

**М.Н. Ляшко
К.М. Маркевич**

ОСНОВЫ РАДИО- ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

**Допущено Министерством
народного образования БССР**

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ

**Минск
«Народная асвета»
1991**

ББК 32.844я721
Л 99
УДК 621.396.6(075.3)

Главы II, III, IV написаны М. Н. Ляшко и К. М. Маркевичем совместно;
главы I, V—XII— М. Н. Ляшко.

Ляшко М. Н., Маркевич К. М.

Л 99 Основы радиоэлектроники: Учеб. пособие.— 2-е
изд. перераб.— Мн.: Нар. асвета, 1991.— 175 с.: ил.

ISBN 5-341-00218-0.

В пособии излагаются сведения о радиотехнических материалах, радиодеталях и радиокомпонентах, принцип работы полупроводниковых приборов, устройств на их базе, дается понятие об интегральных микросхемах, логических элементах и их применении.

Первое издание вышло в 1986 г.

Адресуется учащимся средней школы. Может быть использовано в спецклассах с углубленным изучением физики, на факультативных занятиях и на занятиях радиотехнического кружка.

4306022200—042
Л—115—91
М303(03)—91

ББК я721

ISBN 5-341-00218-0

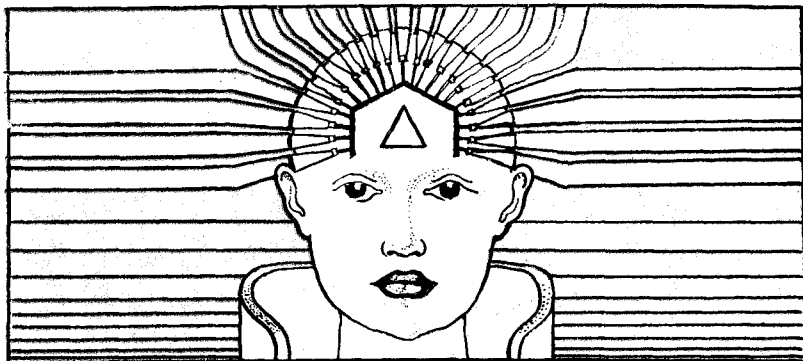
© М. Н. Ляшко, К. М. Маркевич, 1991

Профессиональное обучение учащихся средней общеобразовательной школы по радиотехническим специальностям базируется на знаниях по основам радиоэлектроники. Занятия по этой дисциплине включают изучение теории, выполнение лабораторно-практических работ, экскурсии на производство.

Содержание второго, переработанного издания пособия в максимальной мере приведено в соответствие с новыми программами по основам радиоэлектроники профессионального обучения учащихся X—XI классов общеобразовательной школы по профессиям «Монтажник радиоэлектронной аппаратуры и приборов», «Слесарь-сборщик радиоэлектронной аппаратуры и приборов». Изложение основывается на тех знаниях учащихся по физике, математике и другим дисциплинам, которые они приобретают ко времени изучения соответствующих тем курса радиоэлектроники.

Авторы предприняли попытку достаточно полно осветить физические явления в полупроводниковых приборах, показать возможности простой оценки параметров устанавливаемых в радиоэлектронных устройствах элементов, дать представление об аналоговых и цифровых интегральных микросхемах, познакомить читателя с принципами работы и наиболее распространенными схемами усилителей, генераторов, узлов приемной аппаратуры, закономерностями функционирования логических элементов, устройств комбинационной и последовательностной логики, осветить принципы функционирования ЭВМ.

Старания авторов были направлены на то, чтобы пособие оказалось пригодным не только в профессиональном обучении учащихся, но и на занятиях по радиоэлектронике в спецклассах общеобразовательных школ, на факультативных занятиях и в кружковой работе. Авторы полагают, что читатель, желающий освоить основные понятия радиоэлектроники, найдет в книге много нужных и полезных сведений.



Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНФОРМАЦИИ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ И РАДИОТЕХНИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

1. Информация и сигналы

Каждый из нас воспринимает, фиксирует, передает различные сведения и обменивается ими. Принимают сведения, когда слушают говорящего, осматривают окружающие предметы, читают книгу, смотрят телевизионные передачи, ощущают температуру окружающих предметов и т. д. Фиксируют сведения, записывая цифры, буквы или знаки на бумаге, намагничивая специальные ленты в магнитофоне, фотографируя и иными способами. Передают сведения в процессе непосредственного разговора с другими людьми, пересылая письма или магнитофонные ленты, ведя разговор по телефону или радио. Обмен сведениями происходит не только между людьми, но и между техническими устройствами (радиопередатчик — радиоприемник, телецентр — телевизор, устройство автоматического управления станком — станок), животными и растениями.

Совокупность сведений о физических явлениях, химических процессах, предметах, событиях, а точнее обо всем, что происходит в мире, принято называть *информацией*. Информацию передают, фиксируют (записывают), хранят, видоизменяют (обрабатывают).

Для отражения информации применяют различные символы (знаки). Ими могут быть определенные положения предмета, буквы, цифры; ток, напряжение, индукция магнитного поля, напряженность

электрического поля определенной величины, яркость свечения элемента поверхности тела, например небольшого пятна на экране кинескопа, химический состав вещества и т. д.

Смена знаков, или символов, является *сигналом*. Сигнал выражает определенное сообщение, т. е. сведения или информацию в некотором объеме, и является *сигналом сообщения*. Простейшее сообщение может быть передано сигналом в виде смены положения руки, например ее поднятия, заменой цифры 0 на цифру 1, одной буквы на другую, изменением величины тока или напряжения, яркости свечения пятна на экране кинескопа и т. д. Многократные изменения символов — букв или цифр в книге, величин тока или напряжения — применяют для передачи сложных сообщений (больших количеств информации).

Появление сигналов, запись и передача информации — результат определенных процессов. Непрерывное горение сигнального костра, неподвижное положение флажка, заполненная одинаковыми сочетаниями букв книга, одинаковые по величине или изменяющиеся с течением времени по одному и тому же закону ток или напряжение информации не несут. Костер должен вспыхивать, флажок перемещаться, сочетания букв в книге изменяться, напряжение или ток менять свою величину, причем закон изменения их с течением времени не может быть одним и тем же. Только тогда будет передаваться информация.

Передается информация материальными носителями: *веществом* (бумага с буквами, знаками или цифрами, магнитная лента, дискетка вычислительной машины) или *энергией* (энергия колебаний воздуха вокруг говорящего человека, энергия тока или электромагнитного поля).

Если в процессе передачи информации в качестве сигналов выступают изменения электрических величин (напряжение, ток, индукция магнитного поля, напряженность электрического поля и т. д.), то такие сигналы называют *электрическими*. Применение их обладает рядом преимуществ. Скорость распространения электрических сигналов может достигать скорости света. Для получения, сравнения и преобразования электрических сигналов используют электронные устройства. В них все операции проходят с большой скоростью и без применения перемещающихся деталей. Этим объясняется столь распространенное применение электрических явлений для отображения, хранения, приема и передачи информации (телефон, радио, телевидение, автоматические устройства, вычислительные машины и т. д.).

Электрические сигналы принято представлять в *непрерывной* и *дискретной* формах. Предположим, что в качестве электрического сигнала выступают изменения напряжения в пределах от 0 до 10 мВ по закону, показанному кривой 1 на **рис. 1**. Каждой точке графика соответствует определенное значение напряжения. Число таких значений в заданном интервале времени бесконечно, отличия между уровнями напряжения могут быть сколь угодно малыми. Это значит, что бесконечно большим является число

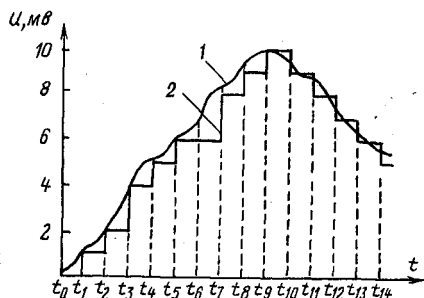


Рис. 1. График непрерывного (кривая 1) и дискретного (кривая 2) сигналов

возможных переходов от одного уровня напряжения к другому, т. е. число появляющихся сигналов. Отвечающий таким требованиям сигнал называют *непрерывным* или *аналоговым*. Эти же значения изменяющегося напряжения можно представить по-другому, если отмечать их не в любые моменты времени, а только в определенные — $t_0, t_1, t_2...$ и выражать целым числом милливольт: при $0 \leq u \leq 1$ мВ принять $u = 0$, при $1 \text{ мВ} \leq u \leq 2 \text{ мВ}$ — 1 мВ,

при $2 \text{ мВ} \leq u \leq 3 \text{ мВ}$ — 2 мВ и т. д. В результате получим график напряжения (см. рис. 1, кривая 2) в виде ломаной линии. Отсчет уровня напряжения является дискретным (прерывистым) во времени и ведется не непрерывно, а только в определенные моменты времени. Дискретными являются и уровни изменения напряжения. Изменения уровня напряжения фиксируются только в том случае, если эти изменения по сравнению с предшествующим уровнем равны или больше заданного интервала отсчета (ступеньки), в нашем случае — 1 мВ.

Несущий информацию электрический сигнал характеризуется *амплитудой, длительностью следования и спектром*. Амплитуда сигнала — это максимальная его величина; длительность следования — время, в течение которого передается сигнал; спектр сигнала показывает, как данный сигнал можно представить в виде суммы колебаний, описываемых законом синуса или косинуса. Например, спектр сигнала, получаемого на выходе микрофона в процессе разговора человека, является суммой гармонических колебаний с частотами в пределах от 300 Гц до 3400 Гц.

Информации присуща количественная мера. Единицей количества информации является *бит* — информация, которая приходится на один символ при числе всех используемых символов, равном двум. В радиоэлектронике символы двухсимвольной системы передачи информации обозначают как 0 и 1. Количество информации, равное восьми битам, называют *байтом* (10^3 байт составляет килобайт, а 10^6 байт — один мегабайт).

2. Радиоэлектроника и ее применение

Проблемы передачи, преобразования и хранения информации посредством электрических колебаний и электромагнитных волн призвана решать область науки и техники, называемая *радиоэлектроникой*. Радиоэлектроника включает электронику, радиотехнику, полупроводниковую электронику, квантовую электронику и другие области науки и техники. Для передачи информа-

ции используют электрические колебания различных диапазонов частот и соответственно длин волн.

Передают информацию по каналам связи, включающим совокупность технических средств передачи и приема информации и среду между ними. Между передающими и принимающими устройствами создают *линии связи*. Они могут быть *проводными, кабельными, оптическими, радиорелейными, спутниковыми* и т. д.

Передача сигналов по проводным или кабельным линиям связи во многих случаях осуществляется без какого-либо их преобразования. При подаче сигналов на большие расстояния возникает необходимость в их усилении. В то же время часто для передачи информации используются гармонические высокочастотные колебания. При неизменной их амплитуде, частоте или периодическом повторении фазы они информацию не несут. Чтобы высокочастотные гармонические колебания содержали информацию, на них воздействуют электрическими сигналами, называемыми *сигналами сообщения*. В результате таких воздействий происходят изменения амплитуды, частоты или фазы высокочастотных колебаний. Появляется нерегулярный сигнал высокой частоты, один из параметров которого — амплитуда, частота или фаза — изменяется в соответствии с передаваемой информацией. Такой сигнал называют *радиосигналом*. Передача радиосигналов осуществляется по каналам радиосвязи, т. е. посредством электромагнитных волн, распространяющихся в воздушном пространстве вокруг Земли, по высокочастотным кабелям или по радиорелейным линиям связи. Канал радиосвязи включает передатчик с антенной, воздушное пространство и приемник с антенной.

Возникновение радиоэлектроники — результат накопления человечеством знаний об окружающем мире, изучения происходящих в нем явлений, развития многих отраслей науки и техники, в первую очередь физики, электротехники, радиотехники.

В 1820 г. датский физик Х. Эрстед обнаружил действие электрического тока на магнитную стрелку и установил взаимосвязь между электрическими и магнитными явлениями. Английский физик М. Фарадей в 1831 г. открыл явление электромагнитной индукции, которая явилась основой развития электротехники, а позже — радиотехники!

Другой английский физик Д. Максвелл создал теорию электромагнитного поля, предсказал существование электромагнитных волн. Распространение этих волн в природе подтвердил на опыте немецкий физик Г. Герц.

В 1895 г. электромагнитные волны были использованы русским ученым А. С. Поповым для осуществления связи без проводов — радиосвязи. В короткий срок этот вид связи получил распространение во всем мире, его эффективность увеличилась в результате изобретения в начале XX в. радиолампы.

Открытие радио явилось началом развития радиотехники — отрасли техники, связанной с передачей информации посредством электромагнитных волн.

В нашей стране бурное развитие радиотехники началось после Великой Октябрьской социалистической революции. Огромная заслуга в этом принадлежит Владимиру Ильичу Ленину. По его инициативе в 1918 г. была организована Нижегородская радиолaborатория, где были созданы мощные отечественные радиолампы, разработаны радиопередатчики и радиоприемники.

В. И. Ленин проявлял огромный интерес к развитию радиотехники, к успе-

хам в области радиотелефонии, оказывал широкую помощь и поддержку радиоспециалистам. В январе 1921 г. В. И. Ленин подписал декрет о радиотелефонном строительстве в нашей стране. В последующие годы была создана широкая сеть радиовещательных станций, некоторые из них были самыми крупными в мире.

Развитие радиотехники явилось толчком для совершенствования электронных ламп, создания электронно-лучевых трубок, ионных, фотоэлектронных, полупроводниковых приборов. Достижения радиотехники стали широко использоваться в научных исследованиях, применяться в различных отраслях народного хозяйства.

К 50-м гг. XX в. радиоэлектронные приборы и аппаратура стали применяться для решения многих задач, не связанных с передачей сообщений по радио. Появился термин «радиоэлектроника».

Радиоэлектроника сегодня — это не только передача и обработка огромных потоков сообщений, но и решение больших по объему и сложных по содержанию вычислительных задач, автоматическое управление производственными процессами, применение эффективно работающей медицинской аппаратуры и сложных бытовых приборов и т. п. Развитие современной радиоэлектроники тесно связано с применением полупроводниковых приборов и миниатюрных устройств — интегральных микросхем.

В нашей стране ведется огромная работа по созданию радиоэлектронной техники сегодняшнего и завтрашнего дня. Во все отрасли народного хозяйства внедряются средства вычислительной и микропроцессорной техники, роботы. Ведутся работы по созданию цифровых систем связи, обеспечивающих использование искусственных спутников Земли для передачи программ телевидения, радиовещания, телефонных сообщений, изображений газетных полос фототелеграфным способом. В стране развивается и совершенствуется Единая автоматизированная система связи (ЕАСС). Ее основу составляют кабельные и радиорелейные линии связи.

3. Радиотехническое производство

Развитие средств связи, внедрение достижений радиоэлектроники в научные исследования, промышленное и сельскохозяйственное производство, на транспорт, в быт советских людей возможно при отлаженном радиотехническом производстве. Изготовление радиоэлектронной аппаратуры представляет собой сложный производственный процесс, в ходе которого получают радиодетали, собирают отдельные узлы аппаратов, соединяют их между собой, настраивают, проверяют и испытывают готовое изделие.

Частью производственного процесса является *технологический процесс*: рабочие выполняют заранее предусмотренные действия, например штампуют металлический лист, изменяют форму заготовок, нарезают провода и подготавливают их к пайке, закрепляют и соединяют детали и т. д.

Технологический процесс подразделяется на *операции*. Операция — это часть технологического процесса, выполняемая одним или несколькими рабочими на одном рабочем месте и вклю-

чающая все действия по обработке детали, сборке узла или аппарата.

Характерная особенность изделий радиоэлектронной промышленности — возможность применения одних и тех же деталей в различных сборочных единицах одного и того же устройства и большая расчлененность изделия на отдельные сборочные единицы, которые можно собирать независимо друг от друга на различных участках цеха, в других цехах завода или на специализированных заводах.

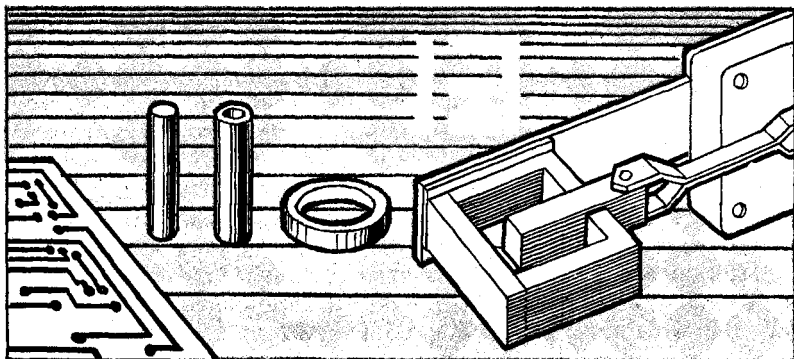
При организации производства радиоэлектронной аппаратуры возможна его специализация — изготовление отдельных изделий, небольшого числа деталей и сборочных единиц в определенных цехах, на участках и рабочих местах.

Сложными технологическими процессами являются сборка и монтаж узлов радиоэлектронной аппаратуры, еще более сложными — регулировка и настройка.

Уровень подготовки рабочего радиотехнического производства должен быть высоким. Он обязан знать основы радиоэлектроники, иметь твердые навыки в выполнении ряда сложных операций, уметь пользоваться радиоэлектронной измерительной аппаратурой.

Вопросы и задания

1. Что такое информация? сообщение? сигнал? электрический сигнал?
2. Назовите известные вам носители информации.
3. Какой сигнал называют аналоговым? дискретным по уровню? цифровым?
4. Что такое спектр сигнала?
5. Какими единицами измеряется количество информации? Дайте определение бита.
6. Что представляет собой канал связи? радиоканал?
7. Какой сигнал называют сигналом сообщения? радиосигналом?



Глава II

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

4. Классификация и характеристики радиоматериалов

Материалы для изготовления радиоэлектронной аппаратуры можно разделить на *радиоматериалы* — они подвергаются воздействию электромагнитных полей и должны обладать определенными свойствами, *конструкционные* — из них изготавливают основы конструкций (преимущественно сталь, сплавы, древесина) и *вспомогательные* — их применяют для соединения элементов конструкции (припой, клей и др.).

В соответствии с электрическими и магнитными характеристиками радиоматериалы делят на четыре основные группы: *проводники*, *полупроводники*, *диэлектрики*, *магнитные материалы*.

Проводниками являются металлические материалы с малым удельным сопротивлением ($\rho \leq 10^{-6}$ Ом · м).

Полупроводники характеризуются удельным сопротивлением в пределах $\rho = 10^{-6} \div 10^8$ Ом · м. Величина электропроводности полупроводников сильно зависит от температуры, освещенности, напряженности электрического поля и других воздействий.

Диэлектрики — плохие проводники тока ($\rho \geq 10^8$ Ом · м). Появление тока в них возможно только при высокой напряженности электрического поля.

Магнитные материалы обладают способностью увеличивать индукцию магнитного поля и концентрировать его энергию.

Кроме удельного сопротивления, для оценки свойств радиоматериалов, используются и другие характеристики.

Температурный коэффициент удельного сопротивления α — относительное изменение удельного сопротивления под влиянием температуры, определяемое по формуле $\alpha = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1(T_2 - T_1)}$, где ρ_1 , ρ_2 — удельное сопротивление материала соответственно при начальной температуре T_1 и конечной T_2 .

Диэлектрическая проницаемость ϵ показывает, во сколько раз сила взаимодействия между зарядами в данном веществе уменьшается по сравнению с ее величиной в вакууме. Значение ϵ зависит от температуры.

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости (ТК ϵ) определяет относительное изменение значения ϵ от температуры: $\text{ТК}\epsilon = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_1(T_2 - T_1)}$, где ϵ_1 , ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость материала при начальной T_1 и конечной T_2 температурах.

Для оценки влияния температуры на качество радиоматериалов введены их тепловые характеристики.

Температура плавления — температура перехода материала кристаллического строения из твердого состояния в жидкое. Материалы аморфного строения (смолы, пластмассы, стекла и др.) характеризуются *температурой размягчения*, определяемой различными способами.

Оценка изменений размеров радиоматериала ведется по значению *коэффициента температурного расширения* $\text{КТР} = \frac{l_1 - l_0}{l_0(T_1 - T_0)}$, где l_0 и l_1 — длины материала при температурах T_0 и T_1 .

Коэффициент теплопроводности λ применяется для оценки способности материала проводить теплоту. По тепловой характеристике, называемой *теплостойкостью*, оценивают стойкость радиоматериалов к кратковременному нагреву при одновременном воздействии механической нагрузки.

5. Основные проводящие и электроизоляционные материалы

В радиотехническом производстве применяются металлические проводниковые материалы с малым удельным сопротивлением, механически достаточно прочные и обладающие пластичностью, а также материалы с большим удельным сопротивлением, являющиеся сплавами металлов.

Медь — металл с малым удельным сопротивлением, имеет достаточную механическую прочность, твердость, медленнее, чем другие металлы, окисляется на воздухе. Легко обрабатывается, сравнительно просто поддается сварке и пайке. Применяют для изготовления токопроводящих жил кабелей, обмоточных и контактных проводов. Из нее изготавливают отдельные узлы и токопроводящие конструкции радиоаппаратуры, детали некоторых электронных приборов и т. д.

