа отображения информации более всего ощутимы в системах

со значительной длиной каналов связи, в системах с большим объемом хранения информации и, наконец, цифровой способ отображения информации является основой микропроцессорных систем управления, получающих в силу своей универсальности, больших потенциальных возможностей и относительно невысокой стоимости все большее распространение в системах управления машин. Так или иначе, в современных системах управления все чаще встречается сочетание приборов аналогового и цифрового отображения информации, следовательно, встает вопрос об аналого-цифровых преобразователях.

➢ **Аналогово-цифровые преобразователи**

Рассмотрим принцип действия преобразователя, работающего методом поразрядного кодирования информации. Он служит для преобразования входного напряжения в последовательность импульсов, соответствующую записи величины этого напряжения в двоичном виде. Принцип действия преобразователя основан на сравнении входного напряжения U_x с суммой эталонных напряжений $\sum U_э$, вырабатываемых внутри преобразователя. Сравнение происходит до тех пор, пока сумма эталонных напряжений не будет равна с заданной точностью входному напряжению. Применяются различные разомкнутые и замкнутые схемы преобразователей. Принцип действия преобразователя рассмотрим на примере наиболее простой многоэталонной разомкнутой схемы на базе реле, приведенной на рис. 90.

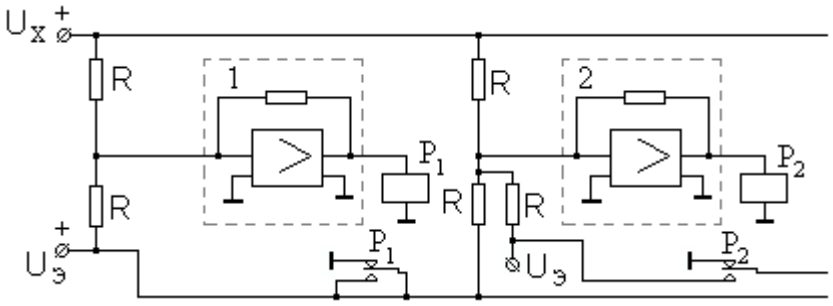


Рис. 90. Схема многоэталонного цифрового преобразователя напряжения

Схема состоит из последовательно соединенных разрядных блоков, число которых равно числу бит в байте информации, принятом в данной системе (на рисунке приведены два блока). На входе усилителя *1* неизвестное напряжение U_x сравнивается с эталонным $U_э = \frac{1}{2} U_{x_{max}} = \Delta U \cdot 2^{n-1}$ – для двоичной системы счисления, где ΔU – минимальное эталонное напряжение, соответствующее разрешающей способности преобразователя.

Если $U_x < U_э$, то полученная разность отрицательна и в старшем разряде кода устанавливается ноль. При этом реле P_1 не срабатывает и на входе усилителя 2 будет производиться сравнение U_x и $\frac{1}{2} U_э$. При $U_x > U_э$ реле P_1 сработает, в результате чего $U_э$ в качестве слагаемого поступает на все последующие каскады

сравнения. При этом на втором усилителе U_x сравнивается с $U_э + \frac{1}{2}U_э$, и в старшем разряде кода устанавливается единица при помощи дополнительных контактов реле P_1 и так далее. Процесс сравнения напряжений производится до получения положительной разности. При этом в соответствующем разряде ставится единица.

Для i-го каскада сравнения

$$U_i = U_{i-1} - U_{эi} K_i, \tag{118}$$

где U_{i-1} – напряжение, полученное на предыдущем каскаде; $U_{эi} = \frac{U_{x_{max}}}{2^i} = 2^{n-1}\Delta U$ – эталонное напряжение каскада; K_i – значение i-го разряда выходного кода, $K_i = \left| \begin{matrix} 0 \text{ при } U_{i-1} < U_{эi} \\ 1 \text{ при } U_{i-1} > U_{эi} \end{matrix} \right.$.

Многоэталонные преобразователи в настоящее время выполняются на основе бесконтактных электронных триггеров. Недостатком рассмотренного преобразователя является большое число высокостабильных источников напряжения. В одноэталонном преобразователе имеется один источник напряжения и по дополнительному усилителю со стабильным коэффициентом усиления в каждом каскаде. Преобразователи с замкнутой схемой имеют линию обратной связи, что повышает надежность преобразования.