Бронза — сплав на основе меди, в который добавляют олово, кремний, фосфор, бериллий и некоторые другие элементы. Она прочнее и тверже меди. Применяют для изготовления токопроводящих пружин, скользящих и пружинающих контактов.

Латунь — сплав меди с цинком, часто с добавками алюминия, железа, марганца, свинца и других металлов. Мягче, чем медь, но имеет достаточно высокую механическую прочность. Применяют для изготовления токопроводящих деталей контактов, вилок и т. д.

Алюминий — легкий металл с небольшим удельным сопротивлением, хорошо проводит тепло, мало окисляется на воздухе, легко поддается технологической обработке, но имеет низкую механическую прочность. Алюминий применяют для изготовления жил и защитных оболочек кабелей, корпусов изделий, электродов электролитических конденсаторов и во многих других случаях.

Дюралюминий — сплав алюминия с медью, магнием и марганцем. Обладает рядом свойств алюминия, но значительно тверже и прочнее его. Используют дюралюминий для изготовления каркасов, стоек, шасси, панелей, корпусов аппаратуры, радиаторов, экранов, заклепок и т. д.

Сталь — это деформируемый (ковкий) сплав железа с углеродом (до 2 %) и другими элементами. Сильно окисляется на воздухе. Поэтому изделия из стали защищают металлическими покрытиями из цинка, никеля, кадмия или других металлов либо красками и лаками. Применяют сталь для изготовления сердечников электромагнитов, магнитопроводов трансформаторов, каркасов, стоек, шасси, пружин и т. д.

Олово — мягкий и пластичный металл, имеющий низкую температуру плавления. В чистом виде применяют для изготовления обкладок слюдяных конденсаторов. Для пайки деталей используют сплавы олова, называемые *припоями*. Припои бывают *легкоплавкие* ($t_{пл}$ до 450 °С) и *тугоплавкие* ($t_{пл}$ выше 450 °С). К легкоплавким относятся припои марок ПОС18, ПОС60, ПОС90, содержащие свинец (число указывает процентное содержание олова), ПОСК47 (оловянно-свинцово-кадмиевый сплав), ПСрК (сплав олова, серебра и кадмия), сплав Вуда, сплав Розе и др.

Золото, серебро, платина, палладий относятся к благородным металлам. Они обладают малым удельным сопротивлением. Используют их как высококачественный контактный и проводящий материал в интегральных микросхемах, транзисторах и диодах, для изготовления электропроводящих покрытий деталей и т. д.

Вольфрам, молибден, тантал — тугоплавкие металлы. Вольфрам и молибден используют для изготовления контактов в электронных лампах. Тантал применяют в производстве электролитических конденсаторов и интегральных микросхем.

Хром — металл серебристо-серого цвета, очень медленно окисляется на воздухе при комнатной температуре, обладает повышенным удельным сопротивлением ($\rho \approx 0,3 \cdot 10^{-6}$ Ом · м). Применяют для получения тонкопленочных резисторов и для нанесения тонкого слабо проводящего слоя на поверхности керамики или стекла в процессе изготовления интегральных микросхем.

Манганин и константан — сплавы меди, никеля, марганца, имеющие высокое удельное сопротивление ($\rho = (0,4 \div 0,5) \cdot 10^{-6}$ Ом · м). Из них изготавливают провода, ленты высокого сопротивления, применяемые в производстве резисторов, терморпар.

Сплав МЛТ — порошок серого цвета, состоящий из кремния, хрома, железа и вольфрама, обладает высоким удельным сопротивлением ($\rho = 0,05 \cdot 10^{-6}$ Ом · м). Используют в производстве металлопленочных резисторов.

Нихром (сплав на основе никеля и хрома), **фехраль** (включает железо и алюминий), **хромаль** (содержит хром и алюминий) — сплавы с высоким удельным сопротивлением ($\rho = (1,0 \div 1,5) \cdot 10^{-6}$ Ом · м); обладают малым коэффициентом сопротивления, сохраняют свои свойства при температурах порядка 1000 °С. Применяют для изготовления нагревательных элементов, проволоочных резисторов; образования тонкопленочных резисторов в интегральных микросхемах.

Неметаллические проводники — это преимущественно электроугольные, изготавливаемые на основе сажи, графита или антрацита изделия. Из них изготавливают аноды гальванических элементов, угольные порошки микрофонов, резисторы и другие детали.

Электроизоляционные материалы обладают большим удельным сопротивлением, изделия из них практически не проводят ток.

Гетинакс — слоистый пластик, получаемый горячим прессованием нескольких слоев бумаги, предварительно пропитанной специальной смолой. Имеет хорошие механические и электроизоляционные свойства. Применяют в производстве трансформаторов, печатных плат, деталей радиоаппаратуры, втулок, шестерен и других изделий.

Стеклотекстолит — слоистый пластик на основе стеклоткани, пропитанной синтетической смолой. Механические и электрические свойства его близки к свойствам гетинакса, к тому же стеклотекстолит не боится нагрева, не впитывает влагу, легко подвергается шлифовке, фрезеровке, штамповке и другим механическим обработкам. Стеклотекстолит применяют для изготовления печатных плат и других изделий.

Фторопласты — синтетические термопластические полимеры. Стойкие к воздействию едких химических веществ, не меняют своих свойств при нагреве до $+400^{\circ}\text{C}$ и охлаждения до -80°C , не горят, не смачиваются водой и другими жидкостями. Имеют низкую поверхностную твердость, под нагрузкой деформируются и коробятся. Используют для изготовления изделий, работающих на высоких частотах.

Поливинилхлорид — полимерный материал. Отличается хорошими механическими и электроизоляционными свойствами, сравнительно невысокой термостойкостью. Применяют для изоляции проводов.

Полистирол — полимерный материал с высокими диэлектрическими свойствами. Стоек к воздействию воды, кислот, щелочей, является хрупким и горючим материалом. Применяют для изоляции жил кабелей, для изготовления каркасов катушек, ручек, клавишей радиоаппаратуры и других изделий.

Органическое стекло — синтетический полимер, твердый и светопрозрачный. Хорошо обрабатывается механически, растворяется в дихлорэтаноле, бензоле и др. Из оргстекла изготовляют шкалы приемников и измерительной аппаратуры, корпуса малогабаритной аппаратуры и т. д.

Лаки — это растворы пленкообразующих веществ в органических растворителях. Используют для нанесения изоляции на провода.

К электроизоляционным материалам относятся также *слюда, резина, бумаги, лакобумаги, электроизоляционный картон* и другие материалы.

6. Магнитные материалы

Проходящий по проводнику электрический ток создает вокруг него магнитное поле. Это поле можно обнаружить по действию на находящиеся в нем магнитные стрелки, проводники с током или движущиеся заряженные частицы.

Для характеристики магнитного поля введена величина, называемая *магнитной индукцией* (B). Эта величина векторная. Направление вектора магнитной индукции \vec{B} совпадает с направлением, по которому устанавливается северный полюс расположенной в магнитном поле магнитной стрелки.

О величине магнитной индукции судят по величине силы, действующей на расположенный в нем проводник с током.

К магнитным материалам относят такие, в которых происходит значительное увеличение индукции магнитного поля B по сравнению с индукцией магнитного поля в вакууме B_0 , в которое они помещаются. Основными из них являются железо, никель,

кобальт и сплавы с содержанием железа. Физической величиной, характеризующей увеличение индукции магнитного поля в магнитном материале, является *относительная магнитная проницаемость* $\mu = B/B_0$. Для некоторых материалов значения μ могут составлять несколько сотен и даже сотни тысяч. Эти магнитные материалы называют *ферромагнитными* или *ферромагнетиками*. Если внутрь катушки поместить ненамагниченный сердечник из ферромагнетика и исследовать зависимость индукции магнитного поля катушки от протекающего по ее обмоткам тока, то обнаруживается (рис. 2, а) вначале быстрое увеличение индукции магнитного поля по мере возрастания тока, а в дальнейшем увеличение тока почти не оказывает влияния на значение B . Говорят, что ферромагнетик намагнитился до насыщения. Если изменение индукции магнитного поля в сердечнике катушки под действием протекающего по ней тока происходит в соответствии с кривой 1 (рис. 2, б) и достигнуто намагничение сердечника до насыщения, то при уменьшении тока в катушке значение индукции магнитного поля в сердечнике будет отражать кривая 2, а не кривая 1. При отсутствии тока сердечник окажется намагниченным, индукция магнитного поля в нем будет равна $B_{ост}$. Размагнитится сердечник при токе противоположного по сравнению с первоначальным направления. Увеличение протекающего в противоположном направлении тока вызовет намагничение сердечника до насыщения. Если ток противоположного направления уменьшать, а затем изменить его направление на первоначальное, зависимость между индукцией магнитного поля и током будет отражать кривая 3 (рис. 2, б).

График, проходящий через точки $B_{нас}$, $B_{ост}$, $-i_p$, $-B_{нас}$, $-B_{ост}$, $+i_p$, называют *петлей гистерезиса*.

Различают *магнитно-твердые* и *магнитно-мягкие* материалы. В магнитно-твердых материалах после прекращения тока в катушке сохраняется сильное магнитное поле, они остаются сильно

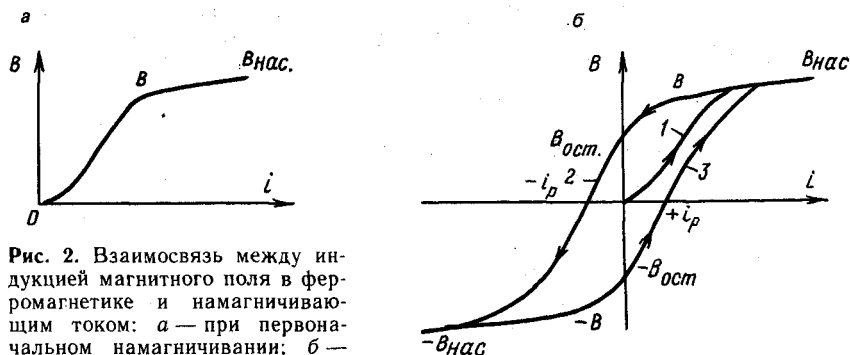


Рис. 2. Взаимосвязь между индукцией магнитного поля в ферромагнетике и намагничивающим током: а — при первоначальном намагничивании; б — при изменениях величины и направления намагничивающего тока

намагниченными. К магнитно-твердым материалам относятся сплавы железа с углеродом, железа с никелем, алюминием, кобальтом. Из таких материалов изготавливают постоянные магниты.

Магнитно-мягкие материалы после исчезновения внешнего магнитного поля сохраняют слабое намагничение. К магнитно-мягким материалам относятся специальные сорта стали, пермаллои, альсиферы, карбонильное железо, ферриты, магнитодиэлектрики.

Магнитно-мягкая сталь является сплавом железа с кремнием при небольшой добавке (не более 0,08 %) углерода. Выпускают в виде листов и лент толщиной 0,05...1,0 мм.

Пермаллой — железоникелевый сплав с содержанием никеля 36...80 %.

Альсифер содержит алюминий (5...15 %), кремний (9...10 %) и железо (остальная часть). Из этих материалов изготавливают магнитопроводы трансформаторов.

Карбонильное железо представляет собой спрессованный порошок чистого железа, зерна которого имеют сферическую форму диаметром 1...8 мкм.

Ферриты изготавливают путем прессования и спекания при высокой температуре порошкообразных смесей, состоящих из оксидов железа и специально подобранных оксидов других металлов, например оксида цинка, оксида никеля и др.

Магнитодиэлектрики — это спрессованные материалы, состоящие из порошкообразного пермаллоя, карбонильного железа или альсифера с добавлением полистирола, бакелитовых смол, жидкого стекла или другого диэлектрика. Материалы эти используют для изготовления сердечников катушек, по обмоткам которых протекают токи высокой частоты.

7. Обмоточные и монтажные провода

Обмоточные провода предназначены для выполнения различных катушек. Они делятся на две группы: из материала с малым удельным сопротивлением, в основном из меди, и из материала с большим удельным сопротивлением. Медные обмоточные провода применяют для выполнения обмоток трансформаторов, дросселей, катушек контуров, электромагнитных реле и т. д. Они имеют эмалевое покрытие или изоляцию из волокна, может быть и комбинированная изоляция (эмаль и волокно). Эти провода могут быть однопроволочными или многопроволочными. Обмоточные провода большого сопротивления изготавливают из константана, манганина, нихрома. Их применяют для намотки проволочных резисторов, шунтов, спиралей нагревателей, катушек дросселей и обмоток реле.

Медная жила обмоточных проводов имеет диаметр от 0,02 до 2,5 мм. Маркировка проводов начинается с буквы П — провод. Затем следуют буквы, указывающие вид изоляции: ЭЛ — эмаль лаковой; ЭВ — эмаль высокопрочная; ЭТ — эмаль теплостойкая полиэфирная; ЭВТЛ — эмаль полиуретановая (не требует зачистки при лужении); ЭЛР — эмаль полиамиднорезольная; Б — хлопчатобумажная пряжа; Ш — натуральный шелк; ШК или К — искусственный шелк или капрон; С — стекловолокно; А — асбестовое волокно. После обозначения изоляции следуют

буквы О или Д или цифры 1, 2, соответствующие одному или двум слоям изоляции. В конце обозначения ставят буквы (А — для алюминиевых обмоточных проводов или буквы, характеризующие материал обмоточных проводов большого сопротивления: К — константан, М — манганин, НХ — нихром). Например, ПЭЛ — провод, изолированный лаковой эмалью; ПЭВ-2 — провод, изолированный высокопрочной эмалью в два слоя; ПЭЛШО — провод, изолированный лаковой эмалью и обмоткой из натурального шелка в один слой.

Монтажные провода — это провода, применяемые для выполнения соединений в электро- и радиоэлектронной аппаратуре; бывают *жесткими* и *гибкими*. Жесткие провода содержат токопроводящую жилу в виде одного провода, у гибких — токопроводящая жила многопроводная. Провода жил изготавливают из меди, покрывая их поверхность слоем олова, серебра, а в некоторых случаях — золота.

Для монтажа могут применяться как изолированные, так и неизолированные провода. Для изоляции проводов используют поливинилхлорид, резину, стекловолокно и др. Изоляция может быть комбинированной, состоящей из двух и больше слоев изоляционного материала. Для защиты монтажных проводов от внешних электрических полей, помех и механических воздействий применяют экранирующие «чулки» и шланги, изготавливаемые в виде плетенки из тонкой луженой медной проволоки.

Электрические свойства монтажных проводов зависят от сечения токопроводящей жилы, ее материала и материала изоляции, а также от условий эксплуатации (влажность и температура окружающей среды, наличие химических веществ и т. д.). Сечение жил монтажных проводов может быть 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1; 1,5 и 2,5 мм².

Маркируют монтажные провода тремя — пятью начальными буквами соответствующих слов. Например, ПМП — провод монтажный, изолированный полиэтиленом, однопроволочный; ПМВ — провод монтажный, изолированный поливинилхлоридом, однопроволочный; ПМВГ — провод монтажный, изолированный поливинилхлоридом, гибкий, многопроволочный; ПМОВГ — провод монтажный, изолированный обмоткой из хлопчатобумажной пряжи, гибкий; МГШД — провод монтажный, гибкий, изолированный шелком с двухслойной обмоткой.

8. Радиочастотные кабели

Для передачи энергии электрических колебаний на расстояние применяют *радиочастотные кабели*. Это один или несколько изолированных проводников (токопроводящих жил), заключенных в защитную (обычно герметичную) оболочку. Кабели бывают *двухпроводными* симметричными и *коаксиальными*. Двухпроводный кабель состоит из двух изолированных проводников одинакового диаметра. Коаксиальный кабель имеет внутренний и внеш-

ний проводники. Оба проводника разделены слоем воздушно-полиэтиленовой изоляции. Внутренний проводник может быть однопроволочным и многопроволочным. Внешний проводник выполняют в виде экранирующей оплетки из проволоки или гладкой (гофрированной) тонкостенной трубки и заключают в защитную оболочку (гибкий шланг).

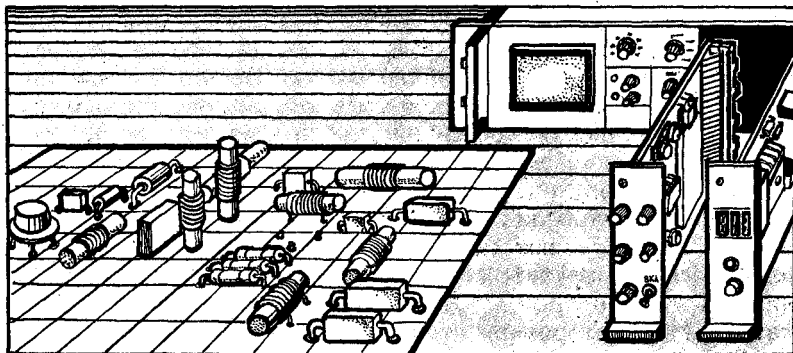
Изоляция внутри может быть сплошной, полувоздушной или воздушной. В кабелях с полувоздушной изоляцией на проводящую жилу надевают колпачки из полистирола, керамики или пластмассовой трубки, с воздушной — устанавливают шайбы из диэлектрика, которые нанизывают на проводящую жилу и располагают на некотором расстоянии друг от друга.

Основные электрические характеристики радиочастотных кабелей — *рабочий диапазон частот, волновое сопротивление и допустимый коэффициент затухания*. Рабочий диапазон частот кабеля указывает, при каких частотах переменного тока возможна передача энергии по кабелю. Волновое сопротивление — это отношение наибольшей величины (амплитуды) подводимого переменного напряжения к наибольшей величине (амплитуде) переменного тока вдоль кабеля. Волновое сопротивление двухпроводного кабеля зависит от расстояния между проводами и диаметра проводов линии, а коаксиального — от диаметра оболочки и диаметра центральной жилы. Коэффициент затухания характеризует потери в кабеле.

Маркировка кабеля — буквенно-цифровая. Первый элемент маркировки — две буквы (РД — кабель радиочастотный двухпроводный, РК — радиочастотный коаксиальный); второй — число из двух или трех цифр — указывает волновое сопротивление кабеля; третий — диаметр по изоляции кабеля; в конце обозначения стоит число из двух цифр: первая цифра указывает тип изоляции (1 — полиэтилен, 3 — полистирол и т. п.), вторая — порядковый номер конструкции кабеля. Например, РК-75-4-15 — кабель радиочастотный коаксиальный с волновым сопротивлением 75 Ом, диаметр по изоляции 4 мм, изоляция из полиэтилена, пятый номер конструкции.

Вопросы и задания

1. Назовите основные проводящие и электроизоляционные материалы и дайте краткую характеристику их свойств. 2. Какие сплавы металлов называют припоями? Назовите известные вам разновидности припоев и укажите их свойства. 3. Какие провода называют монтажными? обмоточными? Как их маркируют? 4. Какие кабели называют радиочастотными? Назовите их разновидности. 5. Какие материалы называют магнитными? магнитно-твердыми? магнитно-мягкими? Назовите их разновидности.



Глава III

ЭЛЕМЕНТЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

9. Общие сведения об элементах радиоэлектронных цепей

Передача, прием, преобразование и обработка информации с использованием электромагнитной энергии ведется посредством радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), включающей различные радиоэлектронные цепи, предназначенные для выполнения определенных функций. Функциональные узлы и устройства РЭА образуются из отдельных элементов, соединенных в некоторой последовательности. Все элементы (радиокомпоненты) этих цепей делят на *активные* и *пассивные*.

Активными называют те элементы, в которых преобразование электрических сигналов сопровождается увеличением их мощности. К ним относятся диоды, транзисторы, тиристоры, электронные лампы и другие. В цепях с пассивными элементами преобразование электрических сигналов всегда сопровождается уменьшением мощности сигналов. Пассивные элементы подразделяются на резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы, переключатели, реле и соединители.

10. Резисторы

Резисторы обладают определенным сопротивлением. Сопротивление резистора может быть нерегулируемым (постоянные резисторы) или регулируе-

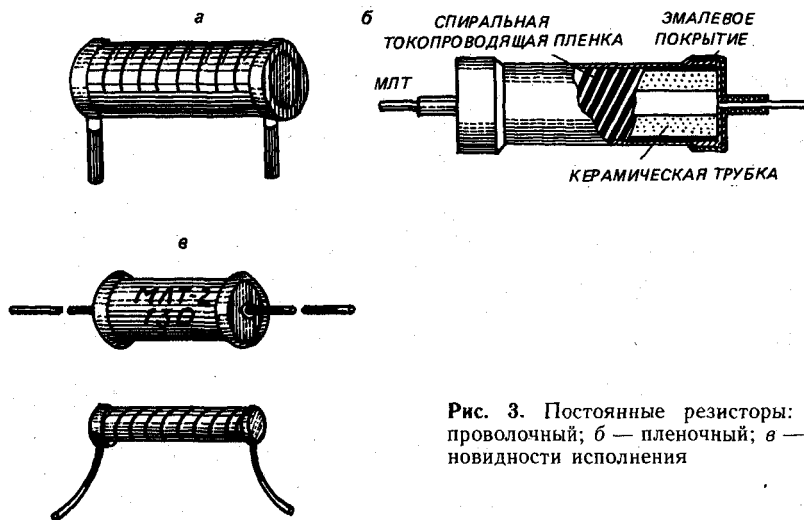


Рис. 3. Постоянные резисторы: а — проволочный; б — пленочный; в — разновидности исполнения

мым (переменные и подстроечные резисторы). Проводящим материалом в них может быть провод (рис. 3, а) высокого сопротивления (проволочные резисторы) или тонкий слой вещества (рис. 3, б) с большим удельным сопротивлением (непроволочные резисторы) в виде углеродистой, металлической или композиционной (смесь нескольких веществ) пленки.