Кроме рассмотренного метода поразрядного кодирования информации при передаче ее на большие расстояния в телекоммуникационных системах используются и иные методы: последовательного счета (временное кодирование), частотная модуляция и так далее. Но, как правило, они используются либо при значительной длине каналов связи, либо при передаче специфической информации, в системах управления подъемно-транспортных, строительных и путевых машин не применяются и в объеме настоящего курса лекций рассматриваться не будут.

Контрольные вопросы и задания

1. Как отразить в виде контактов реле следующие логические операции:
– умножение;
– сложение;
– отрицание?
2. Охарактеризуйте основные логические функции: запрет; несовместимость; память; «стрелка Пирса»; «штрих Шеффера».
3. Охарактеризуйте логические элементы: конъюктор, дизъюнктор, инвертор.
4. Охарактеризуйте логический элемент «ИЛИ-НЕТ».
5. В чем заключается принцип действия сумматора на потенциометрах?
6. Назовите множительно-делительные свойства моста.

7. Опишите интегрирование и дифференцирование на операционных усилителях.

8. В чем заключается принцип действия цифрового преобразователя напряжения?

Лекция 10
Исполнительные устройства, органы управления и приборы контроля

К периферийным относятся устройства, находящиеся на границе системы управления, и обеспечивающие ее информационную связь с контрагентами (лат. contra – против и *агент* – действующий, взаимодействующая сторона). В эту совокупность входят следующие классификационные группы устройств систем управления (см. лекцию 3):

- датчики – обеспечивают получение и передачу информации о состоянии объекта управления в систему управления;
- исполнительные устройства – передают командную информацию от системы управления к объекту;
- органы управления – воспринимают от оператора и передают в систему управления командную информацию;
- приборы контроля – передают информацию о состоянии объекта управления и самой системы оператору.

Первая из перечисленных групп, а именно датчики, является настолько важной, что ее рассмотрению были посвящены две лекции настоящего курса (лекции 4 и 5). С остальными группами устройств ознакомимся в настоящей лекции.

➢ Исполнительные устройства

Исполнительные устройства систем управления предназначены непосредственно для управления силовыми цепями электропривода, потоками воздуха и рабочей жидкости пневмо- и гидропривода, подвижными силовыми элементами механической трансмиссии. К ним относят элементы, в которых реализуется поток энергии управления, циркулирующий в системе. Такими элементами являются:

– магнитные пускатели, контроллеры, тиристорные преобразователи для управления трехфазными асинхронными двигателями переменного тока с короткозамкнутыми и фазными роторами и потенциометрические преобразователи для управления двигателями постоянного тока, серводвигатели для управления дистанционными и автоматическими потенциометрами и контроллерами (управление электроприводом);

– тяговые электромагниты, управляющие пневмо- и гидрораспределителями, сервовентилями, управляемыми клапанами (управление пневмо- и гидроприводом);

– тяговые электромагниты, электрогидравлические и электромеханические толкатели муфт сцепления и переключения, тормозов (управление механической трансмиссией).

Все перечисленные устройства по конструкции можно разделить на три основных вида: электродвигатели, электромагниты, специализированные реле.

Электродвигатели. В системах управления в качестве серводвигателей применяются электродвигатели постоянного тока и однофазные безколлекторные двигатели с короткозамкнутым ротором переменного тока малой (от сотых долей ватта до десятков ватт) мощности. В дисциплине «Электрические машины» принцип действия и конструкция электродвигателей рассматривались достаточно подробно, и в рамках настоящей дисциплины мы остановимся только на специализированных устройствах систем управления – электромеханических и электрогидравлических толкателях, в конструкцию которых встроены электродвигатели.

Конструкция *электромеханического толкателя* приведена на рис. 91. Он представляет собой электродвигатель с полым валом, который одновременно является гайкой винтовой передачи. Провороту винта мешает шпонка в подшипниковом щите электродвигателя. В некоторых случаях используется шариковая винтовая передача.

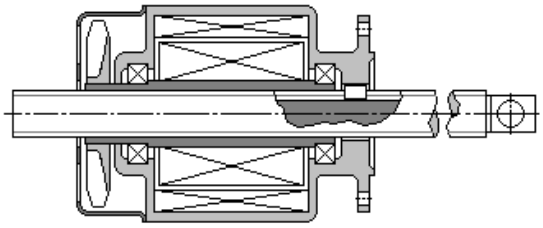


Рис. 91. Электромеханический толкатель

На рис. 92 приведена конструктивная схема *электрогидравлического толкателя*. Безколлекторный двигатель переменного тока *1* с короткозамкнутым ротором размещен в нижней части корпуса, заполненного маслом. Так как масляный резервуар не герметизирован относительно электродвигателя, в качестве рабочей жидкости используется не содержащее воды трансформаторное масло. На валу двигателя установлена крыльчатка *2*. Над двигателем расположен поршень *3* колоколообразной формы. В стенках корпуса располагаются каналы *4*, соединяющие верхнюю и нижнюю части резервуара в обход поршня.

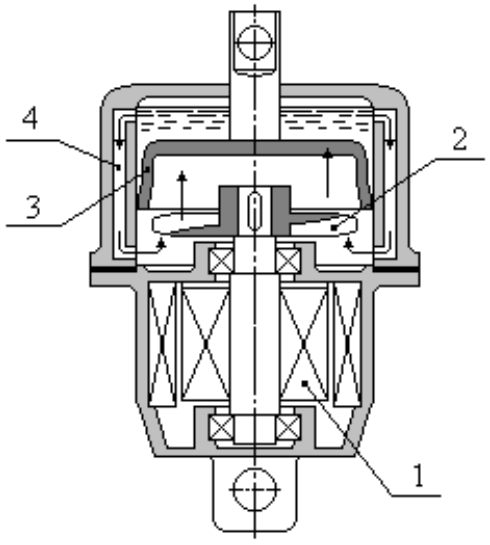


Рис. 92. Электрогидравлический толкатель: *1* – двигатель; *2* – крыльчатка; *3* – поршень; *4* – каналы

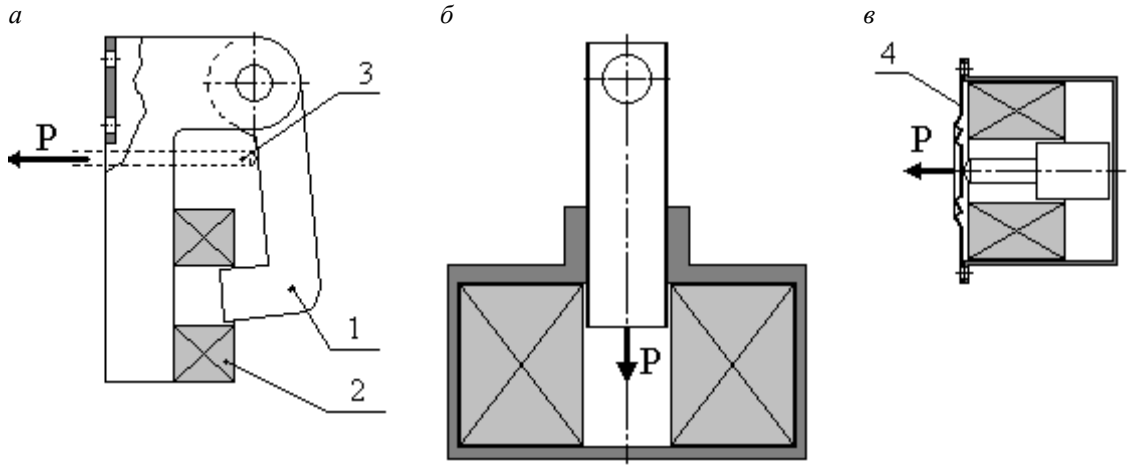
При выключенном двигателе поршень под действием собственной тяжести и внешнего усилия опущен в нижнее положение. При включении двигателя крыльчатка создает под поршнем динамический напор, заставляющий последний подняться. Электрогидравлические толкатели, обладающие плавной внешней силовой характеристикой и не создающие большие токи в электрической цепи при значительных сопротивлениях перемещению штока, получили достаточно большое распространение, например, в качестве приводов размыкания тормозов кранов. Основными недостатками, ограничивающими их применение, являются значительные габариты и масса, необходимость строго вертикальной установки.