Непроволочный резистор переменного сопротивления (рис. 4) состоит из пластмассового корпуса 1, на котором располагается токопроводящая пластина 2. Для регулировки сопротивления резистора служит подвижная часть 5, изготовленная из текстолита и укрепленная на оси 4. На подвижной части установлен проволочный контакт 6, прижимающийся к токопроводящей пластине. Концы токопроводящей пластины и подвижный контакт соединены с выводами 3, к которым подключены соединительные провода цепи. Применяются также плоские непроволочные резисторы. Скользящий контакт в них перемещается вдоль проводящей плоскости, а не вокруг оси.

Основные характеристики резисторов — номинальное сопротивление, предельное рабочее напряжение, температурный коэффициент сопротивления и номинальная мощность. Номинальное сопротивление — это сопротивление резистора, на которое он рассчитан. Фактическое сопротивление резистора отличается от номинального. Поэтому указывается до-

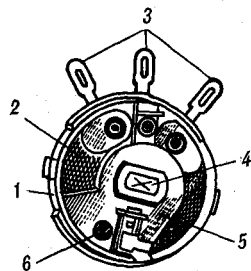


Рис. 4. Конструкция непроволочного резистора переменного сопротивления

пустимое отклонение сопротивления резистора. Это отклонение нормировано и для обычных резисторов составляет от ± 2 до 30 %.

Предельным рабочим напряжением называют максимально допустимое напряжение между выводами резистора, при котором обеспечивается его надежная работа.

Температурный коэффициент сопротивления характеризует относительное изменение сопротивления резистора при изменении температуры на 1 °С. Выражается в процентах.

Номинальная мощность — это максимальная мощность, которую в состоянии рассеять резистор. Эта характеристика зависит от материала, из которого изготовлен резистор, и размеров. В радиоэлектронной аппаратуре применяют резисторы с номинальной мощностью рассеяния 0,01, 0,025, 0,05, 0,125, 0,25, 0,5, 1,0, 2,0 Вт и больше.

Единицы измерения сопротивления резисторов указывают по специальному коду: Е — омы, К — килоомы, М — мегаомы. Если номинальное сопротивление выражено целым числом, обозначение единицы измерения ставят после него (56 Ом — 56 Е, 27 кОм — 27 К, 10 МОм — 10 М); если целым числом с десятичной дробью, то вместо запятой после целого числа ставят обозначение единицы измерения (4,7 кОм — 4К7, 5,6 МОм — 5М6); если десятичной дробью, меньшей единицы, то вместо нуля целых и запятой впереди цифры ставят буквенное обозначение единицы измерения (0,12 МОм — М12).

Допустимые отклонения сопротивления (% от номинального) обозначают соответствующей буквой: Р — ± 1 %, Л — ± 2 %, И — ± 5 %, С — ± 10 %, В — ± 20 %, Ф — ± 30 %.

Кодированное обозначение резистора, например, сопротивлением 560 Ом и допустимым отклонением ± 1 записывается К56Р.

Принятая ранее маркировка резисторов отражала их особенности и обычно состояла из трех букв: первая буква обозначала вид проводящего материала, вторая — вид защиты, третья — особые свойства резистора, его назначение.

Затем была введена буквенно-цифровая система обозначений. Буква обозначает группу изделий (С — резисторы постоянные, СП — резисторы переменные); цифра — разновидности резистора в зависимости от токопроводящего материала (1 — непроволочные тонкослойные углеродистые и бороуглеродистые, 2 — непроволочные тонкослойные металлодиэлектрические и металлооксидные, 3 — непроволочные композиционные пленочные; 4 — проволочные композиционные объемные, 5 — проволочные, 6 — непроволочные тонкослойные металлизированные); двузначное число, стоящее после цифры через дефис, — регистрационный номер.

Для постоянных резисторов указывают сопротивление и его отклонение от номинала. Например, С2-33 5К1С — резистор постоянный металлооксидный, регистрационный номер (конструк-

тивный вариант) 33, сопротивление 5,1 кОм, допустимое отклонение сопротивления от номинала 10 %.

Для переменных резисторов после регистрационного номера указывают номинальную мощность резистора и ставят букву, характеризующую зависимость величины сопротивления между неподвижным и подвижным контактами от угла поворота оси (А — линейная, Б — логарифмическая, В — обратно логарифмическая), а дальше следует обозначение сопротивления и отклонения его от номинала. Например, СПЗ-9а0,5А4М7В — резистор переменный непроволочный, пленочный, композиционный, регистрационный номер (вариант конструкции) 9а, номинальная мощность 0,5 Вт, линейная зависимость сопротивления от угла поворота оси, сопротивление 4,7 МОм, отклонение от номинала ± 20 %.

В 1980 г. введена новая система сокращенных условных обозначений резисторов. Первый элемент — буква или сочетание букв для обозначения подкласса резисторов (Р — постоянные резисторы; РП — резисторы переменные, НР — наборы резисторов); второй — число, обозначающее группу резисторов по разновидности проводящего материала (1 — непроволочные, 2 — проволочные); третий (записывается через дефис) — регистрационный номер данного типа резистора. Например, Р1-26 — резистор постоянный, непроволочный, регистрационный номер 26.

Резисторы применяют в качестве нагрузки в радиоэлектронных устройствах, для подачи напряжений определенной величины, ограничителей тока и т. д.

11. Конденсаторы

Конденсатор является пассивным элементом электрической цепи, предназначенным для накопления электрических зарядов.

Любой конденсатор включает две обкладки из проводящего материала, разделенные слоем диэлектрика. Диэлектрик может быть газообразным, твердым или жидким. Простейший конденсатор можно представить (рис. 5) состоящим из двух пластин 2 и тонкого слоя диэлектрика 3 между ними. С каждой из пластин соединены выводы 1.

Способность конденсатора накапливать электрические заряды характеризует его емкость C — величина, определяемая как отношение заряда на обкладках конденсатора Q к напряжению между обкладками U_c :

$$C = \frac{Q}{U_c}.$$

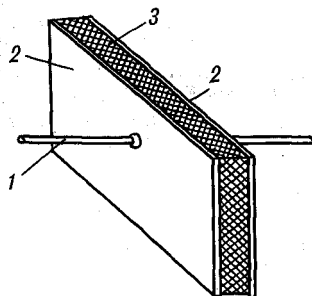


Рис. 5. Устройство простейшего конденсатора

Емкость конденсатора зависит от размера пластин, расстояния между ними, их взаимного расположения, свойств диэлектрика между пластинами. Для конденсатора в виде двух параллельных пластин (плоский конденсатор) емкость пропорциональна площади пластин S , диэлектрической проницаемости среды между пластинами ϵ и обратно пропорциональна расстоянию между пластинами d :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}.$$

Емкость конденсатора измеряют в фарадах (Ф). Фарад — это емкость такого конденсатора, в котором накапливается заряд в 1 Кл при напряжении между обкладками 1 В:

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

Фарад является большой единицей емкости. Поэтому для измерения емкости конденсаторов используют доли фарада: 1 микрофарад (мкФ) = 10^{-6} Ф, 1 нанофарад (нФ) = 10^{-9} Ф, 1 пикофарад (пФ) = 10^{-12} Ф.

Конденсаторы бывают *постоянной* емкости (нерегулируемые), *переменной* емкости (переменные и полупеременные, или подстроечные) и *саморегулируемые*. В качестве диэлектрика применяется специальная конденсаторная бумага, металлизированная бумага, синтетическая пленка, конденсаторная керамика, оксиды полупроводниковых материалов, оксид алюминия, слюда, стекло и другие материалы.

В зависимости от применяемых материалов, требуемой емкости конденсаторов и их назначения конденсаторы бывают различной конструкции.

Конденсаторы большой емкости с диэлектриком из бумаги

или пленки имеют *рулонную* конструкцию. Фольговые обкладки, разделенные бумагой или пленкой, свертывают в рулон (рис. 6, а). Для увеличения емкости рулоны упаковывают в металлический корпус (рис. 6, б) и соединяют параллельно.

Рулонная конструкция применяется также в электролитических конденсаторах. В них одна обкладка — алюминиевая фольга, вторая — пористая бумага, пропитанная электролитом, или электролит. Диэлектрик

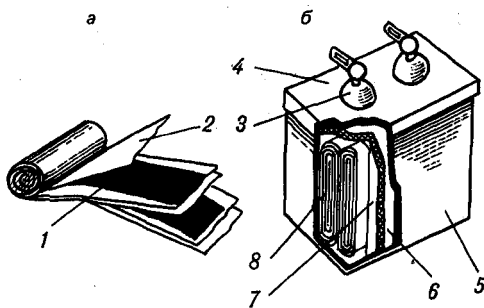


Рис. 6. Бумажный конденсатор: а — секция конденсатора (1 — фольга, 2 — бумага); б — конструкция (3 — стеклянный изолятор, 4 — крышка, 5 — корпус, 6 — картонная прокладка, 7 — оберточная бумага, 8 — секция конденсатора)

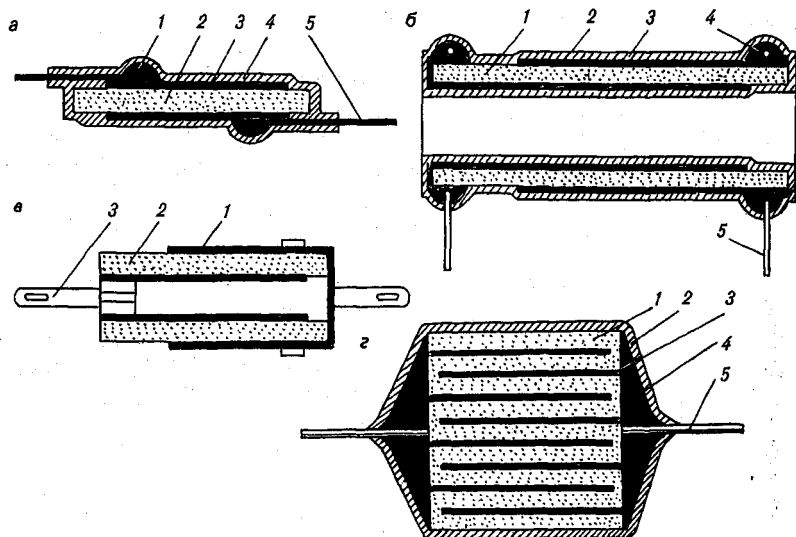


Рис. 7. Керамические конденсаторы: а — дисковый (1 — пайка, 2 — керамическая пластина, 3 — обкладка, 4 — эмалевое покрытие, 5 — выводы); б — трубчатый (1 — керамическая трубка, 2 — наружная обкладка, 3 — эмалевое покрытие, 4 — пайка, 5 — выводы); в — трубчатый проходной (1 — металлическое покрытие, 2 — керамическая трубка, 3 — выводы); г — литой секционный (1 — литой керамический блок, 2 — эмалевое покрытие, 3 — прорезь с обкладкой, 4 — пайка, 5 — выводы)

конденсатора — тонкий слой оксида алюминия на поверхности фольги. Электролит обеспечивает сохранность оксида. Поскольку толщина диэлектрика (оксида) мала, электролитические конденсаторы обладают большой емкостью (десятки, тысячи мкФ) при малых размерах.

Электролитические конденсаторы бывают полярными и неполярными. Полярные (они более распространены) включают так, что один из электродов обязательно соединяют с положительным полюсом источника тока, а второй — с отрицательным. Такие конденсаторы не могут применяться в цепях переменного тока.

Дисковую конструкцию (рис. 7, а) применяют при изготовлении конденсаторов небольшой емкости ($1 \div 10$ пФ). В качестве диэлектрика используют керамику. Для образования пластин на поверхность керамики наносят слой металла путем его напыления или вжигания.

Чтобы увеличить емкость керамических конденсаторов, их выполняют трубчатыми (рис. 7, б). Разновидность трубчатых конденсаторов — проходные. Их устанавливают при прохождении провода питания цепей через отверстие в корпусе изделия. Конденсатор крепят в отверстии корпуса. Провод проходит внутри трубки, и припаивают его к соединенному с внутренней обклад-

кой конденсатора лепестку. Внешнюю обкладку соединяют с корпусом.

Используя *литую секционированную* конструкцию (рис. 7, в), можно увеличить емкость керамических конденсаторов до тысяч пикофарад. В процессе производства такой конструкции конденсатора выполняют литье горячей керамики, наносят на поверхность образованных пластин серебряную пасту и вжигают ее. Отдельные секции образуемого конденсатора соединяют параллельно.

В случае применения диэлектрика в виде слюды, стеклоэмали, а в некоторых случаях и керамики применяют *пакетную* конструкцию конденсатора — образуется пакет из чередующихся пластин диэлектрика и напыленными на них металлическими обкладками. Промышленность выпускает керамические малогабаритные пакетные конденсаторы (тип КМ), образуемые путем прессования пакетов керамических пластинок толщиной около 0,2 мм. Для увеличения емкости конденсаторов используют диэлектрик с высоким значением диэлектрической проницаемости (тиконд, пьезо-керамика).

Конденсаторы переменной емкости (рис. 8) и подстроечные устроены так, что площадь взаимного перекрытия пластин можно изменять. В результате изменяется емкость конденсатора.

Имеются конденсаторы, на емкость которых оказывает влияние приложенное к ним напряжение, температура и другие условия. Разновидность конденсаторов, называемых *варикондами*, характеризуется зависимостью емкости от приложенного к ним напряжения. От величины напряжения зависит диэлектрическая проницаемость вещества между пластинами.

Все конденсаторы независимо от типа и назначения характеризуются определенными параметрами: номинальной емкостью, отклонением ее от номинала, рабочим напряжением и др.

На корпусах конденсаторов больших размеров указывают завод-изготовитель, тип конденсатора, номинальную емкость, допустимое отклонение емкости от номинала, рабочее напряжение,

месяц и год выпуска. На конденсаторах малых габаритов отмечают лишь номинальную емкость, допустимое отклонение емкости от номинала и рабочее напряжение.

Для обозначения типа и назначения конденсаторов разработана буквенно-цифровая система обозначения.

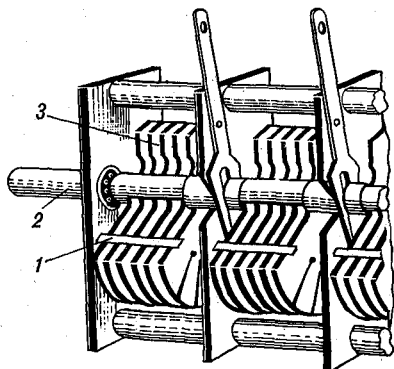


Рис. 8. Устройство конденсатора переменной емкости (1 — подвижные пластины, 2 — ось, 3 — неподвижные пластины)

В конденсаторах постоянной емкости первый элемент обозначения — буква К — конденсатор постоянной емкости; второй — вид диэлектрика (керамика — К10, К15, стекло — К21, слюда — К31, бумага с фольговыми обкладками — К40, К41, бумажные с металлизированными обкладками — К42, электролитический конденсатор с фольговыми алюминиевыми обкладками — К50, танталовый или ниобиевый — К51, оксидно-полупроводниковый — К53, оксидно-металлический — К54, полистироловый с фольговыми и металлизированными обкладками пленочный — К70, К71, фторопластовый пленочный — К72, полиэтилентерефталатный — К73, К74, лакопленочный — К76); третий элемент — буква, указывающая назначение (П — для работы в цепях постоянного тока, Ч — для работы в цепях переменного тока); четвертый — число, определяющее вариант исполнения конденсаторов по виду диэлектрика. Например, К50-6 — конденсатор постоянной емкости электролитический алюминиевый, разработка шестая для печатного монтажа; К10П-1 — конденсатор постоянной емкости, керамический, предназначенный для работы в цепях постоянного тока, вариант исполнения первый.

В конденсаторах переменной емкости первый элемент обозначения — буквы КП, конденсаторах подстроечных — КТ; второй — цифра, обозначающая вид диэлектрика (2 — воздушный, 4 — твердый); третий — порядковый номер исполнения.

Емкость конденсатора обозначается числом и буквой, соответствующей единице емкости: П — пикофарад, Н — нанофарад, М — микрофарад. Записи 22П, 4П7, Н12, 5Н6, М5, 20М обозначают 22 пФ, 4,7 пФ, 0,12 нФ, 5,6 нФ, 0,5 мкФ, 20 мкФ.

Допустимое отклонение емкости конденсатора от номинала кодируется буквами (И — $\pm 5\%$, С — $\pm 10\%$, В — $\pm 20\%$, Ф — $\pm 30\%$).

12. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы

Катушка индуктивности — элемент электрической цепи, предназначенный для накопления энергии магнитного поля.

Вокруг проводника с током всегда существует магнитное поле, характеризующееся в каждой точке его определенным значением магнитной индукции. Магнитное поле тока усиливается, когда проводник свернут в виде спирали или когда из него намотана катушка.

Для создания магнитного поля затрачивается электрическая энергия, поступающая от источника питания. Эта энергия преобразуется в энергию магнитного поля.

Энергия магнитного поля катушки пропорциональна квадрату протекающего по катушке тока и величине, называемой *индуктивностью* катушки. Индуктивность катушки зависит от числа витков, площади витков, расстояния между витками, материала сердечника.

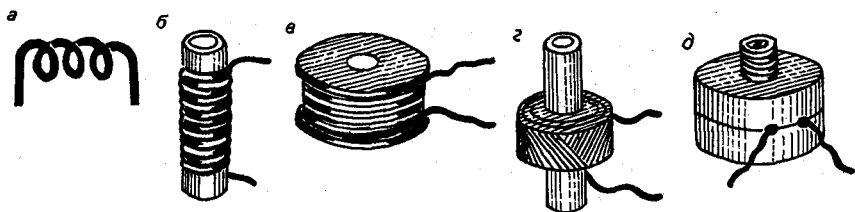


Рис. 9. Конструкция катушек: а — бескаркасная; б — однослойная с сердечником и сплошной намоткой; в — многослойная с намоткой «внавал»; г — многослойная с намоткой «универсаль»; д — с броневым сердечником

При замыкании цепи в катушке происходят изменения связанного с ней магнитного поля, в витках катушки индуцируется электродвижущая сила (ЭДС). Величина возникающей ЭДС пропорциональна индуктивности катушки и скорости изменения тока в ней. Когда ток в катушке увеличивается или уменьшается на 1 А за 1 с, при этом в катушке возникает ЭДС, равная 1 В, индуктивность такой катушки принимается равной 1 Гн.

Для измерения малых индуктивностей используют дробные единицы: 1 миллигенри (мГн) = 10^{-3} Гн, 1 микрогенри (мкГн) = 10^{-6} Гн, 1 наногенри (нГн) = 10^{-9} мкГн.

В радиоэлектронных устройствах используют катушки различных конструкций. Катушки являются составными элементами цепей, называемых *колебательными контурами*.

Катушки малой индуктивности — бескаркасные, однослойные, наматывают их достаточно толстым проводом (рис. 9, а). Большинство же катушек наматывают на каркас из диэлектрика (рис. 9, б). Намотка может быть рядовой, виток к витку, выполненной «внавал» (рис. 9, в), т. е. с любым возможным пересечением проводов, или быть типа «универсаль» (рис. 9, г), когда провода соседних слоев располагаются под прямым углом друг к другу.

Для увеличения индуктивности катушек их наматывают на ферритовые стержни или вводят сердечники внутрь каркасов. Сердечники внутри каркасов являются винтовыми, что позволяет плавно регулировать индуктивности катушек. Значительно увеличивается индуктивность катушки при применении броневых сердечников из феррита в виде цилиндрической коробки (рис. 9, д). Броневого сердечник образует в этом случае замкнутый магнитопровод, по которому замыкаются линии магнитной индукции. Индуктивность катушки можно регулировать перемещением сердечника.

Кроме контурных катушек, в радиоэлектронной аппаратуре широко применяются катушки, называемые *дресселями* высокой частоты. Эти катушки обладают малым сопротивлением постоянному току и большим сопротивлением переменному току высокой частоты. Для увеличения индуктивности их наматывают на ферритовые сердечники. Маркировка ферритов — буквенно-цифровая. Число в начале маркировки указывает, во сколько раз усиливается

магнитное поле катушки при введении ферритового сердечника. После него следуют буквы: НМ — низкочастотный марганцово-цинковый феррит на рабочую частоту около 100 кГц; НН — низкочастотный никель-цинковый или литий-цинковый феррит на рабочую частоту до нескольких МГц; ВЧ — высокочастотный феррит на рабочую частоту выше 2,5 МГц; СЧ — ферриты, предназначенные для работы на сверхвысоких частотах. После букв ставят цифры, указывающие особенности материала. Например, 2000НМ2, 400НН2, 13ВЧ1.

В цепях выпрямителей переменного тока применяют *трансформаторы* с сердечниками из листовой стали. Их устанавливают для связи между каскадами усилителей, на выходах усилителей для подключения динамических головок и т. д. В радиотехнике применяют многообмоточные трансформаторы. Магнитопроводы трансформаторов, работающих на высоких частотах, являются ферритовыми. Они могут быть стержневыми, Ш-образными (броневыми) или тороидальными. Площадь поперечного сечения магнитопровода зависит от мощности трансформатора. Чем больше мощность, потребляемая присоединяемым к трансформатору потребителем, тем большим должно быть сечение магнитопровода.