Электромагниты. Для управления механическими приводами используются как электромагниты, выполненные в виде самостоятельных

устройств, так и встроенные. Первые – подразделяются на коротко- и длинноходовые. На рис. 93,*а* приведен короткоходовой поворотный электромагнит типа МО – □□□ Б (пустые позиции обозначают типоразмер), служащий для разжима колодок крановых тормозов типа ТКТ. Якорь *1* шарнирно крепится к основанию. При подаче напряжения на катушку электромагнита *2* якорь поворачивается, нажимая на толкатель *3* (является принадлежностью тормоза). За счет разницы плеч относительно оси вращения на толкателе реализуется усилие Р большее, чем втягивающее усилие магнита, но с меньшей величиной перемещения.

Длинноходовой электромагнит прямого действия (рис. 93,*б*) применяется для привода переключения фрикционных и кулачковых муфт, реверс-раздаточных коробок и иных управляемых устройств механических трансмиссий. Главным недостатком таких электромагнитов является значительная сила тока при неполном ходе якоря. Это вынуждает использовать в кинематической цепи привода упругие компенсаторы хода.

В отличие от предыдущего типа, электромагниты для привода электрогидравлических и электропневматических распределителей, вентилей, предохранительных и разгрузочных управляемых клапанов (рис. 93,*в*) являются толкающими, а не тянущими. Для герметичности на привалочной плоскости электромагнита размещена сплошная мембрана *4*.



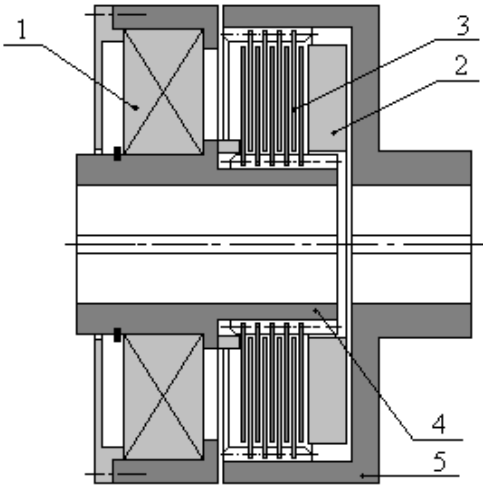


Рис. 94. Электромагнитная муфта: *1* – тороидный электромагнит; *2* – якорь; *3* – диски; 4 – шлицевой вал; *5* – обойма

Рис. 93. Электромагниты: *а* – короткоходовой поворотный; *б* – длинноходовой; *в* – для привода гидропневмоаппаратуры; *1* – якорь; *2* – катушка электромагнита; *3* – толкатель; *4* – мембрана

Как пример устройства со встроенным электромагнитом на рис. 94 приведена электромагнитная многодисковая фрикционная муфта. При включении тороидного электромагнита *1* якорь *2*, притягиваясь к нему, сжимает пакет фрикционных дисков *3*, обеспечивая передачу крутящего момента со шлицевого вала *4* на обойму *5*.

Фрикционные диски через один входят в зацепление со шлицами либо вала, либо обоймы.

К специализированным выходным реле систем управления относятся *магнитные пускатели* и *контроллеры*. Магнитные пускатели служат для запуска силовых асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Для плавного разгона силовых асинхронных двигателей с фазным ротором служат контроллеры – многопозиционные переключатели, изменяющие в период разгона число пар полюсов обмотки ротора и соответственно – синхронную частоту вращения. О магнитных пускателях и контроллерах уже упоминалось в лекции 8.

➢ Органы управления

Служат для получения от оператора и передачи в систему управления командной информации. На входе в органы управления – перемещение, выполняемое рукой (в некоторых случаях – ногой) оператора, на выходе – изменение электрической энергии (в настоящем курсе речь идет только об органах управления электрических систем). Отсюда функциональные требования к органам управления, в первую очередь, они должны соответствовать требованиям *эргономики* (науки о взаимодействии человека и машины), во вторую – соответствовать по параметрам управляемой электрической цепи. К эргономическим требованиям относятся ограничения по расположению органов управления, траектории и усилию управляющего перемещения. Органы управления должны быть не только удобно расположены, в их размещении должна учитываться их иерархия по степени ответственности. В размещении и

конструкции органов управления должны быть предусмотрены и дополнительные меры, например, рабочая поверхность кнопок, ложное нажатие на которые может привести к серьезным последствиям, должна утапливаться внутрь защитного барьера; кнопки аварийной остановки наоборот должны выступать из этого барьера, выделяться габаритом и цветом (так называемые грибковые стоповые кнопки); тумблера должны располагаться так, чтобы избежать их случайного включения, например, локтем или обшлагом рукава. По усилию, потребному для перемещения, органы управления разделяются на ручные, кистевые, пальцевые, ножные (для перемещения необходимо усилие соответствующего органа). При всех прочих условиях, скорость психомоторной реакции ноги выше, чем руки, поэтому органы управления, требующие более быстрой реакции, предпочтительно делать ножными (именно поэтому в автомобиле установлена педаль тормоза, а не рычаг). По траектории потребного перемещения органы управления разделяются на нажимные (кнопка, клавиша), поворотные (рычаг, педаль), вращательные (штурвал, маховик), линейного перемещения (ползун). В электрическом плане органы управления разделяются на обладающие дискретной (переключатели) и плавной (регуляторы) характеристикой. Первые представляют собой по сути дела конечные выключатели или реле с приводом от оператора (см. лекции 4 и 8). Вторые – потенциометры, регулируемые катушки индуктивности или конденсаторы, т. е. датчики перемещения с приводом от оператора. Ниже рассмотрим наиболее типовые электрические органы управления.

Кнопки. На рис. 95,*а* приведена конструкция наиболее простой электрической кнопки серии КМЕ так называемого толчкового типа – группы из нормально замкнутого и нормально разомкнутого контактов, управляемых пальцем оператора. Эта кнопка находится во включенном положении, пока на нее нажимает оператор. Поэтому, когда нужно обеспечить длительную работу управляемого устройства при кратковременном нажатии кнопки, применяют специальную схему включения кнопки: с блокировкой при помощи шунтирующей цепи. Известны и более сложные конструкции кнопок – с механической и электромагнитной блокировкой во включенном состоянии. У кнопок с механической блокировкой в механизм переключения встроена так называемая защелка Меламеда: храповое устройство, обеспечивающее при первом нажатии замыкание кнопки, а при повторном – ее размыкание (аналогичная защелка применяется в некоторых типах шариковых ручек). У кнопок с электромагнитной блокировкой (рис. 95,*б*) в толкатель контактной группы встроен сердечник электромагнита, а катушка электромагнита включена в управляемую кнопкой цепь.

а *б* *в*

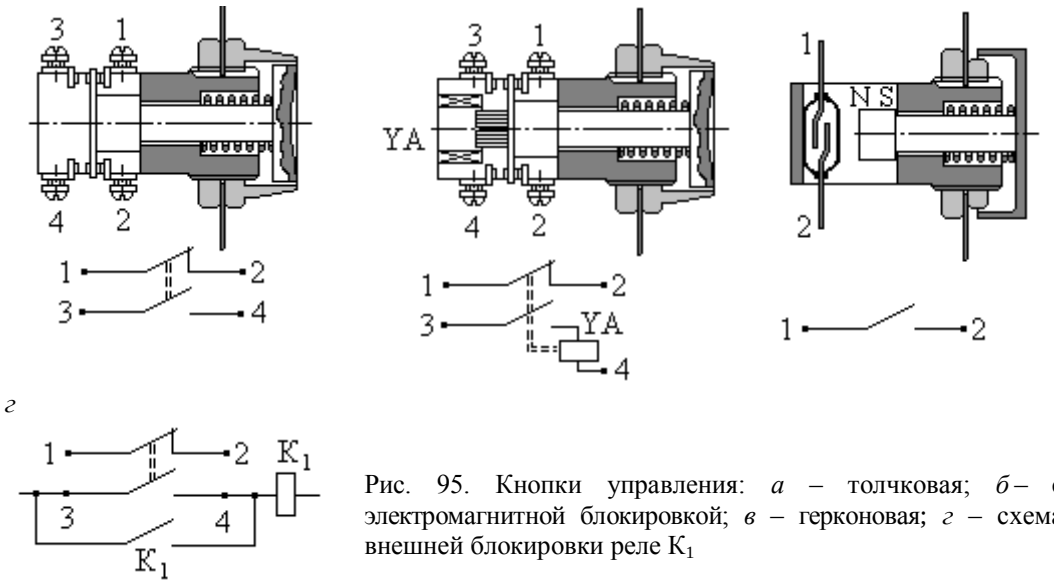


Рис. 95. Кнопки управления: *а* – толчковая; *б* – с электромагнитной блокировкой; *в* – герконовая; *г* – схема внешней блокировки реле K_1