13. Механические переключатели, реле и соединители

Переключатели и реле предназначаются для изменения режимов электрических цепей путем их включений, отключений или переключений. Соединители служат для электрического соединения узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры.

Составные элементы переключателей — контактные пары и механизмы для их замыкания — размыкания. Контакты бывают прижимные и притирающиеся, механизмы замыкания — размыкания в зависимости от способа действия делятся на *нажимные* (кнопочные и клавишные), *перекидные* (тумблеры) и *галетные*.

Выключатели предназначаются для подключения или отключения одной или нескольких цепей. Кнопочные выключатели (рис. 10, а) содержат приводной элемент в виде кнопки, систему контактов, пружину для возврата контактов в исходное состояние и механизм фиксации. При первом нажатии на кнопку происходит изменение положения подвижных контактов и их фиксация, второе нажатие вызывает возврат контактов в исходное состояние.

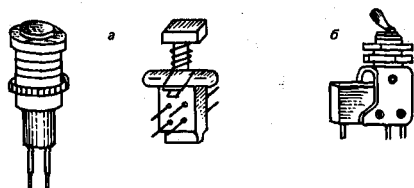


Рис. 10. Механические переключатели: а — кнопочные; б — тумблер

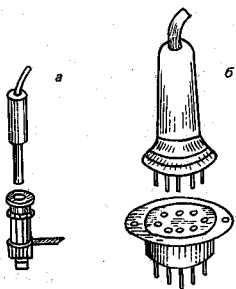


Рис. 11. Соединители: *а* — вилка-гнездо; *б* — круглой формы

В клавишных выключателях замыкание или размыкание контактов происходит в результате перемещения приводного механизма в виде рычага, на одном из концов которого крепится клавиша.

Перекидной выключатель, или тумблер (рис. 10, б), в качестве приводного элемента содержит рычаг и пружину, которая обеспечивает быстрое размыкание одной пары контактов и замыкание другой, а также фиксацию выключателя в установленном состоянии.

Если необходимо одновременно отключить одни цепи и присоединить к ним другие, применяют переключате-

ли. Переключатели с кнопочным или рычажным приводным механизмом содержат такую же систему перемещения контактов, как и выключатели. Отличие — схема соединения контактов.

Галетные переключатели имеют неподвижные контакты, один подвижный, которые соединяются в результате поворота оси переключателя, и механизм фиксации положения рычага в определенных положениях.

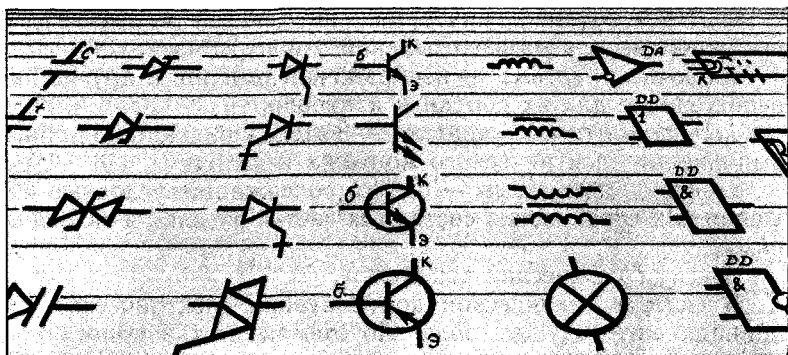
Электромагнитные реле — это переключатели, приводимые в действие током. Реле включает катушку с ферромагнитным сердечником, якорь и группу контактов.

Соединители (разъемы) состоят из вилок и розеток в виде штырей и гнезд, размещаемых в основаниях из диэлектрика. Каждая вилка и розетка образуют контактную пару. Простейший соединитель (рис. 11, а) содержит одну вилку и одну розетку. В большинстве случаев разъемы содержат до нескольких десятков вилок и розеток и имеют круглую (рис. 11, б) или прямоугольную форму.

Основные характеристики переключающих устройств — переходное сопротивление контактов, т. е. сопротивление при их соприкосновении ($0,01 \dots 0,5$ Ом в зависимости от типа устройства), предельно допустимые переключаемые токи ($10^{-6} \dots 5$ А), напряжение ($0,01 \dots 600$ В) и мощность ($10 \dots 600$ Вт), износостойкость по числу переключений ($5000 \dots 500\,000$).

Вопросы и задания

1. Какие элементы цепи называют пассивными? активными?
2. Каково назначение резисторов? конденсаторов? катушек индуктивности? дросселей? переключателей?
3. Какими величинами характеризуются резисторы?
4. Как шифруются обозначения резисторов?
5. Какая величина называется емкостью конденсатора? Какими единицами она измеряется?
6. Назовите известные вам конструкции конденсаторов. Каково их устройство?
7. Назовите систему условных обозначений конденсаторов.
8. Перечислите известные вам конструкции катушек индуктивности.
9. Какими единицами измеряется индуктивность катушек?
10. Каково назначение выключателей? реле? переключателей? соединителей?
11. Какими основными величинами характеризуются переключатели?



Глава IV

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ. СТАНДАРТЫ

14. Конструкторские документы

Создание изделий радиоэлектронной аппаратуры начинается с конструирования — выбора и отражения в технической документации структуры, размеров, формы проектируемого изделия, внутренних связей в нем, материалов для его изготовления. В процессе конструирования создаются графические и текстовые документы. Они определяют состав и устройство изделия и содержат все необходимые данные для его разработки или изготовления, контроля, приемки, эксплуатации и ремонта.

Под термином «изделие» понимают любой предмет или набор предметов, которые изготовляют на предприятии. Различают несколько видов изделий:

деталь — изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала, без применения сборочных операций;

сборочная единица — изделие, составные части которого должны быть соединены между собой на предприятии-изготовителе;

комплекс — два и более изделий, каждое из которых состоит из двух или большего числа частей, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций;

комплект — два и более изделий, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но имеющих общее эксплуатационное назначение вспомогательного характера.

Графическими конструкторскими документами являются:

чертежи деталей — изображения деталей и другие данные, необходимые для их изготовления и контроля;

сборочные чертежи — изображения изделий и другие данные, необходимые для их сборки и контроля;

электромонтажный чертеж — чертеж, содержащий данные для выполнения электрического монтажа изделия;

электрические схемы — схемы, содержащие условные изображения или обозначения составных частей изделия и связей между ними;

другие графические документы.

В системе технической документации электрическим схемам принадлежит ведущая роль. По схемам можно понять принцип работы устройства, определить его состав и вести монтажные и ремонтные работы. В зависимости от назначения электрические схемы подразделяются на четыре группы: *структурные, принципиальные, схемы соединений и схемы расположения*.

На электрических структурных схемах показывают, из каких элементов, узлов, или функциональных частей, состоит изделие, какие взаимосвязи существуют между ними. Они отражают состав аппаратуры в общих чертах. Функциональные части изображают на схемах прямоугольниками (**рис. 12**) или условными графическими обозначениями узлов. В прямоугольниках располагают надписи, указывающие название узла, его тип, обозначение.

На *принципиальных* электрических схемах (**рис. 13**) представляют все элементы радиотехнического изделия и связи между ними. Элементы на схеме изображают в виде условных графических обозначений в соответствии с ГОСТом. Каждый элемент изделия имеет свое позиционное обозначение, содержащее буквенное обозначение и порядковый номер. Нумеруют элементы в направлении сверху вниз и слева направо. Буквенные обозначения составлены из начальных букв названия элемента или характерных букв (*K* — реле, *C* — конденсатор, *R* — резистор и т. д.). Элементам присваивают порядковые номера в пределах группы элементов с одинаковыми позиционными обозначениями (например, *L1*, *L2* и т. д., *R1*, *R2*, *R3* и т. д.). Буквенно-цифровые позиционные обозначения должны быть одинаковых размеров. В отдельных случаях около условных обозначений элементов располагают сведения о них (например, значения сопротивлений резисторов, емкостей конденсаторов и т. д.).

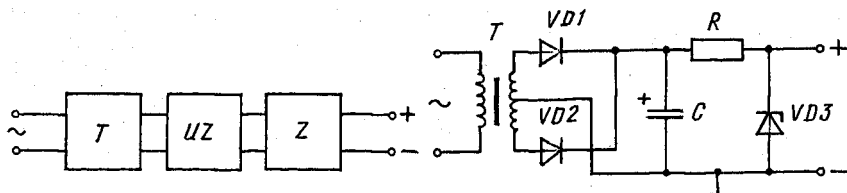


Рис. 12. Структурная схема

Рис. 13. Принципиальная электрическая схема

Электрическую принципиальную схему используют при изучении принципа действия изделия, в процессе наладки, регулировки, контроля и ремонта, при разработке других конструкторских документов.

Электрические схемы соединений отражают соединения составных частей изделия. Их условно подразделяют на схемы внешних соединений (соединения независимых функциональных блоков изделия, рис. 14) и схемы внутренних соединений (соединения элементов устройства и их коммутация). Провода, кабели, жгуты на таких схемах изображают отдельными линиями или для упрощения все провода, идущие в одном направлении, объединяют в общую линию, а при подходе к контактам каждый провод снова изображается отдельной линией.

Схемы *соединений* необходимы при составлении чертежей прокладки и крепления проводов, кабелей, жгутов, трубопроводов и т. д. Ими пользуются при выполнении подключений, контроля работы, ремонта.

Четвертую группу образуют схемы, *определяющие расположение* узлов, составных частей узлов, устройств, элементов, проводов, жгутов, кабелей и т. д. Эти схемы необходимы при наладочных и ремонтных работах.

15. Государственная система стандартизации и ее значение

Радиоэлектронная аппаратура представляет собой изделия, состоящие из большого числа взаимосвязанных элементов, изготовляемых из различных материалов. Сохранение требуемых параметров и характеристик аппаратов возможно при обеспечении надлежащих качеств и надежности комплектующих изделий, элементов, полуфабрикатов, материалов. С целью управления качеством как простых, так и сложных изделий независимо от отрасли промышленности устанавливаются единые показатели качества изделий, или, иначе, осуществляется их стандартизация. Это понятие связано с понятием термина «стандарт».

Стандарт — технический документ, который устанавливает нормы, правила, требования к объекту стандартизации. Стандарт характеризует изделие, процесс, правило, метод или средство производства определенными показателями. Показателями стандарта

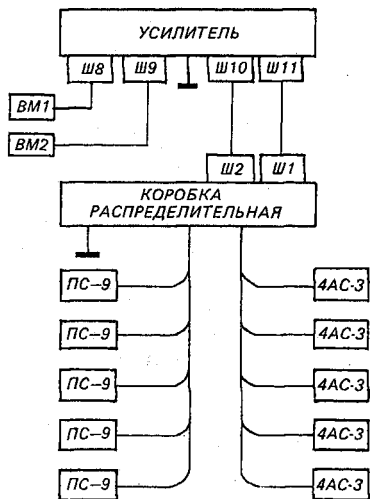


Рис. 14. Схема внешних соединений усилителя радиоприемника

могут быть размеры, химический состав, физические свойства, масса, эксплуатационные свойства (надежность, долговечность и др.) и т. д.

Стандарт может быть составлен в виде:

документа, содержащего ряд требований (норм), которые необходимо выполнить;

основной единицы или физической константы (например, единица тока — ампер);

какого-либо предмета для физического сравнения (например, метр);

образцового вещества, марки, знака и т. д.;

норм и правил для организации производства, методики испытаний, общетехнических предписаний и т. д.

Стандарты по радиоэлектронике изделия определяют технические условия на детали, узлы радиотехнических устройств, радиоизмерительные приборы, параметры и размеры выпускаемых радиодеталей, типы продукции и ее параметры, методику испытаний изделий, правила приемки, упаковки, хранения, транспортировки.

В зависимости от масштабов применения стандартов различают *национальную* и *международную стандартизацию*. Национальная стандартизация применяется в масштабах одного государства, международная распространяется на ряд государств.

В соответствии со сферами действия стандартов внутри нашей страны установлены категории стандартов: *государственные* (ГОСТ), *отраслевые* (ОСТ), *республиканские* (РСТ), *стандарты предприятий* (СТП).

Государственные стандарты действуют во всех отраслях народного хозяйства страны всех союзных республик согласно установленной сфере действия и условиям их применения. Государственные стандарты устанавливаются Советом Министров СССР, Государственным комитетом стандартов Совета Министров СССР, Госстандартом (объединяет ряд организаций по стандартизации) и другими компетентными органами.

Отраслевые стандарты действуют на предприятиях и в организациях определенной отрасли, являются обязательными для потребителей и заказчиков продукции этой отрасли. Они устанавливаются соответствующим министерством или ведомством, являющимся ведущим в производстве данного вида продукции.

Республиканские стандарты являются обязательными для всех предприятий и организаций республики независимо от их подчиненности. Они устанавливаются Советом Министров республики либо Госпланом республики по согласованию с Госстандартом СССР и ведущими министерствами.

Стандарты предприятий действуют только на самом предприятии, устанавливаются его администрацией. Они распространяются на детали, сборочные единицы, технологическую оснастку, технологические процессы, нормы, правила и требования, имеющие место на предприятии. Стандарты предприятия делятся на

ограничительные (определяют перечень изделий, типоразмеры, марки материалов и т. д., которые применяются на предприятии), дополняющие (дополняют государственные или отраслевые стандарты), оригинальные (создаются при отсутствии стандарта на объекты в государственном, отраслевом или республиканском стандартах).

Начало государственной стандартизации в нашей стране было положено в 1918 г., когда В. И. Ленин подписал декрет Совнаркома РСФСР «О введении международной метрической системы мер и весов». В 1924 г. при Главном экономическом управлении Всесоюзного совета народного хозяйства СССР было организовано Бюро промышленной стандартизации.

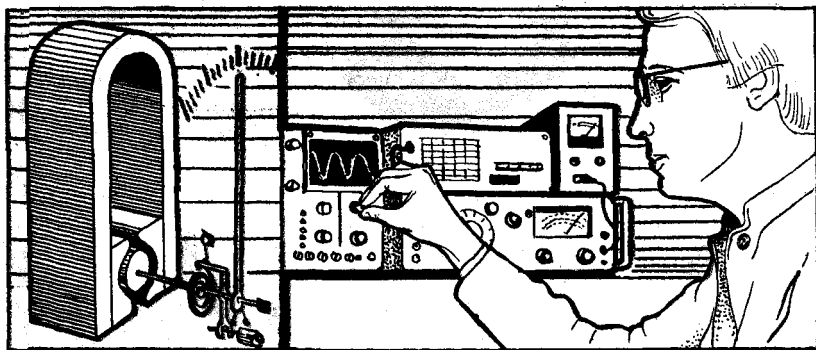
С 1 января 1970 г. в СССР действует *Государственная система стандартизации* (ГСС), обязательная для всех предприятий и организаций народного хозяйства СССР. Государственная система стандартизации — это комплекс взаимосвязанных правил и положений, которые определяют цели и задачи стандартизации; методику и организацию работ по стандартизации; органы и службы стандартизации в отраслях народного хозяйства СССР и союзных республик; порядок разработки, оформления, внедрения стандартов и контроль за их внедрением и соблюдением.

Одним из результатов применения стандартизации явилось упорядочение документации: конструкторской, технологической, нормативно-отчетной и др. В результате длительной работы в Советском Союзе с 1 января 1971 года была введена *Единая Система Конструкторской Документации* (ЕСКД). Она содержит комплекс стандартов, устанавливающих единый порядок разработки, выполнения, оформления, согласования, внесения изменений, учета и хранения конструкторской документации во всех отраслях промышленности, строительства и транспорта.

В 1970—1971 гг. была разработана *Единая Система Технологической Документации* (ЕСТД), определяющая единый порядок разработки, оформления и обращения технологической документации и порядок учета применимости деталей и технологической оснастки.

Вопросы и задания

1. В чем состоит конструирование радиоэлектронной аппаратуры? 2. Назовите известные вам конструкторские документы. 3. Что представляет собой электрическая схема? 4. Что такое стандарт? 5. Что представляет собой Государственная система стандартизации? 6. Назовите категории стандартов и области их применения. 7. Что представляет собой Единая Система Конструкторской Документации?



Глава V

ЭЛЕКТРО- И РАДИОИЗМЕРЕНИЯ

16. Электрические измерения. Погрешности измерений

Радиоэлектронные устройства будут работать нормально, если установленные в них резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, транзисторы и другие элементы исправны, значения характеризующих их величин соответствуют требуемым, а после изготовления устройства отлажены и настроены. В процессе налаживания узлов и устройства в целом устраняют обрывы в электрических цепях, обнаруживают и исправляют ненадежные контакты, измеряют токи и напряжения в цепях с диодами, транзисторами и другими элементами и ведут их регулировку, устанавливают требуемую частоту колебаний в контурах, проверяют, соответствует ли закон изменения напряжения или токов с течением времени в узлах аппаратуры требуемому, и выполняют ряд других операций. Эти проверки связаны с измерениями различных электрических величин: сопротивления, емкости, индуктивности, постоянных и переменных токов и напряжений, частоты электрических колебаний, формы колебания, т. е. законов изменений токов или напряжений с течением времени, и т. д. Измеряют величины с помощью измерительных приборов, измерительных установок и принадлежностей к ним.

В измерительном приборе под воздействием измеряемой величины возникает и фиксируется зависящий от нее сигнал измерительной информации. В стрелочных приборах воздействие измеряемой ве-

личины вызывает перемещение стрелки. Она устанавливается против определенного деления шкалы, которое соответствует значению измеряемой величины. В цифровых — значение измеряемой величины отображается цифрами на светящемся табло прибора.

Значение измеряемой величины устанавливается способом *прямых* или *косвенных* измерений. В процессе прямых измерений значение величины определяется непосредственно по показаниям прибора или путем сравнения величины с образцом ее или мерой. Косвенные измерения состоят в определении неизвестной величины по результатам измерения других величин. Например, сопротивление элемента цепи можно оценить в результате расчетов на основании закона Ома, если измерить напряжение на элементе и ток в его цепи.

При измерениях всегда допускается определенная погрешность и результат измерения величины не равен истинному ее значению. Точность измерений характеризуют абсолютной, относительной, приведенной погрешностями.

Абсолютная погрешность измерения Δx — это разность между измеренным и действительным значениями измеряемой величины ($\Delta x = x_{\text{изм}} - x$). Действительное значение измеряемой величины определяется как среднее значение результатов некоторого числа n измерений:

$$x = \frac{x_{\text{изм}1} + x_{\text{изм}2} + \dots + x_{\text{изм}n}}{n}.$$

Более полное представление о точности измерений дает сопоставление абсолютной погрешности измерения с измеряемой величиной. Такое сопоставление производится в процессе нахождения относительной погрешности измерения γ , определяемой отношением абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100 \, \%.$$

Поскольку значение x в процессе измерений точно определить нельзя, то на практике γ вычисляют как отношение абсолютной погрешности измерения к измеренному значению:

$$\gamma = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}} \cdot 100 \, \%.$$

Приведенная относительная погрешность измерения $\gamma_{\text{привед}}$ — отношение абсолютной погрешности измерения к предельному значению измеряемой прибором величины:

$$\gamma_{\text{привед}} = \frac{\Delta x}{x_{\text{пред}}}.$$

Предположим, что в процессе измерения тока миллиамперметром на 10 мА значение тока оказалось равным 6 мА, а абсолют-

ная погрешность измерения составила 0,15 мА. Тогда

$$\gamma = \frac{0,15}{6} \cdot 100 \% = 2,5 \%, \quad \gamma_{\text{привед}} = \frac{0,15}{10} \cdot 100 \% = 1,5 \%$$

Если известно приведенное значение относительной погрешности измерения для данного прибора, то по предельному значению измеряемой прибором величины можно определить абсолютную погрешность измерения: $\Delta x = \gamma_{\text{привед}} \cdot x_{\text{пред}}$.

В зависимости от значений приведенной относительной погрешности измерения для приборов установлены классы точности 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Значения классов точности приборов указывают на их шкалах.

17. Электроизмерительные приборы непосредственной оценки

Действие наиболее распространенных электроизмерительных приборов непосредственной оценки основано на возникновении в процессе измерений вращающего момента и вызванного им поворота подвижной части прибора. Особенности физических процессов, вызывающих появление вращающего момента, определяют деление приборов на *магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические* и др.

В магнитоэлектрическом приборе вращающий момент возникает в результате взаимодействия тока в катушке прибора с магнитным полем постоянного магнита. Перемещающийся элемент прибора — катушка.

Постоянный магнит 1 прибора (рис. 15) создает магнитное поле с большим значением индукции. Линии магнитной индукции замыкаются через магнитопровод 3, полюсные наконечники с цилиндрическими расточками 2 и цилиндрический сердечник 6. Между сердечником и полюсными наконечниками имеется воздушный зазор, в котором создается сильное магнитное поле. Линии магнитной индукции этого поля направлены по перпендикуляру к поверхности цилиндра. Катушка 4 прямоугольной формы, намо-

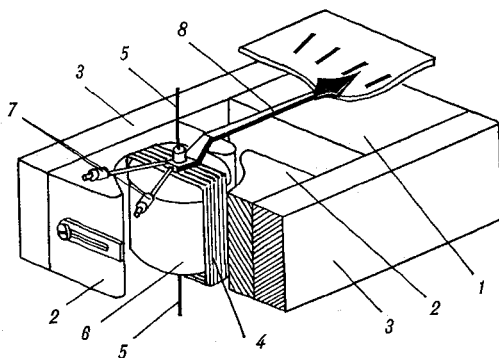


Рис. 15. Прибор магнитоэлектрической системы с внешним магнитом

танная тонким проводом на алюминиевом каркасе, охватывает сердечник и соединяется с полуосями 5, заостренные торцы которых устанавливают в специальных подпятниках. К полуосям крепятся две закрученные в противоположные стороны изолированные пружинки. С одной из полуосей соединена стрелка прибора 8 с уравнивающими грузиками 7.