При нажатии кнопки на электромагнит подается напряжение и он удерживает кнопку в нажатом положении. Для размыкания цепи, управляемой толчковой кнопкой или кнопкой с электромагнитной блокировкой, необходимо внешнее устройство. Конструкция толчковых кнопок предусматривает установку дополнительных контактных групп для управления от одной кнопки несколькими цепями. Достоинством данных типов кнопок является большая коммутируемая мощность – до сотен ватт, недостатками – большие габариты и ограничение срока службы из-за выгорания контактов от искрения при срабатывании. Помимо кнопок с обычными электрическими контактами известны *герконовые* и *сенсорные* кнопки.

Герконовые кнопки аналогичны по конструкции магнитозамыкаемым герконовым конечным выключателям (см. лекция 4). Управляющий постоянный магнит крепится к толкателю кнопки (рис. 95,*в*). Герконовые кнопки обладают высокой надежностью, малогабаритны и получили достаточно большое распространение (например, в клавиатуре ЭВМ). К их недостаткам можно отнести относительно небольшую коммутируемую мощность и недостаточную универсальность – каждая кнопка представляет собой один нормально разомкнутый контакт.

При бесконтактном сенсорном управлении состояние выходной цепи изменяется не при контакте пальца оператора с кнопкой, а только при поднесении его к ней.

Наиболее простая схема сенсорного управления приведена на рис. 96. Схема представляет собой мост индуктивностей, одна из которых – L_1 – прикреплена с внутренней стороны к панели управления. Панель управления изготовлена из магнито-прозрачного материала и с внешней стороны на нее нанесена марки-ровка кнопки. В исходном состоянии мост находится в балансном состоянии и по

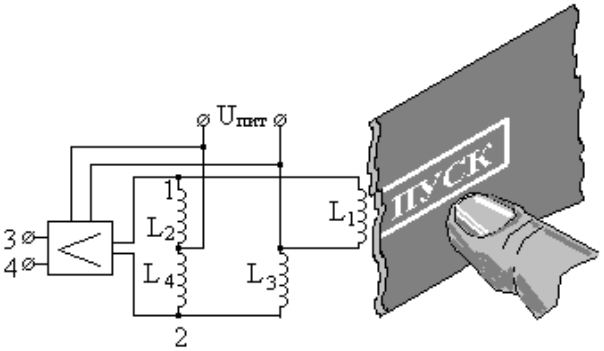


Рис. 96. Схема сенсорного управления

измерительной диагонали 1–2 ток не течет. Коэффициент магнитной проницаемости μ человеческого тела выше, чем воздуха, поэтому при поднесении пальца к индуктивности L_1 ее индуктивное сопротивление изменяется, и мост выходит из состояния баланса. На измерительной диагонали, следовательно, на входе в усилитель У (как правило, полупроводниковый однокаскадный) появляется отпирающее напряжение. Сопротивление выходной цепи между клеммами *3* и *4* резко уменьшается – выходная цепь отпирается. Сенсорные кнопки обладают самой высокой надежностью среди рассмотренных: в них нет ни одной подвижной детали и ни одного электрического контакта. К недостаткам можно отнести малую коммутируемую мощность, следовательно, необходимость дополнительного усиления сигнала управления.

а *б*

Рис. 97. Тумблеры: *а* – внешний вид; *б* – схемы контактов

Тумблеры. Представляют собой пальцевые рычажные переключатели. Могут быть двухпозиционными и трехпозиционными (с нейтральным положением), с фиксацией в нажатом положении и возвратом в нейтральное, выводами под пайку и винтовыми клеммами. Внешний вид и схемы контактов тумблера приведены на рис. 97.

а *б*

Рис. 98. Переключатель: *а* – внешний вид; *б* – схемы контактов

Переключатели являются многопозиционными (от 3 до 12 позиций) поворотными пальцевыми органами управления. Внешний вид и схема контактов приведены на рис. 98.

Потенциометры служат для настройки и плавной регулировки какого-либо электрического параметра путем изменения активного сопротивления. Подразделяются на поворотные и линейные (ползунковые). У поворотных потенциометров сопротивление как правило угольное. Иногда угольное сопротивление делается переменным по сечению для придания нелинейного вида характеристике $R = f(\varphi)$, где R – сопротивление, φ – угол поворота.

Контроллеры – многопозиционные силовые переключатели. На рис. 99 приведены внешний вид и схема рычажного контроллера управления двигателем подъема башенного крана. Более подробно об управлении пуском трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором будет рассказано в дисциплине «Управление техническими системами».

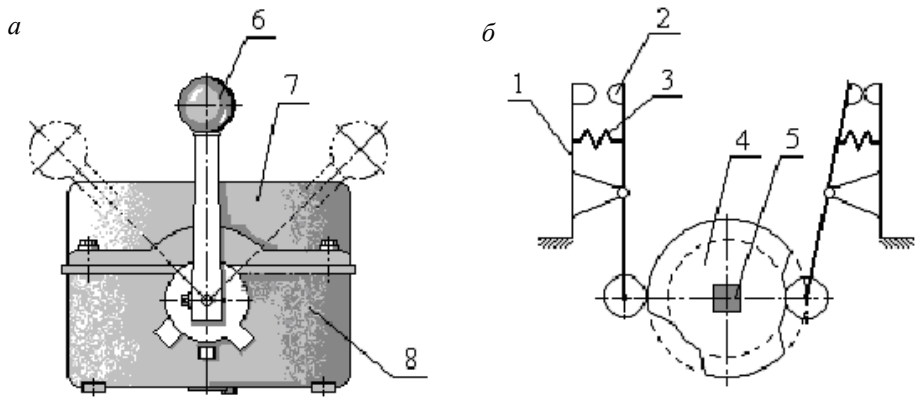


Рис. 99. Кулачковый контроллер ККТ-61 и его контактная система: а – внешний вид; *б* – контрактная группа; *1* – неподвижный контакт; *2* – подвижный контакт; *3* – приводная пружина; *4* – управляющий кулачок; *5* – вал; *6* – рычаг управления; *7* – крышка; *8* – корпус

Педали. На рис. 100 приведена переключающая педаль на базе специализированного кранового конечного выключателя КУ-70□ (пустая позиция – номер исполнения). Педали для плавного регулирования представляют собой комбинацию из собственно педали, механической передачи и поворотного потенциометра.

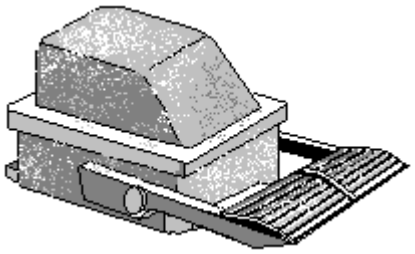


Рис. 100. Педаль управления

Сельсинные командоаппараты. Являются плавными регуляторами. В отличие от потенциометров представляют собой бесконтактные приборы управления. Основой является сельсинная пара, работающая в генераторном режиме (подробнее – см. лекцию 5). Управляющий элемент соединен с ротором сельсин – датчика. При повороте ротора в линиях связи сельсинной пары появляется напряжение рассогласования, пропорциональное углу поворота ротора. Это напряжение и является управляющим сигналом командоаппарата.

Промышленностью выпускаются сельсинные командоаппараты серий СКАЗ, СКАР, СКАП. Последняя буква обозначения означает тип управляющего элемента (З – маховичный ручной, Р – рычажный ручной, П – педальный). Командоаппараты СКАЗ встраиваются в панель управления. Некоторые модификации СКАЗ имеют стрелочный указатель положения маховичка.

➢ Приборы контроля

Служат для передачи информации оператору о состоянии управляемых процессов или машины. Так же, как и органы управления, они должны подчиняться двум комплексам требований, во-первых, по своим электрическим параметрам согласовываться с остальной системой управления; во-вторых, соответствовать эргономическим требованиям к приборам аудиовидеоинформации. Как уже отмечалось в лекции 3, приборы контроля подразделяются на шкальные, цифровые и индикаторные. У шкальных приборов положение стрелки на шкале пропорционально уровню входного

сигнала. Он обладает наименьшим временем, необходимым оператору для оценки показаний, но точность оценки показаний у него ниже, чем у цифрового прибора. Цифровой прибор выдает значение уровня входного сигнала в виде цифровой информации. Индикатор выдает дискретную информацию. Таким образом, шкальный прибор служит для постоянного приближенного контроля за состоянием какого-либо параметра. Цифровой прибор служит для точной оценки состояния какого-либо параметра, при этом восприятие положения текущего уровня относительно пределов изменения или опасных порогов хуже, чем у приборов шкального типа. Индикатор выдает информацию о достижении контролируемым параметром определенного значения, чаще всего – предельного.