Если ток в катушке отсутствует, стрелка прибора находится против нулевого деления шкалы. Прохождение тока по катушке прибора вызывает появление силы взаимодействия этого тока с магнитным полем. Возникает вращающий момент. Катушка и стрелка прибора поворачиваются. Пружины закручиваются и создают противодействующий момент. Стрелка устанавливается против определенного деления шкалы. Угол поворота стрелки пропорционален току в катушке.

Приборы магнитоэлектрической системы измеряют токи малой величины; имеют равномерную шкалу; могут быть выполнены как приборы высокого класса точности. Постоянный магнит в них создает сильное магнитное поле, и поэтому эти приборы нечувствительны к внешним магнитным полям.

Величинами, характеризующими прибор, являются ток полного отклонения $I_{\text{уп}}$, внутреннее сопротивление R и класс точности.

К магнитоэлектрическому прибору может быть присоединен преобразователь переменного тока в постоянный, и он может быть применен для измерений в цепях переменного тока. Приборы, содержащие в качестве преобразователя выпрямитель, называют детекторными.

Один из вариантов образования детекторного прибора показан на **рис. 16**. Сопротивление резистора R равно сопротивлению измерительного прибора. Когда прибор с диодами $VD1$, $VD2$ включается в цепь переменного тока, в течение одного полупериода ток идет через диод $VD1$ и прибор PA , в течение второго полупериода — по резистору R и через диод $VD2$. Отклонение стрелки прибора пропорционально среднему значению переменного тока.

Для преобразования переменного тока применяются также термоэлектрические преобразователи. Измерительный прибор с таким преобразователем называют **термоэлектрическим** (**рис. 17**). Термоэлектрический преобразователь состоит из нагревателя и миниатюрной термопары. Нагреватель — проводник из нихрома или константана, термопара — спаянные или сваренные проводники из металлов или сплавов металлов. По нагревателю проходит

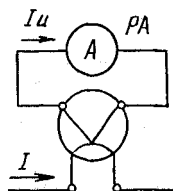


Рис. 16. Схема детекторного прибора

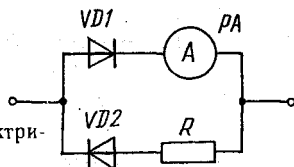


Рис. 17. Схема термоэлектрического прибора

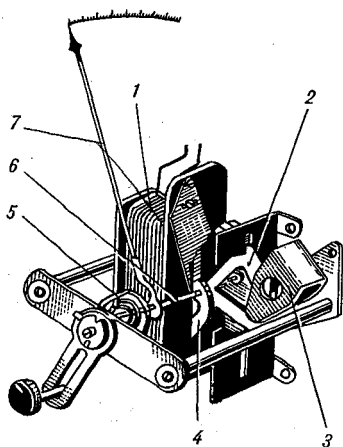


Рис. 18. Прибор электромагнитной системы

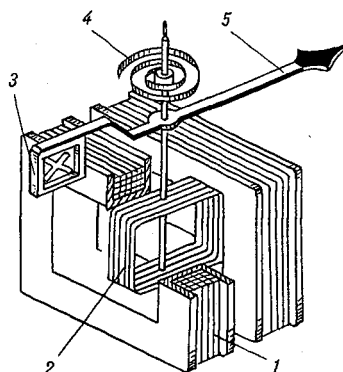


Рис. 19. Электродинамический прибор

измеряемый переменный ток и нагревает его. Одновременно нагревается контакт термодпары. На ее выводах появляется напряжение, в цепи термодпары и присоединенного к ней магнитоэлектрического прибора протекает ток. Величина тока зависит от температуры нагревателя, а следовательно, от величины измеряемого тока.

В приборах *электромагнитной* системы отклонение стрелки от положения равновесия возникает в результате взаимодействия магнитного поля катушки, по которой проходит ток, и железного сердечника. Катушка прибора может быть плоской или круглой. Наибольшее распространение получили приборы с плоской катушкой (рис. 18). Катушку 1 наматывают из медного провода. На специальной оси 6, торцы которой упираются в подпятники, закреплен сердечник 4. Когда по катушке прибора проходит ток, сердечник намагничивается и втягивается внутрь катушки. Ось поворачивается, закручивает пружину 5, и стрелка 7 устанавливается в определенном положении.

С осью подвижной системы прибора соединен алюминиевый лепесток 2. При повороте оси он перемещается в магнитном поле небольшого магнита 3. В лепестке наводится ток. Взаимодействие этого тока с магнитным полем создает тормозящий момент, что предотвращает колебания вращающейся системы.

Стрелка электромагнитного прибора отклоняется также в том случае, когда по катушке проходит переменный ток.

Электромагнитные приборы имеют невысокую чувствительность, неравномерную шкалу и невысокий класс точности.

Стрелка *электродинамического* прибора (рис. 19) отклоняется в результате взаимодействия токов, которые протекают по катушкам прибора. В приборе имеются две катушки. Катушка 1, состоящая из двух секций, неподвижная, катушка 2, закреплен-

ная на оси, является подвижной. С осью соединены стрелка 5, поршень успокоителя 3 и пружина 4.




Текущий по неподвижной катушке ток создает магнитное поле, в котором находится вторая катушка с током. Взаимодействие токов создает вращающий момент. Подвижная катушка поворачивается — и поворачивается стрелка прибора. Угол поворота пропорционален произведению тока первой катушки и тока второй катушки.

Электродинамические приборы пригодны для измерений тока, напряжения, мощности и других величин как в цепях постоянного тока, так и в цепях переменного тока. На точность показаний приборов этой системы сильное влияние оказывают внешние магнитные поля.

Электромагнитные и электродинамические приборы являются основными, применяемыми для измерения токов, напряжений, мощности и других электрических величин в цепях переменного тока промышленной частоты (50 Гц). Специальные разновидности этих приборов могут быть использованы при частотах токов до 2000 Гц. Однако такие приборы применяют сравнительно редко.

В таблице 1 даны условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов:

Таблица 1

Обозначение	Расшифровка
A	Амперметр
mA	Миллиамперметр
μA	Микроамперметр
V	Вольтметр
mV	Милливольтметр
μV	Микровольтметр
W	Ваттметр
Ω	Омметр
kΩ	Килоомметр
MΩ	Мегаомметр
Hz	Частотомер
φ	Фазометр
	Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой
	Электромагнитный прибор
	Электродинамический прибор

Обозначение	Расшифровка
	Детекторный прибор (с магнитоэлектрическим измерительным механизмом и полупроводниковым выпрямителем)
	Термоэлектрический прибор (с магнитоэлектрическим измерительным механизмом и изолированным термопреобразователем)
	Прибор предназначен для измерения в цепях только постоянного тока
	только переменного однофазного тока
	постоянного и переменного токов
	Прибор нормально работает при положении шкалы: вертикальном
	горизонтальном
	наклонном (угол наклона 60°)
	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ
	Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит
	Защита от внешних магнитных полей
	Защита от внешних электрических полей
	Внимание! Смотри дополнительные указания в паспорте и инструкции по эксплуатации
	Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам (знак красного цвета)

18. Расширение пределов измерения приборов. Измерение сопротивлений

Наибольший ток, который измеряют магнитоэлектрические приборы, не превосходит 50 мА. Для измерения больших токов к прибору магнитоэлектрической системы подключают *шунт*.

Шунт представляет собой проволочный резистор, имеющий малое сопротивление. Его включают параллельно прибору (рис. 20). Измеряемый ток протекает по катушке прибора (ток I_n) и через шунт (ток $I_{ш}$). Отношение токов I_n и $I_{ш}$ обратно пропорционально отношению сопротивлений прибора R_n и шунта $R_{ш}$:

$$I_n / I_{ш} = R_{ш} / R_n.$$

При этом

$$I = I_{ш} + I_n.$$

Поэтому
$$I = I_n \frac{R_n}{R_{ш}} + I_n = I_n \left(1 + \frac{R_n}{R_{ш}} \right).$$

При малых сопротивлениях шунта измеряемый ток I может быть во много раз больше тока измерителя I_n .

Для образования вольтметра на базе магнитоэлектрического прибора последовательно с ним включают добавочное сопротивление R_d (рис. 21), величина которого во много раз больше сопротивления катушки прибора R_n . Измеряемое напряжение равно падению напряжения на сопротивлениях R_d и R_n : $U = I_n(R_d + R_n)$. Отклонение стрелки прибора пропорционально измеряемому напряжению.

Преобразуя записанное равенство, можно получить соотношение для расчета значения добавочного сопротивления:

$$R_d = \frac{U}{I_n} - R_n.$$

Магнитоэлектрический прибор может быть применен для измерения сопротивлений. Принцип измерения сопротивлений основан на зависимости тока в его цепи от величины сопротивления при постоянном в цепи напряжении. Для измерения больших сопротивлений применяют последовательное включение измеряемого сопротивления R_x и магнитоэлектрического прибора (рис. 22). Элементами цепи являются также выключатель SA и резисторы ($R_{д1}$ — переменного сопротивления, $R_{д2}$ — постоянного сопротивления). До начала измерений кнопкой SA замыкают цепь и перемещают движок резистора $R_{д1}$ до полного отклонения стрелки

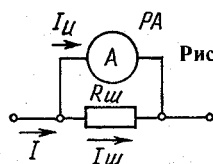


Рис. 20. Включение шунта

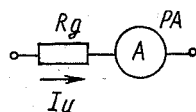


Рис. 21. Включение добавочного сопротивления

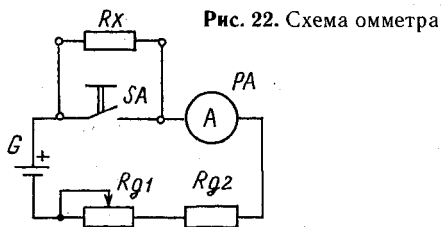
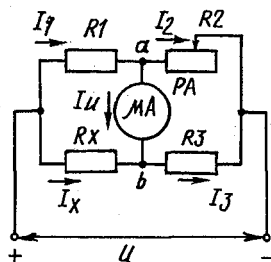


Рис. 22. Схема омметра

Рис. 23. Схема моста постоянного тока



прибора. При размыкании цепи измеряемое сопротивление R_x включается в цепь прибора. Отклонение стрелки прибора оказывается меньше. Прибор градуируют в значениях измеряемого сопротивления.

Для измерения сопротивлений часто применяют метод сравнения. Измеряемое сопротивление сравнивается с известными сопротивлениями резисторов (R_1 , R_2 , R_3) в цепи, называемой мостом постоянного тока (рис. 23). Цепь содержит две параллельные ветви, образованные резисторами R_1 , R_2 , R_3 и элементом с сопротивлением R_x , и измеритель тока высокой чувствительности — микроамперметр. Приложенное к цепи напряжение вызывает токи в цепях элементов и в измерителе тока. Величину тока в одной из параллельных ветвей можно регулировать резистором R_2 переменного сопротивления. Сопротивление этого резистора изменяют до тех пор, пока ток в цепи измерительного прибора не станет равным нулю. Это возможно, если напряжение между точками a и b равно нулю, что равнозначно появлению одинаковых напряжений на резисторах R_1 и R_x , R_2 и R_3 . Поскольку $I_n = 0$, то $I_1 = I_2$ и $I_x = I_3$. Поэтому можно записать:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= I_x R_x, \\ I_2 R_2 &= I_x R_3. \end{aligned}$$

Разделив равенства, получаем $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3}$, или $R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2}$.

Для проведения измерений устанавливают резисторы R_1 , R_3 постоянного сопротивления, а в качестве резистора R_2 применяют магазин сопротивлений, в котором можно менять сопротивления подключаемых проволочных резисторов. Для повышения точности измерений желательно, чтобы сопротивления R_x и R_3 были близкими по величине.

Чтобы ускорить измерение токов, напряжений, сопротивлений различных величин в процессе наладки радиоэлектронной аппаратуры, применяют комбинированные многопредельные приборы, называемые *ампервольтметрами* или *авометрами*. Некоторые из них позволяют измерять также емкости конденсаторов, индуктивности катушек и определять параметры транзисторов. Школьные кабинеты физики оснащены авометрами АВО-63.

Переключают комбинированные приборы на измерение определенной величины и устанавливают требуемый предел измерений при помощи соединительных проводов со щупами на концах к определенным гнездам прибора или посредством галетных переключателей, ручки которых располагаются на панели прибора.

19. Особенности и классификация радиоизмерительных приборов

В процессе проверки и налаживания радиоэлектронных устройств, кроме тока, напряжения и сопротивления, приходится измерять другие физические величины, исследовать изменения электрических сигналов с течением времени, сопоставлять сигналы на выходе устройства с сигналами на его входе и т. д. Для этой цели применяют набор приборов, получивших название радиоизмерительных. Они содержат электронные блоки для преобразования электрических величин, усилители сигналов, выпрямители, блоки для получения сигналов и др. Отсчетными приспособлениями в них являются стрелочные магнитоэлектрические приборы или цифровые индикаторы.

Радиоизмерительным приборам свойственны высокая чувствительность — они фиксируют весьма малые значения или изменения измеряемых величин, параметров или режимов; потребляют малую энергию сигнала; имеют широкий диапазон измеряемых величин. Эти приборы являются сложными и дорогими, имеют большие габариты, для их функционирования необходимы источники питания. Радиоизмерительные приборы часто объединяют в комплексы, которые позволяют вести измерения, записать, обработку и хранение получаемой измерительной информации.

Все радиоизмерительные приборы делят на четыре группы: 1) для измерения параметров и характеристик сигналов (вольтметры, осциллографы, частотомеры и др.); 2) для измерения параметров и характеристик элементов радиоэлектронных цепей (измерители сопротивлений, емкости, индуктивности, параметров транзисторов и электронных ламп); 3) измерительные генераторы; 4) вспомогательные блоки или части приборов.

В зависимости от характера измерений и вида измеряемых величин все радиоизмерительные приборы разделены на подгруппы.

Например, *приборы для измерения:*

А — силы тока;

В — напряжения;

Е — параметров и компонентов цепей;

М — мощности;

Ч — частоты и времени;

Л — параметров электронных ламп и полупроводниковых приборов;

приборы для наблюдения и исследования;

С — формы сигналов и спектров;

Х — характеристик радиоустройств;

Г — генераторы измерительные;

Б — источники питания.

20. Измерительные генераторы

Источниками электрических сигналов известной частоты, амплитуды и формы, предназначенными для проверки, исследования и настройки радиоэлектронных цепей и устройств, являются *измерительные генераторы*. Сигналы генераторов могут быть фиксированными и регулируемыми в некоторых пределах.

По ряду признаков генераторы разделяют на *генераторы сигналов низкой частоты* (ГЗ) и *высокой частоты* (ГЧ), *генераторы импульсов* (Г5), *сигналов специальной формы* (Г6), *генераторы качающейся* (периодически изменяющейся) *частоты* (Г8) и др. Низкочастотные генераторы вырабатывают сигналы с частотами в диапазоне 20 Гц...30 кГц, высокочастотные — в диапазоне 30 кГц...300 МГц.

Независимо от вида измерительный генератор имеет задающий генератор, преобразователь сигнала, выходное и измерительные устройства (рис. 24).

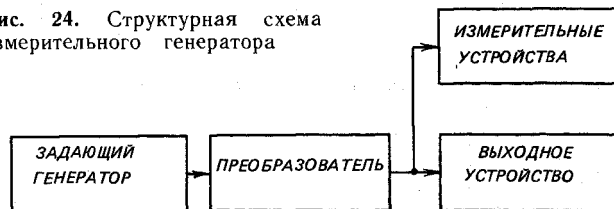
Задающий генератор является основным функциональным узлом, определяет частоту и форму генерируемых сигналов.

Преобразователь может увеличивать амплитуду и мощность сигнала, управлять амплитудой колебаний или другими характеристиками сигнала.

Выходное устройство позволяет регулировать амплитуду сигнала на выходе, изменять внутреннее (выходное) сопротивление измерительного генератора. Оно обычно включает аттенуатор — цепь для плавного или ступенчатого ослабления сигнала, специальный трансформатор, называемый согласующим, и другие цепи.

Измерительные устройства предназначаются для контроля требуемой частоты, амплитуды, формы или другой характеристики сигнала. Может быть устройством для отсчета частоты, шкалой ослаблений аттенуатора, вольтметром для измерения амплитуды выходного напряжения и т. д.

Рис. 24. Структурная схема измерительного генератора



Диапазон частот генераторов обычно разделен на несколько поддиапазонов. Переход от одного диапазона частот к другому осуществляется переключением элементов в цепи задающего генератора (конденсаторы, резисторы или катушки) специальным переключателем. Точная частота генератора устанавливается плавной регулировкой параметров элементов задающего генератора — емкости конденсаторов или сопротивлений резисторов.

В заводских лабораториях применяются генераторы сигналов звуковой частоты ГЗ-33, ГЗ-34, ГЗ-56, ГЗ-102, ГЗ-106, ГЗ-107, ГЗ-118 и другие и генераторы радиовещательного диапазона (100 кГц...50 МГц) Г4-102, Г4-106, Г4-118, Г4-154 и других типов. В генераторах радиовещательного диапазона предусматривается модуляция колебаний — управление амплитудой под действием встроенного генератора низкой частоты (обычно $F = 1000$ Гц), плавная и ступенчатая регулировка амплитуды сигнала. Они рассчитаны на подключение нагрузки сопротивлением 50 или 75 Ом.

21. Электронные вольтметры

Электронные вольтметры — это приборы для измерения напряжений, содержащие преобразователи напряжения и вспомогательные узлы в виде радиоэлектронных цепей. Значение измеряемого напряжения определяется по показаниям магнитоэлектрического прибора или высвечивается в виде цифр индикатора (цифровые вольтметры).

Электронные вольтметры имеют большое входное сопротивление, высокую чувствительность, потребляют небольшую мощность, не боятся перегрузок и измеряют амплитудные, действующие и средние значения напряжений.

Электронный вольтметр для измерения напряжений высокой частоты (рис. 25) состоит из ряда блоков. Входное устройство обычно имеет аттенюаторы и специальный усилительный каскад, обладающий высоким входным сопротивлением. В усилителе происходит усиление подводимого к его входу напряжения. Усиленное напряжение детектируется, на выходе детектора появляется постоянное напряжение, которое затем снова усиливается. Нагрузка усилителя — магнитоэлектрический прибор. По отклонению стрелки прибора судят о величине подводимого ко входу вольтметра напряжения. Почти во всех электронных вольтметрах предусматривается предварительная установка стрелки вольтметра на нуль шкалы. Для этого вход вольтметра соединяют проводниками накоротко, а ручкой «Уст. нуля» стрелку прибора устанавли-



Рис. 25. Структурная схема электронного вольтметра

вают на нулевое деление. На показания вольтметра влияет длина соединительных проводов. Поэтому многие приборы имеют специальный выносной пробник, содержащий аттенуатор и каскад усиления с большим входным сопротивлением. Пробник соединяют с прибором экранированным кабелем. Подключают пробник непосредственно к участку цепи, на котором измеряют напряжение.

Электронные вольтметры разделяют на *вольтметры постоянного тока (В2), переменного (В3), импульсные (В4), селективные*, т. е. для измерения напряжений в узкой полосе частот (В6), *универсальные* и других видов.

В практике лабораторных измерений распространены электронные вольтметры постоянного тока В2-15, В2-25, переменного тока В3-38, В3-39, В3-41, импульсные В4-12, В4-14, универсальные В7-15, В7-17.

22. Электронные осциллографы

Для наблюдения, измерения и регистрации электрических сигналов применяют *электронный осциллограф*. Специальными преобразователями (датчиками) различные физические величины (скорость, давление, сила, температура и т. д.) могут быть преобразованы в напряжение. Поэтому осциллограф — универсальный прибор, который применяется в различных исследованиях.

Основным узлом осциллографа является электронно-лучевая трубка (рис. 26). Она представляет собой длинную стеклянную колбу, из которой откачан воздух. В нее помещены электронная пушка, создающая узкий пучок движущихся электронов, система отклонения электронного пучка (две пары пластин) и экран.

Эмиссия электронов происходит с поверхности подогреваемого катода *К*, расположенного внутри модулятора *М* (цилиндрический колпачок с мадым отверстием в центре). К модулятору подводится отрицательное относительно катода напряжение. Подобно управляющей сетке лампы, модулятор регулирует поток пролетающих сквозь отверстие электронов. Поскольку отверстие мало, то формируется узкий пучок электронов. За модулятором по направлению движения электронов следуют цилиндрические

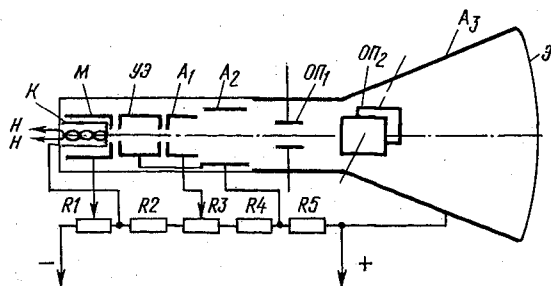


Рис. 26. Устройство электронно-лучевой трубки

электроды трубки (ускоряющий электрод $УЭ$ и аноды A_1 и A_2), к которым подводится положительное относительно катода высокое напряжение. Между электродами трубки создается сильное электрическое поле. Это поле ускоряет электроны и одновременно меняет направление их движения так, что электроны попадают на небольшую площадку экрана трубки, диаметр которой не превосходит 1 мм.

В электронно-лучевой трубке имеются две пары отклоняющих пластин: вертикально отклоняющие $ОП_1$ и горизонтально отклоняющие $ОП_2$. Если напряжение между пластинами отсутствует, то направление движения электронов не меняется. При подаче напряжения к пластинам электронный пучок отклоняется в сторону той пластины, потенциал которой выше.

Внутренняя поверхность электронно-лучевой трубки вблизи экрана покрывается проводящим графитовым слоем. Этот слой соединяется со вторым анодом или образует третий анод A_3 , к которому подводится более высокое, чем ко второму аноду, напряжение. Слой графита является коллектором (собирателем) вторичных электронов, выбиваемых из экрана.

Экран трубки $Э$ покрыт веществом, которое светится при бомбардировке его электронами. Свечение экрана трубки тем ярче, чем больше число электронов, падающих на него в единицу времени, и чем больше их скорость.

При подаче пилообразного напряжения на вертикальные пластины (рис. 27) напряжение между ними возрастает от нуля до максимального значения U_{xm} пропорционально времени t , в момент времени t_1 мгновенно уменьшается до значения $-U_{xm}$ и затем с течением времени опять возрастает до величины U_{xm} . Будем считать, что при возрастании напряжения происходит повышение потенциала правой пластины, если на трубку смотреть со стороны экрана. Период пилообразного напряжения T_n равен промежутку времени от t_1 до t_2 .

При отсутствии напряжения между пластинами пучок электронов не отклоняется, светящееся пятно находится в центре экрана трубки. Повышение потенциала правой пластины вызывает смещение пятна от центра экрана вправо, пропорционально напря-

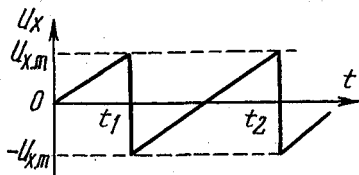


Рис. 27. График пилообразного напряжения

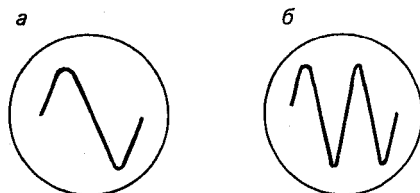


Рис. 28. Осциллограммы синусоидальных напряжений: а — $T = T_n$; б — $T = \frac{1}{2} T_n$

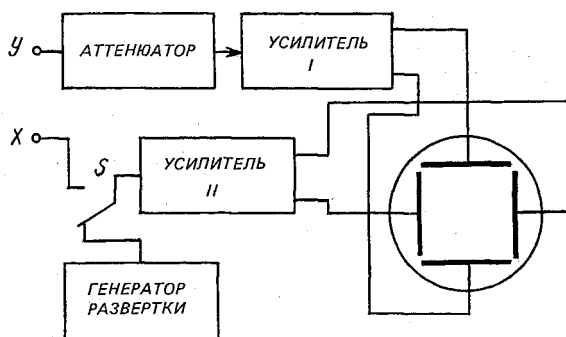


Рис. 29. Структурная схема электронного осциллографа

жению u_x . Когда потенциал правой пластины мгновенно понижается и достигает значения $-U_{xm}$, светящееся пятно перемещается влево и занимает крайнее левое положение относительно центра экрана. При возрастании напряжения u_x от значения $-U_{xm}$ до значения U_{xm} пятно равномерно перемещается по экрану трубки слева направо.

При подаче напряжения на горизонтальные пластины луч отклоняется по вертикали.

Если одновременно подать на вертикальные пластины пилообразное напряжение, а на горизонтальные — синусоидальное $u_y = U_{ym} \sin \omega t$ с периодом T , то электронный пучок будет участвовать в двух движениях — в равномерном движении по горизонтали под действием пилообразного напряжения и в движении по вертикали под влиянием синусоидального. Светящееся пятно будет двигаться на экране трубки по синусоиде (рис. 28, а). Когда это пятно дойдет до крайнего правого положения, произойдет быстрый переход его в крайнее левое положение. На экране будет видна неподвижная кривая.

Если на горизонтальные пластины трубки подать синусоидальное напряжение с периодом, в два раза меньшим периода пилообразного напряжения, то кривая на экране трубки будет представлять собой отрезок синусоиды, соответствующий двум периодам колебания (рис. 28, б).

Кроме электронно-лучевой трубки, осциллограф содержит и другие узлы (рис. 29). Для получения пилообразного напряжения в осциллографе установлен специальный генератор развертки. До подачи на вертикальные пластины напряжение развертки усиливается усилителем II. Подводимое к горизонтальным пластинам исследуемое напряжение усиливается усилителем I. Если амплитуда этого напряжения велика, происходит его ослабление в аттенюаторе, который предшествует усилителю I. На вертикальные и горизонтальные пластины электронно-лучевой трубки осциллографа напряжения могут быть поданы минуя усилители.

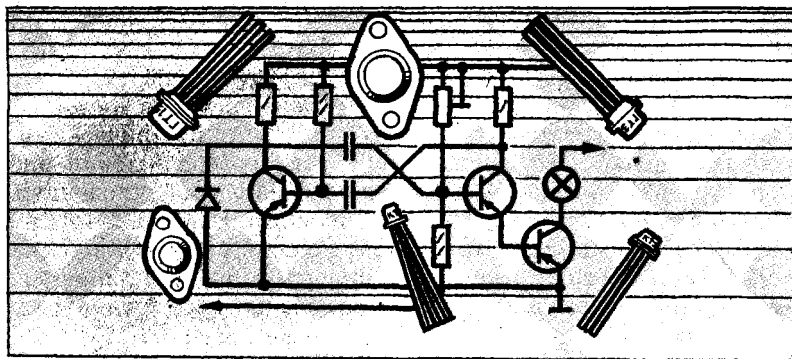
Осциллограф — сложный измерительный прибор. Для управления им служит ряд ручек управления. Тумблером «Сеть» подключается первичная обмотка трансформатора осциллографа к

сети. Ручкой потенциометра, имеющей обозначение «Яркость», регулируется напряжение между модулятором и катодом электронно-лучевой трубки. При этом изменяется число электронов, попадающих на экран трубки, и яркость свечения пятна. Ручкой «Фокус» регулируется напряжение между цилиндрическими электродами трубки, что влияет на траекторию движения электронов. Изменять потенциалы пластин и управлять отклонением луча по горизонтали и вертикали можно ручками «Смещение X» и «Смещение Y». Имеется переключатель деления входного напряжения, регуляторы частоты генератора пилообразного напряжения, ручка потенциометра для регулировки амплитуды синхронизирующего сигнала и др.

Подгруппа измерительных приборов, являющихся осциллографами, обозначается буквой С. В зависимости от характеристик исследуемых сигналов их делят на типы. Наиболее распространенные — универсальные осциллографы С1. В лабораториях используются различные универсальные осциллографы, например С1-55, С1-73 и др.

Вопросы и задания

1. Что такое абсолютная, относительная, приведенная погрешности? 2. Вольтметр класса точности 2,5 с пределом измерений 10 В показывает величину измеряемого напряжения, равную 2 (6, 9) В. Какой является абсолютная погрешность измерения при использовании этого прибора? Какими являются относительные погрешности измерений указанных напряжений? 3. Объясните устройство прибора магнитоэлектрической (электродинамической, электромагнитной) системы. 4. Объясните устройство и принцип работы простейшего омметра. 5. Объясните принцип измерения сопротивлений мостом постоянного тока. 6. Назовите известные вам группы радиоизмерительных приборов. 7. Как расшифровываются обозначения приборов ГЗ-56, Г4-102, ВЗ-3, В4-4, В7-17? 8. Для чего предназначены измерительные генераторы? 9. Объясните устройство и действие электронно-лучевой трубки. 10. Какие блоки включает электронный осциллограф? Каково их назначение? 11. Объясните, каким образом на экране осциллографа возникает осциллограмма, отражающая изменение исследуемого напряжения с течением времени. 12. При выполнении каких условий осциллограмма является неподвижной?



Глава VI

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

23. Полупроводники и их свойства

Полупроводниками называют вещества, удельное сопротивление которых является промежуточным между проводниками и диэлектриками ($10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} \leq \rho \leq 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Характерной их особенностью является сильная зависимость сопротивления от строения вещества, вида и количества примесей и внешних условий (температура, действие света, электрические и магнитные поля и др.).

К полупроводникам относится большая группа химических элементов (германий, кремний, бор, фосфор, мышьяк, селен и др.), оксиды металлов (алюминия, титана, меди, цинка, бора и др.), сернистые соединения (сульфиды кадмия, цезия, меди, олова и др.), некоторые сплавы металлов.

Полупроводники применяют для изготовления различных полупроводниковых приборов. В качестве исходного материала используется преимущественно кремний, германий, арсенид галлия, фосфид галлия, карбид кремния.

Как известно, хорошая проводимость металлических проводников объясняется наличием в них свободных электронов, которые практически не связаны с атомами кристаллической решетки металла и могут перемещаться в любом направлении. В чистом же, без примесей, полупроводнике почти все электроны атомов в обычных условиях (комнатная температура, отсутствие сильных электрических и магнитных полей, радиоактивного излучения, сильного освещения) связаны с ядрами. (Исключение

составляет небольшое количество электронов, связи которых с ядрами атомов и в этих условиях оказываются нарушенными.) В атомах слабее других связаны с ядрами электроны внешних оболочек. Поэтому их легче оторвать, т. е. разрушить эту связь.

Атомы кремния и германия являются четырехвалентными, содержат по четыре электрона на внешней оболочке. При их помощи каждый атом связан с четырьмя соседними атомами. В случае отрыва электрона от атома в результате нагрева, воздействия света, радиоактивного излучения, действия электрического или магнитного полей или по другим причинам появляется не связанный с атомом свободный электрон и образуется *вакантное место* в связи между атомами, называемое *дыркой* (рис. 30). *Образование дырки равнозначно появлению положительного заряда, равного заряду электрона.*

Появившиеся в результате нарушения связей между атомами полупроводника электроны и дырки являются подвижными носителями заряда в полупроводнике. Движение свободных электронов является хаотическим. Одновременно наблюдаются переходы электронов соседних атомов на вакантные места в связях между атомами, т. е. переходы электронов на расстояния, равные расстоянию между атомами. Таким переходам электронов соответствуют перемещения дырок в противоположном направлении. Следовательно, можно говорить о движении дырок. Соответственно различают *электронную проводимость* полупроводника, вызванную перемещением свободных электронов, и *дырочную*, связанную с движением дырок. Электрическое поле в полупроводнике вызывает перемещение в нем как дырок, так и электронов. Ток i_n , вызванный движением электронов, называют *электронным*, ток i_p , связанный с перемещением дырок, — *дырочным*.

В чистом, без каких-либо примесей, полупроводнике число свободных электронов и дырок всегда одинаково, так как каждый отрыв электрона сопровождается образованием дырки. Электрический ток возникает в равной мере как в результате движения отрицательных зарядов — электронов, так и вследствие перемещения эквивалентных положительным зарядам носителей заряда, называемых дырками. Токи i_n и i_p в таком полупроводнике одинаковы по величине. При обычных условиях количество электронов и дырок в единице объема полупроводника мало по сравнению с количеством атомов, токи i_n и i_p имеют небольшую величину. Про-

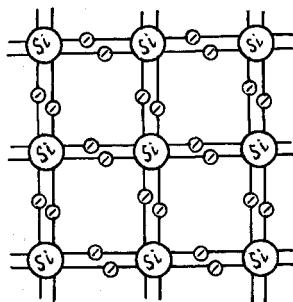


Рис. 30. Взаимосвязи атомов кремния в кристалле

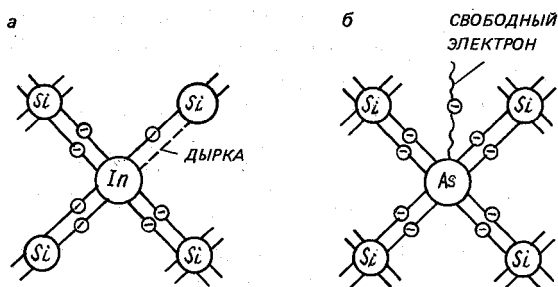


Рис. 31. Взаимосвязи атомов примесей с атомами кремния в кристалле: *а* — акцепторные примеси; *б* — донорные примеси

водимость чистого полупроводника называют *собственной*, она является низкой.

Свойства полупроводника сильно изменяются, когда в кристалл чистого полупроводника добавляют примеси, обычно в виде небольшого количества атомов других элементов. Различают *донорные* примеси — их атомы отдают электроны, в полупроводнике образуется избыток электронов, возникает электронная проводимость, и *акцепторные* — принимающие от атомов основного полупроводника электроны, обуславливающие избыток дырок. Атомы донорной примеси содержат больше электронов во внешней оболочке, чем атомы основного полупроводника, а атомы акцепторной примеси — меньше.

Если в кремний внедряют трехвалентные атомы акцепторной примеси, например индия, то три электрона каждого атома примеси образуют связи с тремя соседними атомами кремния (рис. 31, *а*). Связь с четвертым атомом отсутствует, имеется вакантное место в связи, являющееся дыркой. Введение пятивалентных атомов примеси, например атомов мышьяка, приводит (рис. 31, *б*) к появлению избыточного электрона в каждом атоме примеси, который не участвует в образовании связи между атомами кристалла.

Подвижными носителями заряда в примесном полупроводнике являются электроны и дырки собственного полупроводника, число их в единице объема полупроводника является небольшим, они выступают в качестве неосновных носителей заряда, и электроны или дырки, в зависимости от вида примеси, содержащиеся в гораздо большем количестве, которые являются основными носителями заряда в полупроводнике. Полупроводники с дырочной проводимостью называют полупроводниками *p*-типа (первая буква английского слова *positive* — положительный), а полупроводники с электронной проводимостью — полупроводниками *n*-типа (*negative* — отрицательный).

Направление движения подвижных носителей заряда в полупроводнике и направление тока в нем определяются полярностью приложенного к кристаллу полупроводника напряжения. Сила тока в полупроводнике данного типа зависит от величины приложенного напряжения, но не зависит от его полярности.

24. Электронно-дырочный переход

Рассмотрим систему из двух областей полупроводника p - и n -типа с надежным контактом между ними, называемую *электронно-дырочным* или p — n -переходом.

Контакт между областями полупроводника обычным сжатием отполированных кристаллов по ряду причин создать невозможно. Приходится применять специальные методы. Одним из них является *метод сплавления*. Можно, например, расположить на кристалле кремния с проводимостью n -типа кусочек индия, являющегося акцептором для кремния, и в специальной печи нагреть. На границе соприкосновения материалов образуется жидкий расплав, в котором атомы индия равномерно распределяются среди атомов кремния. После охлаждения появится тонкий слой кремния с примесью индия, т. е. слой полупроводника p -типа. Этот слой является единым целым с кристаллом кремния с проводимостью n -типа и образует с ним надежный контакт. Тонкий переходный слой между областями полупроводника с различными типами проводимости (рис. 32) представляет собой p — n -переход.

Концентрация электронов и дырок в каждой из контактирующих областей полупроводника неодинакова. В полупроводнике n -типа основными носителями заряда являются электроны, концентрация их в этой области гораздо выше, чем концентрация дырок. В свою очередь, в полупроводнике p -типа большей является концентрация дырок, чем электронов. Как правило, p — n -переход создается между областями полупроводника, где концентрация электронов в полупроводнике n -типа не равна концентрации дырок в полупроводнике p -типа. Такой p — n -переход называют *несимметричным*.

Поскольку по одну сторону p — n -перехода подвижными носителями заряда являются преимущественно электроны, а по другую — дырки, происходит проникновение (диффузия) электронов в полупроводник p -типа и дырок в полупроводник n -типа. Потoki этих носителей заряда являются встречными. Перемещение их обуславливает появление тока, который называют *диффузионным*.

Проникнув в результате диффузии через границу раздела, носители заряда в этой области становятся неосновными, причем избыточными, дополнительными по отношению к одноименным им зарядам, которые там имеются.

Перешедшие в p -область полупроводника электроны рекомбинируют с дырками, а перешедшие в n -область дырки нейтрализуются электронами. На границе между областями полупроводника

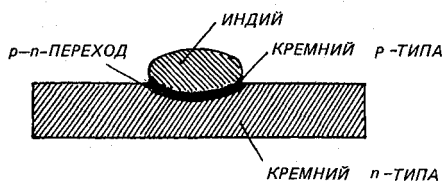


Рис. 32. Образование p — n -перехода методом сплавления

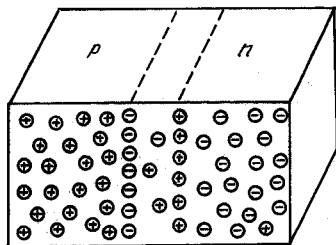


Рис. 33. Структура p — n -перехода при отсутствии внешнего напряжения

создается тонкий пограничный слой (рис. 33), в котором концентрация носителей заряда является очень низкой. Его называют обедненным слоем.

После ухода из области n -типа свободных электронов в прилегающем к обедненному слою объеме полупроводника имеются положительные ионы донорной примеси. Аналогично в области p -типа располагаются отрицательные ионы акцепторной примеси. В результате по обе стороны обедненного слоя в прилегающих к нему объемах полупроводника возникают избыточные объемные заряды: положительный в полупроводнике n -типа и отрицательный в полупроводнике p -типа. Между областями полупроводника, разделенными обедненным слоем, возникает некоторая разность потенциалов, которую называют *контактной разностью потенциалов*. В обедненном слое появляется электрическое поле, которое препятствует дальнейшему проникновению носителей заряда из одной области в другую.

В обедненный слой могут попасть имеющиеся в небольшом количестве в p -области электроны или присутствующие в небольшом количестве в n -области дырки. Электрическое поле избыточных объемных зарядов, расположенных по обе стороны обедненного слоя, вызовет их перемещение. Протекающий через p — n -переход ток неосновных носителей заряда, вызванный наличием электрического поля в переходе, называют *дрейфовым током* p — n -перехода. Он определяется концентрацией неосновных носителей заряда в контактирующих областях полупроводника и практически не зависит от напряженности электрического поля в обедненном слое. *Дрейфовый ток направлен навстречу диффузионному.*

Когда внешнее напряжение к областям полупроводника не приложено, в p — n -переходе устанавливается динамическое равновесие, при котором диффузионный ток равен дрейфовому и общий ток через p — n -переход равен нулю. Одновременно области полупроводника уподобляются пластинам конденсатора, а обедненный слой между ними — диэлектрическому слою. p — n -переход подобен конденсатору, который характеризуется определенной емкостью, называемой емкостью p — n -перехода и зависящей от площади контакта и ширины обедненного слоя.

Если положительный полюс источника внешнего напряжения (рис. 34, а) соединить с полупроводником n -типа, а отрицательный с полупроводником p -типа, то разность потенциалов между областями полупроводника станет больше. Электрическое поле в обедненном слое будет в большей степени препятствовать перемещению дырок из полупроводника p -типа в полупроводник n -типа и электронов в противоположном направлении. Диффузионный ток станет меньше дрейфового тока, и через переход будет про-

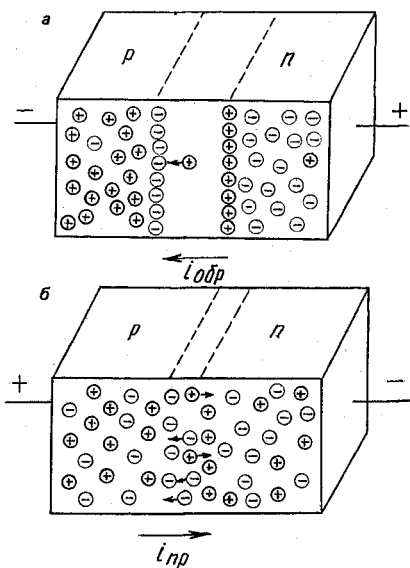


Рис. 34. Структура $p-n$ -перехода при наличии внешнего напряжения: а — обратного; б — прямого

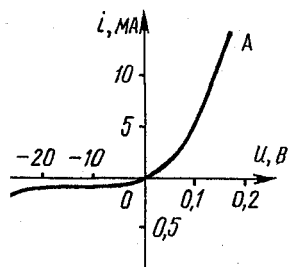


Рис. 35. Вольт-амперная характеристика $p-n$ -перехода

текать отличный от нуля суммарный ток. Приложенное к $p-n$ -переходу напряжение указанной полярности и вызванный им ток называют *обратными*. При увеличении обратного напряжения диффузионный ток прекращается и обратный ток станет током неосновных носителей заряда. Обратное напряжение вызывает увеличение ширины обедненного слоя, что соответствует уменьшению емкости $p-n$ -перехода.