Шкальные приборы. Принцип действия шкального электрического прибора контроля рассмотрим на примере магнитоэлектрического измерительного механизма, например, прибора контроля температуры охлаждающей жидкости двигателя ЯМЗ-238 на центральном пульте управления путевой машиной ВПРС-500 (рис. 101). Механизм состоит из трех проволочных катушек, навитых на пластмассовый каркас таким образом, что векторы направленности их электромагнитных полей пересекаются в центре каркаса под прямым углом. В этом месте на поворотной оси помещен постоянный магнит, жестко соединенный с указательной стрелкой. Магнит располагается параллельно суммирующему вектору электромагнитных полей. Последовательно одной из катушек включен датчик. При изменении состояния датчика баланс электромагнитных полей изменяется, меняет свое направление суммирующий вектор и вместе с ним – постоянный магнит.

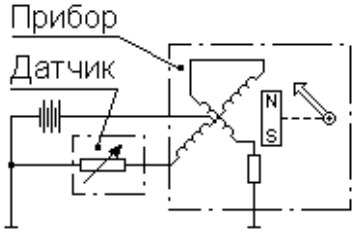


Рис. 101. Схема магнитоэлектрического измерительного прибора

Цифровые приборы. Цифровой прибор контроля представляет собой комбинацию из аналогово-цифрового преобразователя, преобразователя двоичного кода в более привычный десятичный и цифрового индикатора. Структурная схема приведена на рис. 102. Принцип действия аналогово-цифрового преобразователя рассматривался в предыдущей лекции. В последнее время все большее распространение получают жидкокристаллические цифровые индикаторы благодаря своим высоким эргономическим свойствам, универсальности, удобству монтажа.

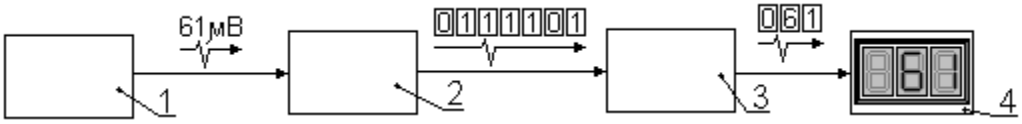


Рис. 102. Структурная схема цифрового прибора контроля: *1* – датчик; *2* – аналогово-цифровой преобразователь; *3* – двоично-десятичный преобразователь; *4* – цифровой индикатор

Индикаторы подразделяются на визуальные и звуковые. В цепях управления постоянного тока напряжением 5 В, 12 В, 24 В в качестве

визуальных индикаторов используются лампочки накаливания малой мощности. В цепях переменного тока более высокого напряжения применяются газосветные неоновые лампочки. Звуковые индикаторы, как правило, дублируют наиболее важные сигналы при перегруженности пульта управления визуальной информацией. Подразделяются на электромеханические и электронные зуммеры. Первые представляют хорошо известный электрический звонок. Основой электронного зуммера является генератор колебаний, например, на базе мультивибратора (см. лекцию 4, принцип работы бесконтактного конечного выключателя). В выходную цепь мультивибратора включен динамик. В последнее время получают распространение многотональные электронные зуммеры, позволяющие различать сигналы по тону.

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите конструкцию, принцип действия, достоинства и недостатки электромеханического и электрогидравлического толкателей.
2. Почему в электрогидравлическом толкателе применяется трансформаторное масло?
3. Опишите типы и конструкцию управляющих электромагнитов.
4. Назовите эргономические требования к органам управления.
5. Опишите типы и конструкцию кнопок управления.
6. В чем принцип внешней блокировки толчковой кнопки?
7. Назовите достоинства и недостатки герконовых кнопок по отношению к остальным типам.
8. В чем принцип действия сенсорного управления?
9. В чем принцип действия магнитоэлектрического шкального прибора контроля?