Изменение полярности внешнего напряжения (рис. 34, б) вызывает уменьшение разности потенциалов между областями полупроводника, что влечет за собой возрастание диффузионного тока. Он становится больше дрейфового. Приложенное в этом случае напряжение и вызванный им ток через переход называют *прямыми*. Уже при малых, порядка 0,1 В, прямых напряжениях дрейфовый ток можно не учитывать и считать прямой ток диффузионным током. Характерно, что даже небольшое, равное десяткам милливольт, увеличение прямого напряжения на $p-n$ -переходе вызывает существенное увеличение прямого тока.

Зависимость протекающего через $p-n$ -переход тока от приложенного к нему внешнего напряжения отражает вольт-амперная характеристика перехода (рис. 35). В области прямых напряжений она содержит круто восходящий участок ОА. Обратный ток мало зависит от обратного напряжения до тех пор, пока не произойдет пробой $p-n$ -перехода.

Повышение температуры полупроводника приводит к увеличению концентрации в нем электрона и дырок, к возрастанию прямого и обратного токов. Пробой $p-n$ -перехода и резкое возрастание обратного тока может произойти или вследствие нагрева

полупроводника, или по причине увеличения скорости движения носителей заряда.

Кроме $p - n$ -переходов, возможно появление электрических переходов между примесным и чистым полупроводниками ($p - i$ - или $n - i$ -переходы), между полупроводниками с высокой и низкой концентрациями основных носителей заряда одного и того же вида ($p^+ - p$ - или $n^+ - n$ -переходы), между полупроводником и металлом и др.

Особенности процессов в полупроводниковых материалах используются при создании различных полупроводниковых приборов. Они предназначаются для управления током или напряжением в электрических цепях через внешние воздействия: электрические или магнитные поля, нагрев, свет, деформации и т. д. Эти приборы можно разделить на беспереходные, в которых нет электрических переходов, и содержащие один или больше электрических переходов, в частности $p - n$ -переходов.

25. Беспереходные полупроводниковые приборы

Беспереходные приборы включают однородный полупроводник. Разновидность их — *термисторы* — полупроводниковые резисторы, сопротивление которых сильно уменьшается по мере роста температуры. Явление объясняется увеличением числа носителей заряда в них — электронов или дырок в процессе нагрева, влиянием температуры на скорость движения подвижных носителей заряда и действием других факторов. Термисторы изготавливают в виде стержней, дисков, шайб, миниатюрных бусинок, тонких пластинок или пленок из однородного полупроводника.

Используемый для изготовления многих приборов германий или кремний p - или n -типа в термисторах не применяется. При комнатной температуре атомы примесей в этих материалах практически ионизированы, изменение температуры на несколько градусов вызывает лишь небольшое увеличение концентрации носителей заряда вследствие ионизации атомов основного полупроводника, изменение проводимости получается незначительным. В термисторах, работающих в диапазоне средних температур ($-60^\circ \dots +120^\circ$), используют оксиды марганца, кобальта, никеля, меди, в диапазоне до $300^\circ \dots 400^\circ$ — карбид кремния (SiC), в интервале более высоких температур — оксид алюминия (Al_2O_3), соединения магния, цинка, кадмия, смеси оксидов титана и кобальта.

Имеется разновидность термисторов, которые называют *позисторами*. При повышении температуры сопротивление их повышается, причем это увеличение получается значительным. Проводящим материалом позисторов выступает керамика, включающая титан и барий с добавлением специальных примесей, германий или кремний с низкой концентрацией примесей. Увеличение сопротивления в некотором интервале изменения температуры

связано с изменением скорости перемещения подвижных носителей заряда по мере нагрева.

Обозначение термисторов состоит из букв и цифр. Кобальто-марганцевые термисторы обозначают буквами КМТ или буквами и цифрами СТ1, медно-марганцевые — ММТ или СТ2, медно-кобальтовые — СТ3 и т. д. Особенность конструкции отмечается цифрами, записываемыми через черточку после первых элементов обозначения, например ММТ-4, КМТ-1, СТ3-24. Термисторы используют как элементы-датчики в устройствах для обнаружения изменений температуры и ее измерений, тепловой защиты, контроля за ее колебаниями и для сигнализации.

Полупроводниковые резисторы, в которых обнаруживается сильное уменьшение сопротивления при увеличении прилагаемого к ним напряжения, называют *варисторами*. Они включают порошок карбида кремния с примесями алюминия, кальция, магния. Применяют варисторы для защиты контактов реле от разрушений, защиты электрических цепей от опасного повышения напряжения на них, в цепях стабилизации напряжения.

Созданы также беспереходные полупроводниковые приборы, называемые *фоторезисторами*, проводимость которых изменяется под действием света. В процессе изготовления фоторезистора на стеклянную пластинку 1 (рис. 36) наносят слой золота, серебра или платины 2. В металлическом слое выполняют прорезы для образования двух изолированных друг от друга электродов. На поверхность стекла и металла наносят тонкий слой полупроводникового материала 3. Защищен полупроводник от воздействия влаги слоем лака. Для герметизации элемент размещают в пластмассовом или металлическом корпусе прямоугольной или круглой формы.

Падающий на полупроводник свет отрывает электроны от атомов, образуя электронно-дырочные пары. Увеличение концентрации подвижных носителей заряда вызывает уменьшение сопротивления полупроводника. Количество образующихся пар носителей заряда, а следовательно, и сопротивление фоторезистора зависят от длины волны падающего света и его интенсивности.

В качестве проводящего материала фоторезисторов применяется сернистый свинец (PbS), селенистый кадмий (CdSe), селенистый свинец (PbSe), селен, германий, кремний, различные соединения селена, теллурия и других элементов.

Обозначение фоторезисторов содержит три элемента: первый — буквы СФ (сопротивление фоточувствительное); второй элемент — цифра, обозначающая полупроводниковый материал (2 — сернистый кадмий, 3 — селенистый кадмий, 4 — селенистый свинец); третий элемент — цифра, указывающая порядковый номер разработки. Обозначение СТФ-12 относится к разработке № 12 сернисто-кадмиевого фоторезистора.

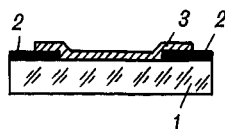


Рис. 36. Структура фоторезистора

26. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод — это электропреобразовательный прибор с одним $p-n$ -переходом и двумя внешними выводами от областей полупроводника с различными типами проводимости. Полупроводниковые диоды бывают *точечные* и *плоскостные*.

В точечных диодах $p-n$ -переход возникает при контакте заостренной металлической проволоки с пластинкой кремния или германия.

В плоскостных диодах $p-n$ -переходы создают методом сплавления полупроводников с различными типами проводимости, методом диффузии донорной или акцепторной примеси из газовой среды внутрь полупроводника и др.

В качестве исходного материала для создания диодов применяют германий и кремний. Использование кремния предпочтительнее. Обратный ток кремниевого диода гораздо меньше, а допустимое обратное напряжение может быть гораздо больше, чем германиевого. Зато прямое напряжение на германиевых диодах меньше (0,1...0,3 В), чем на кремниевых (0,6...1 В). Германиевые диоды применяют при низких напряжениях.

О свойствах полупроводникового диода судят по его вольт-амперной характеристике, которая выражает зависимость тока диода от приложенного к нему напряжения и является вольт-амперной характеристикой $p-n$ -перехода. Для снятия ее один раз подают на диод обратное напряжение (рис. 37, а), а затем прямое (рис. 37, б), изменяют его величину и ведут измерение тока в его цепи.

Для оценки свойств диода вводят ряд параметров. Основными параметрами диодов являются:

прямой (выпрямленный) ток $I_{пр}$ — ток, протекающий через диод в прямом направлении;

максимально допустимый постоянный прямой ток $I_{пр. макс}$ — наибольшее значение прямого тока, который можно пропускать через диод;

постоянное прямое напряжение $U_{пр}$ — значение постоянного напряжения на диоде, когда через него проходит прямой ток;

постоянное обратное напряжение $U_{обр}$ — значение постоянного напряжения, приложенного к диоду в обратном направлении;

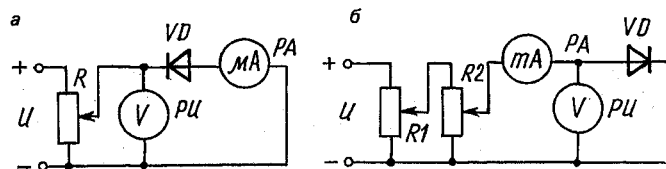


Рис. 37. Схема цепи для снятия вольт-амперной характеристики диода: а — в обратном направлении; б — в прямом

максимально допустимое обратное постоянное напряжение $U_{обр. макс}$ — максимальное обратное напряжение, при котором не происходит пробой диода;

пробивное напряжение $U_{проб}$ — напряжение, составляющее 0,8 от максимального обратного напряжения диода: $U_{проб} = 0,8 U_{обр. макс}$;

постоянный обратный ток $I_{обр}$ — значение постоянного тока, протекающего через диод в обратном направлении при заданном обратном напряжении;

максимальная $T_{макс}$ и минимальная $T_{мин}$ температура окружающей среды — предельные значения температуры окружающей среды, при которых диод сохраняет свою работоспособность.

Классификация полупроводниковых диодов ведется по исходному материалу, технологии изготовления, площади $p-n$ -перехода, назначению и области применения. Рассмотрим ряд разновидностей полупроводниковых диодов.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного напряжения промышленной ($f=50$ Гц) и низкой ($f \leq 50$ кГц) частот в постоянное напряжение. Они плоскостные и рассчитаны на большие значения выпрямленных токов и высокие обратные напряжения. Выпрямительные диоды бывают *маломощными* и *мощными*.

Маломощный кремниевый диод (рис. 38) имеет пластинку кремния, которую припаивают к кристаллодержателю, являющемуся одновременно основанием корпуса прибора. Через стеклянный изолятор в корпусе проходит вывод диода. У мощных диодов кристаллодержатель — массивное основание с винтом и плоской поверхностью для надежного теплового контакта с внешним теплоотводом.

На практике для выпрямления высоких напряжений применяют последовательное включение однотипных диодов, а для выпрямления больших токов — параллельное. Характеристики однотипных диодов не бывают одинаковыми. Поэтому с целью выравнивания обратных напряжений при последовательном включении диодов параллельно им включают шунтирующие резисторы сопротивлением 10...50 кОм (рис. 39, а). Если применяют параллельное включение диодов, то для равномерного распределения токов между однотипными диодами последовательно с каждым из них включают резистор сопротивлением от долей Ом до единиц Ом (рис. 39, б).

Выпускаются специальные *выпрямительные столбы*, предназначенные

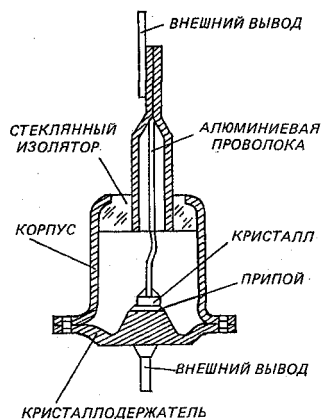


Рис. 38. Конструкция маломощного выпрямительного диода

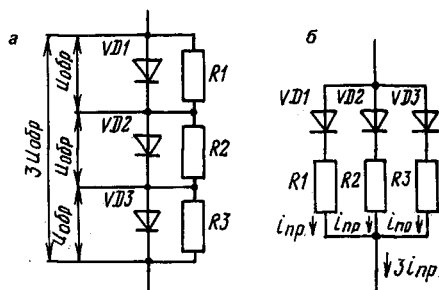


Рис. 39. Включение диодов: а — последовательное; б — параллельное

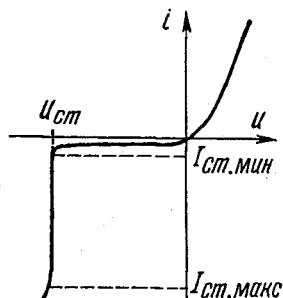


Рис. 40. Вольт-амперная характеристика стабилитрона

для использования в целях высокого напряжения. Такой столб содержит от 5 до 50 последовательно соединенных идентичных диодов. В зависимости от их количества допускается обратное напряжение от 2 до 40 кВ.

Имеются также *диодные сборки* и *диодные матрицы*, содержащие в одном корпусе совокупность диодов или соединенные между собой диоды в виде цепей для выпрямления переменного тока. В диодных сборках применяются параллельное, последовательное, мостовое и другие соединения диодов.

Высокочастотные диоды в состоянии обеспечить одностороннюю проводимость тока при частотах до сотен мегагерц. Они имеют малую площадь переходов, характеризуются емкостью переходов в единицы пикофард, допускают прямые токи, не превосходящие десятков миллиампер, и низкие обратные напряжения.

Импульсные диоды являются специальными высокочастотными диодами, предназначенными для использования в цепях, где имеют место быстрые, скачкообразные изменения напряжений.

Разновидность диодов — *стабилитроны*. Вольт-амперная характеристика их (рис. 40) в области обратных напряжений имеет крутой участок, соответствующий пробой $p-n$ -перехода. Вид характеристики для прямых напряжений такой же, как и для обычного диода. При подведении к стабилитрону обратного напряжения и его возрастании обратный ток вначале является небольшим и мало зависит от величины напряжения. Когда происходит лавинный пробой перехода, напряжение на диоде остается почти неизменным при изменениях обратного тока в пределах от минимального $I_{ст. мин}$ до максимального $I_{ст. макс}$. Это явление используют в стабилизаторах напряжения — устройствах для поддержания неизменного напряжения на его выходе в случае колебаний величины подводимого к нему напряжения в определенных пределах.

Для стабилизации напряжения применяются также *стабилитроны* — диоды с крутым участком характеристики в области

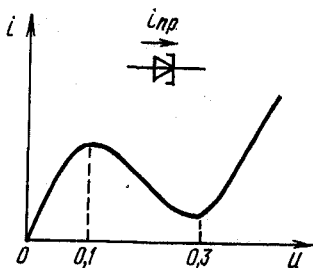


Рис. 41. Вольт-амперная характеристика туннельного диода

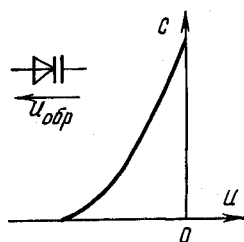


Рис. 42. Зависимость емкости $p-n$ -перехода варикапа от обратного напряжения

прямых напряжений. Поскольку величины прямых напряжений на диодах являются небольшими, напряжение стабилизации для стабилиторов не превосходит единиц вольты.

Для получения электрических колебаний высокой частоты в быстродействующих импульсных и других устройствах применяются *туннельные* диоды. Их изготавливают на основе германия или арсенида галлия с высокой концентрацией примесей. Они имеют специфическую вольт-амперную характеристику (рис. 41). При малых напряжениях наблюдается прохождение тока и его рост с увеличением напряжения независимо от полярности. Когда прямое напряжение достигает значения около 0,1 В, при дальнейшем его увеличении обнаруживается не возрастание, а, наоборот, уменьшение тока диода. Вольт-амперная характеристика включает падающий ее участок. При дальнейшем возрастании прямого напряжения происходит увеличение прямого тока диода. Туннельные диоды являются быстродействующими приборами, в состоянии работать на частотах в сотни МГц.

Промышленность выпускает также специальные диоды, предназначенные в качестве конденсаторов с управляемой величиной их емкости под воздействием обратного напряжения. Они получили название *варикапов*. Зависимость емкости варикапа от обратного напряжения является нелинейной (рис. 42). Воздействие обратного напряжения на емкость варикапа проявляется в большей степени при малых его значениях. Выпускаемые промышленностью варикапы имеют емкость от единиц до сотен пикофард. Их применяют в качестве элементов с электрически управляемой емкостью в целях колебательных контуров радиоприемников и передатчиков.

В отличие от конденсаторов, содержащих диэлектрик с высоким сопротивлением, в цепи варикапа протекает ток. Он является небольшим, порядка долей микроампера. В случае подачи на $p-n$ -переход прямого напряжения ток в его цепи резко увеличивается и может составить десятки миллиампер. Использование варикапа при прямом напряжении на нем недопустимо.

С 1978 г. действует семизначный буквенно-цифровой код обозначения полупроводниковых диодов. Первый элемент — буква или цифра — обозначает исходный полупроводниковый материал, на основе которого изготовлен прибор: Г или 1 — германий, или его соединения; К или 2 — кремний или его соединения; А или 3 — соединения галлия; И или 4 — соединения индия. Второй элемент — буква, определяющая подкласс приборов: Д — диоды; С — стабилитроны; В — варикапы; Ц — выпрямительные столбы и блоки. Третий элемент — цифра, определяющая один из основных признаков прибора (параметр, назначение или принцип действия). Четвертый, пятый, шестой (может быть лишь четвертый и пятый) — трехзначное (двузначное) число, обозначающее порядковый номер разработки технологического типа прибора. Седьмой элемент — буква — условно указывает классификацию по параметрам приборов, изготовленных по единой технологии. Например, КД212Б означает кремниевый выпрямительный диод с допустимым прямым током до 10 А, предназначен для устройств широкого применения, 12-й номер разработки, группа Б.

27. Полевые транзисторы

Транзисторы — трехэлектродные приборы, которые можно использовать для управления протекающих через них токов, получения, усиления и различных преобразований электрических сигналов. По устройству, механизму создания и управления токами транзисторы делят на *полевые* (униполярные) и *биполярные*.

В полевых транзисторах протекание управляемого тока связано с направленным перемещением носителей одного лишь знака — электронов или дырок, что определяет название — униполярный транзистор. Управляет током электрическое поле, при этом ток в цепи управляющего электрода отсутствует. В биполярном транзисторе наблюдается одновременное перемещение носителей зарядов двух знаков — электронов и дырок, а управление током транзистора сопровождается прохождением тока в цепи управляющего электрода.

Изобретение биполярного транзистора относится к 1947 г., полевой транзистор появился в 1952 г.

Разновидностью полевого транзистора является транзистор с управляющим p — n -переходом. Для его изготовления берут тонкую пластинку полупроводника определенного типа проводимости, например p -типа. Она выступает как подложка, в которой формируется транзистор. В верхнем слое подложки образуют тонкий слой с проводимостью противоположного знака, в нашем случае n -типа (**рис. 43**). В нем создают две области с высокой концентрацией электронов и одну область с высокой концентрацией дырок. На границе между областями полупроводника p^+ -типа и слоем полупроводника с проводимостью n -типа образуется

p^+ — n -переход. Между переходом и подложкой сохраняется тонкий слой полупроводника n -типа, называемый каналом. Высота его составляет 1...3 мкм. Носителями заряда в канале являются электроны.

На поверхность созданных трех областей полупроводника наносят невыпрямляющие металлические контакты. К ним приваривают выводы *истока, стока и затвора*.

Для создания тока в канале и управления им между электродами транзистора устанавливают напряжения определенной полярности и величины. В рассматриваемом транзисторе с каналом n -типа при замыкании ключа *SA1* между стоком и истоком устанавливается напряжение сток — исток положительной относительно истока полярности. В канале появляется продольное, направленное вдоль канала, электрическое поле, которое вызывает движение электронов в нем; появляется ток стока. Замыкание ключа *SA2* вызывает подачу отрицательного относительно истока напряжения затвор — исток. Это напряжение выступает как обратное для p^+ — n -перехода. Появляется электрическое поле, ориентированное перпендикулярно направленному движению носителей заряда в канале. Для p^+ — n -перехода напряжение $u_{з.и}$ и является обратным. Оно вызывает расширение перехода, причем главным образом в сторону канала.

Происходит уменьшение высоты канала и протекающего в его цепи тока. Напряжение $u_{з.и}$ и управляет величиной тока стока. При достаточно большом его значении возможно перекрытие канала и полное прекращение тока стока. В цепи затвора протекает обратный ток p — n -перехода. Величина его не превосходит единиц микроампера.

Подавать прямое напряжение на управляющий переход нельзя, так как в этом случае в цепи затвора появляется большой ток и прекращается управление током канала.

Созданы полевые транзисторы, у которых затвор отделен от канала тонким слоем диэлектрика (обычно диоксида кремния). Эти транзисторы называют МОП-(металл — оксид — полупроводник) или МДП-(металл — диэлектрик — полупроводник) транзисторами. Разновидности их — транзисторы со встроенными (рис. 44, а) и индуцированными (рис. 44, б) каналами. Ток в цепях затворов этих транзисторов практически отсутствует.

Управляющее напряжение $u_{з.и}$ и отрицательной полярности вызывает выталкивание электронов из зоны канала вблизи диэлектрика. Канал обедняется носителями заряда, проводимость его уменьшается и уменьшается ток стока. Наоборот, положительное напряжение между затвором и истоком обуславливает

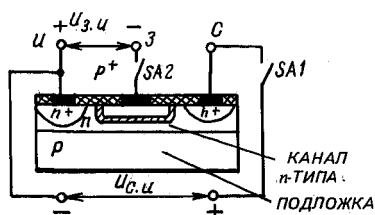


Рис. 43. Устройство полевого транзистора с управляющим p — n -переходом

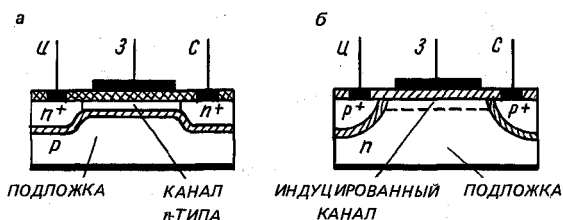


Рис. 44. Структура МДП-транзистора: а — со встроенным каналом; б — с индуцированным каналом

втягивание электронов в канал из подложки, обогащение его носителями заряда и увеличение тока стока. Таким образом, управляющее напряжение u_z и может иметь положительную или отрицательную полярность.

В транзисторе с индуцированным каналом при отсутствии управляющего напряжения канала нет. Для его создания в транзисторе указанной на рис. 44, б структуры между затвором и истоком прикладывают напряжение отрицательной относительно истока полярности. Оно должно составлять несколько вольт и быть выше некоторого порогового напряжения $U_{з. и пор.}$, вызывающего появление тока стока.

На условных обозначениях (рис. 45) полевых транзисторов каналы транзисторов с управляющим переходом и со встроенным каналом обозначаются сплошными вертикальными отрезками прямой (рис. 45, а — з), с индуцированным каналом — штриховой линией (рис. 45, д, е). Проводимость канала указывает стрелка на обозначении: в транзисторах с управляющим переходом она расположена со стороны затвора, в транзисторах с изолированным затвором — со стороны истока и стока; если канал обладает проводимостью n-типа, стрелка направлена к символу канала, если проводимостью p-типа, — от символа.

Включают полевые транзисторы всегда так, что один из электродов его и одновременно один из полюсов каждого из источников питания соединяют с общим проводом. Потенциал этого провода принимается равным нулю, он может быть заземлен

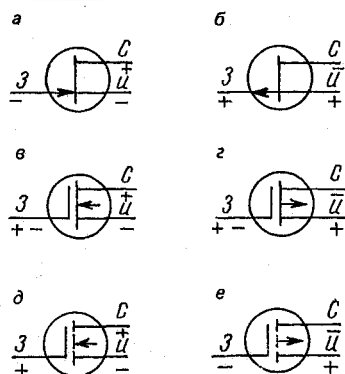


Рис. 45. Обозначение полевых транзисторов: а — с управляющим p-n-переходом и каналом n-типа; б — с управляющим p-n-переходом и каналом p-типа; в — со встроенным каналом n-типа; г — со встроенным каналом p-типа; д — с индуцированным каналом n-типа; е — с индуцированным каналом p-типа

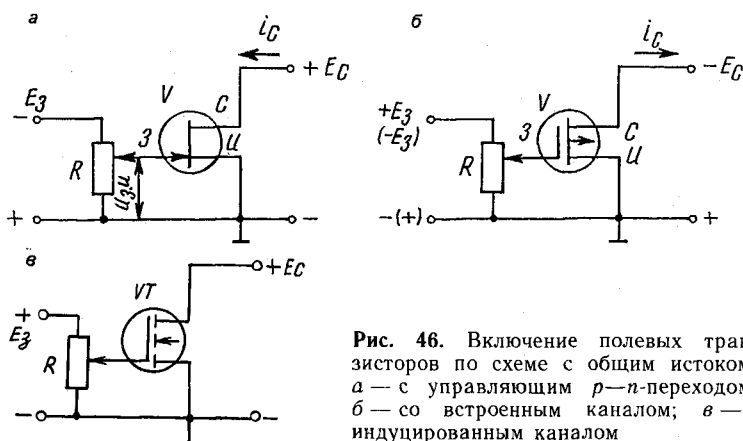


Рис. 46. Включение полевых транзисторов по схеме с общим истоком: а — с управляющим p - n -переходом; б — со встроенным каналом; в — с индуцированным каналом

или соединен с корпусом создаваемого радиоэлектронного устройства. В зависимости от того, какой электрод транзистора соединяют с общим проводом, различают включение транзистора по схеме с общим истоком, общим стоком или общим затвором.

Включим полевой транзистор с управляющим переходом и каналом n -типа по схеме с общим истоком (рис. 46, а). Напряжение между истоком и стоком должно быть в этом случае положительным, а управляющее напряжение между затвором и общим проводом отрицательным. Потенциометр R предназначен для регулировки величины напряжения $u_{з.и}$.

В транзисторе со встроенным каналом p -типа, включенным по схеме с общим истоком (рис. 46, б), напряжение между стоком и общим проводом, с которым соединен исток, должно быть отрицательным. Напряжение затвор — исток может быть как отрицательным, так и положительным.

Так же может быть представлена схема включения транзистора с индуцированным каналом (рис. 46, в). Полярность напряжений $u_{с.и}$ и $u_{з.и}$ в этом случае должна быть одной и той же. Если образуется канал n -типа, она должна быть положительной. Зависимости токов в цепях электродов от подводимых к электродам напряжений выражают соответствующими графиками, которые называют *вольт-амперными характеристиками транзистора*. Важнейшими из них являются *выходные*, или *стоковые*, и *прямой передачи*, или *стоко-затворные*. Поскольку на величину токов в транзисторе одновременно оказывают влияние два напряжения, то одно из них при этом принимается величиной постоянной и имеет определенное значение.

При включении транзистора по схеме с общим истоком выходные характеристики (рис. 47, а) выражают зависимость тока стока от напряжения сток — исток при постоянном напряжении затвор — исток:

$$i_c = f(u_{с.и}); U_{з.и} = \text{const.}$$

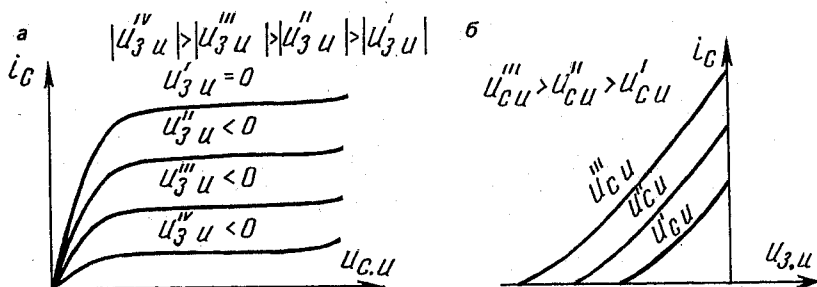


Рис. 47. Вольт-амперные характеристики полевого транзистора: а — выходные; б — прямой передачи

Характеристика прямой передачи (рис. 47, б) выражает зависимость тока стока от напряжения затвор — исток при постоянном напряжении сток — исток:

$$i_c = f(u_{з.и}); U_{с.и} = \text{const.}$$

Полевой транзистор характеризуют рядом параметров. Одним из них является крутизна характеристики прямой передачи S , выражаемая как отношение приращения тока стока к изменению напряжения затвор — исток, которое это приращение тока обусловило, при неизменном напряжении сток — исток:

$$S = \frac{\Delta i_c}{\Delta u_{з.и}} \text{ при } U_{с.и} = \text{const.}$$

Промышленность выпускает полевые транзисторы, работающие в диапазоне частот до нескольких гигагерц.

28. Биполярные транзисторы

Биполярным транзистором называют полупроводниковый электропреобразовательный прибор, токи в котором обусловлены движением носителей заряда двух знаков — электронов и дырок. В нем имеются три разделенные двумя $p-n$ -переходами области полупроводника с чередующимися типами проводимости.

В транзисторе типа $n-p-n$ (рис. 48, а) крайние области обладают проводимостью n -типа, средняя область — проводи-

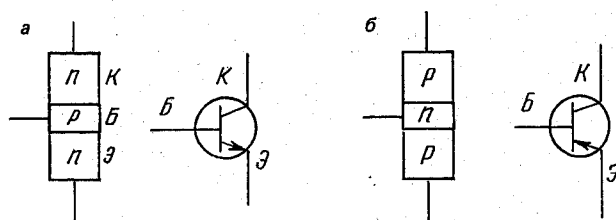


Рис. 48. Биполярный транзистор: а — типа $n-p-n$; б — типа $p-n-p$

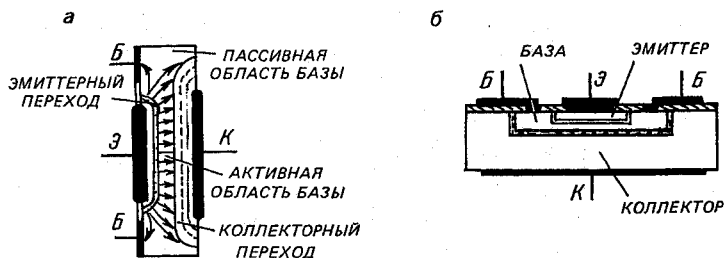


Рис. 49. Устройство биполярного транзистора: а — сплавного; б — планарного

мостью p -типа. В транзисторе типа $p - n - p$ (рис. 48, б) проводимость крайних областей — p -типа, а средней — n -типа. Области полупроводника получили название: область эмиттера (Э) — поставляет носители заряда, создающие токи в транзисторе; область базы (Б) — накапливает поставляемые в базу носители заряда; область коллектора (К) — собирает инжектированные в область базы из эмиттера носители заряда. Между базой и эмиттером имеется $p - n$ -переход, называемый *эмиттерным*, а между коллектором и базой — *коллекторным*.

Транзисторы изготовляют различными технологическими методами. Одним из первых был метод *сплавной технологии* (рис. 49, а). Для изготовления германиевого транзистора типа $p - n - p$ в пластинку из германия с проводимостью n -типа вплавливают кристаллики трехвалентного элемента, например индия. В процессе плавления индий проникает внутрь германия и на границе между пластинкой германия и кристаллом индия образуется тонкий слой германия с проводимостью p -типа. Между этим слоем и германием с проводимостью n -типа возникает $p - n$ -переход.

В транзисторе, изготовляемом методом *планарной технологии* (рис. 49, б), электроды прибора располагаются в одной плоскости — на поверхности кристалла.

Кристалл полупроводника, в котором образованы области эмиттера, базы и коллектора, крепят в специальном кристаллодержателе и размещают в герметизированном металлическом, пластмассовом или стеклянном корпусе (рис. 50, а, б, в). Включают транзистор по схеме с общим эмиттером, общей базой или общим коллектором. Чаще включают транзистор по схеме с общим эмиттером. Между электродами создают напряжения. В зависимости от их полярности и величины различают режимы работы транзисторов: *активный, отсечки, насыщения*.

Активный режим характерен наличием токов в цепях электродов транзистора и возможностью управлять их величиной. Для его реализации на переход база — эмиттер подают прямое напряжение, на переход коллектор — база — обратное.

Рассмотрим процессы в транзисторе типа $n - p - n$, включен-

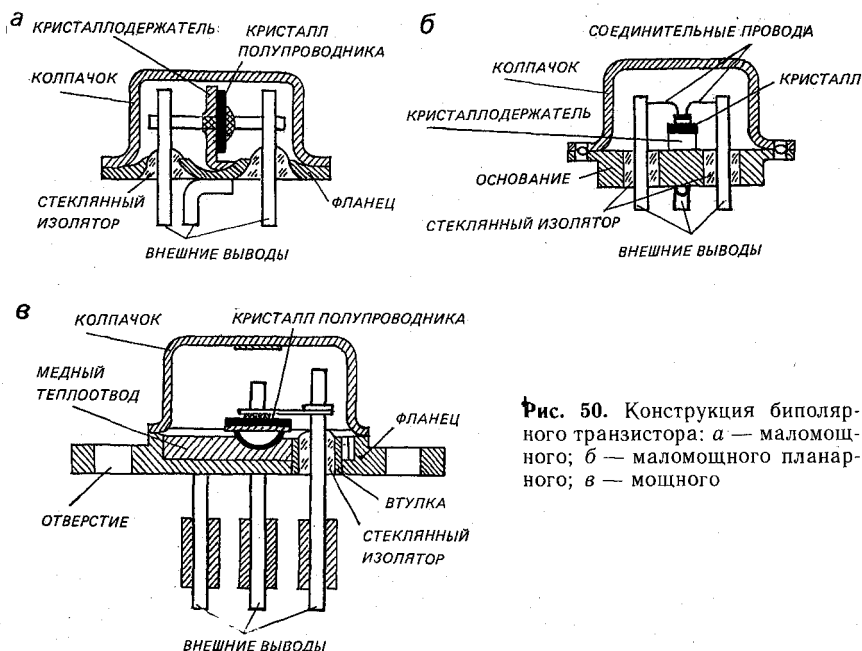


Рис. 50. Конструкция биполярного транзистора: а — маломощного; б — маломощного планарного; в — мощного

ном по схеме с общим эмиттером и работающем в активном режиме. Концентрации основных носителей заряда в области эмиттера, базы и коллектора неодинаковы (рис. 51, а). В единице объема их больше всего в области эмиттера, меньше в коллекторе и еще меньше в базе. Прямое напряжение на эмиттерном переходе вызывает перемещение электронов из эмиттера в базу и дырок из базы в эмиттер (рис. 51, б). В цепи эмиттера протекает ток $i_э$. Проникшие из базы в область эмиттера дырки рекомбинируют

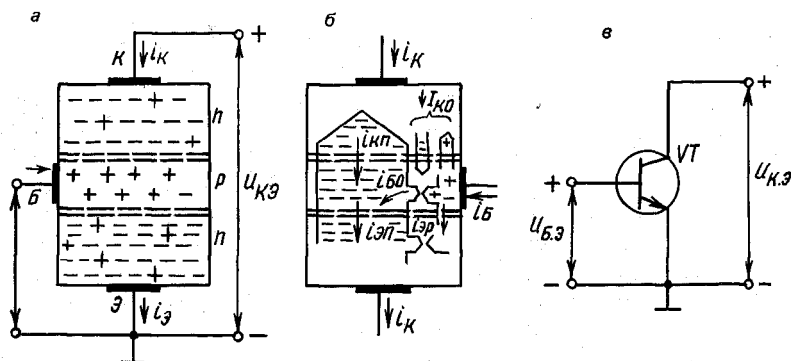


Рис. 51. Включение транзистора типа $n-p-n$ по схеме с общим эмиттером: а — структура; б — потоки носителей заряда; в) схема включения

с электронами, концентрация которых в эмиттере является высокой. Перешедшие в область базы электроны лишь в небольшой части вступают во взаимодействие с дырками, так как концентрация дырок в области базы является низкой. От 90 до 99,9 % инжектированных из эмиттера электронов диффундируют в область базы, толщина которой очень мала. Поэтому за короткий промежуток времени электроны достигают коллекторного перехода, где имеется сильное электрическое поле, вызванное напряжением $U_{кз}$. Это поле вызывает переход электронов в область коллектора. Появляется коллекторный ток. Кроме этих процессов, наблюдается переход дырок из области коллектора, где они являются неосновными носителями заряда, в область базы и неосновных носителей заряда в базе — электронов — в область коллектора. Эти носители заряда создают небольшой по величине обратный ток коллекторного перехода $I_{кбо}$. Таким образом, коллекторный ток обусловлен практически перемещением через коллекторный переход части проникших из эмиттера электронов. Для оценки соотношения между потоками носителей заряда, переходящих из эмиттера в базу и из базы в коллектор, вводят коэффициент передачи тока эмиттера $\alpha = \frac{i_k}{i_b}$. Он показывает,

какую часть тока эмиттера составляет коллекторный ток.

Перемещение части дырок из области базы в эмиттер и рекомбинация части дырок с инжектированными в нее из эмиттера электронами обуславливает появление тока базы. Отношение $\beta = \frac{i_k}{i_b}$ называют коэффициентом усиления тока базы.

Замечательное свойство биполярного транзистора состоит в том, что при работе его в активном режиме в случае небольшого изменения напряжения база — эмиттер можно получить существенное изменение потока электронов из эмиттера в базу и токов эмиттера и коллектора. Поэтому и является возможным простое управление этими токами.

Если на переход база — эмиттер подать отрицательное относительно эмиттера напряжение, а коллекторное напряжение сохранить прежним, инжекция электронов в область базы из эмиттера и дырок из базы в эмиттер прекратится. Через транзистор будет протекать лишь небольшой обратный ток коллекторного перехода $I_{кбо}$. Режим транзистора, соответствующий прекращению тока в цепи коллектора, называют режимом отсечки.

Прямое напряжение на эмиттерном переходе вызывает инжекцию электронов в область базы. Электрическое поле в коллекторном переходе для проникших в область базы электронов является тормозящим и не вызывает перехода электронов в область коллектора. Управление коллекторным током прекращается. Описанный режим называют режимом насыщения.

Взаимосвязь между токами электродов и напряжениями между электродами транзистора отражают входные и выходные вольт-

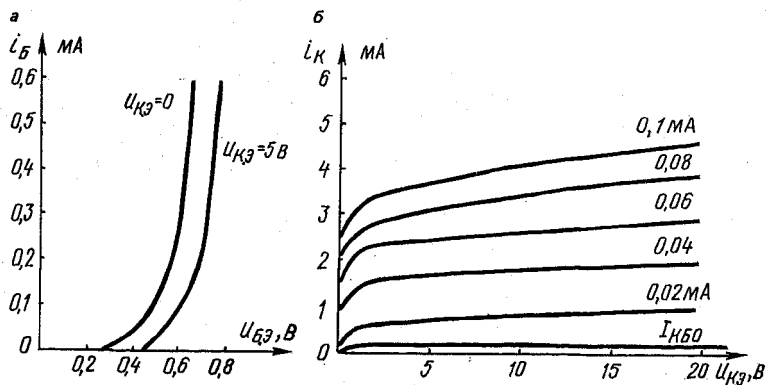


Рис. 52. Характеристики биполярного транзистора: а — входные; б — выходные

амперные характеристики. Входным током транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, является ток базы, а входным напряжением — напряжение между базой и эмиттером. Входная характеристика транзистора (рис. 52, а) выражает зависимость тока базы от напряжения база — эмиттер при постоянном напряжении между коллектором и эмиттером $U_{КЭ}$. Выходная характеристика — зависимость тока коллектора от напряжения коллектор — эмиттер при постоянном токе базы (рис. 52, б).

Из характеристик транзистора (см. рис. 52) видно, что изменение напряжения база — эмиттер на величину $\Delta u_{БЭ}$ при одном и том же напряжении коллектор — эмиттер изменяет ток базы на величину $\Delta i_{Б}$. Когда напряжение $u_{КЭ}$ не изменяется и происходит изменение тока базы на величину $\Delta i_{Б}$, то ток коллектора увеличивается на величину $\Delta i_{К}$. Взаимосвязь между изменениями напряжений и токов электродов выражают параметры транзистора — коэффициент передачи тока и входное сопротивление.

Коэффициент передачи тока при включении транзистора по схеме с общим эмиттером — это отношение приращения тока коллектора $\Delta i_{К}$ к связанному с ним приращению тока базы $\Delta i_{Б}$ при одном и том же коллекторном напряжении:

$$h_{21Э} = \frac{\Delta i_{К}}{\Delta i_{Б}}; U_{КЭ} = \text{const.}$$

Входное сопротивление транзистора определяется отношением изменения напряжения база — эмиттер $\Delta u_{БЭ}$ к вызванному им изменению тока базы $\Delta i_{Б}$ при одном и том же коллекторном напряжении:

$$h_{11Э} = \frac{\Delta u_{БЭ}}{\Delta i_{Б}}; U_{КЭ} = \text{const.}$$

Применяется также включение транзистора по схеме с общей

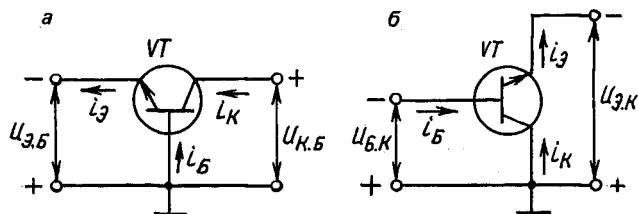


Рис. 53. Включение транзистора по схемам: а — с общей базой; б — с общим коллектором

базой (рис. 53, а) и общим коллектором (рис. 53, б). Когда база является электродом, который подключен ко входной и выходной цепи, входным током транзистора является ток эмиттера. Коллекторный ток меньше тока эмиттера. Следовательно, транзистор не усиливает ток.

Система маркировки транзисторов подобна той, которая принята для диодов. Первый элемент — буква (Г — германий, К — кремний, А — арсенид галлия, И — соединения индия) или соответственно цифра (1, 2, 3, 4); второй — буква, определяющая подкласс приборов (Т — биполярный, П — полевой); третий — цифра, определяющая основные функциональные возможности прибора (допустимое значение рассеиваемой мощности и максимальную рабочую частоту); четвертый, пятый и шестой — трехзначное число, обозначающее порядковый номер технологического типа транзисторов; седьмой — буква, условно определяющая классификацию по параметрам транзисторов, изготовленных по единой технологии. Например, КТ115А: транзистор кремниевый, биполярный, для устройств широкого применения, маломощный, высокочастотный, 115-й номер разработки, группа А.

29. Тиристоры

Тиристорами называют полупроводниковые приборы, обладающие свойством находиться в двух устойчивых состояниях: проводящем (ток через тиристор протекает) и запертом (ток в цепи тиристора практически отсутствует). Имеющиеся разновидности тиристоров — *динисторы* (приборы с двумя электродами), *тиристоры* триодные (трехэлектродные) и *симисторы* (симметричные тиристоры) — пропускают рабочий ток в обоих направлениях.

Тиристор можно представить как структуру $p-n-p-n$ (рис. 54, а). Крайние области тиристорной структуры называют эмиттерами, средние — базами; $p-n$ -переходы между базами и эмиттерами получили название эмиттерных, переход между базами — коллекторным. Электрод, соединенный с крайней областью p -типа, называют *анодом*, а соединенный с крайней областью n -типа — *катодом*, третий электрод — *управляющим*.

Если между базой и катодом напряжение не приложено,

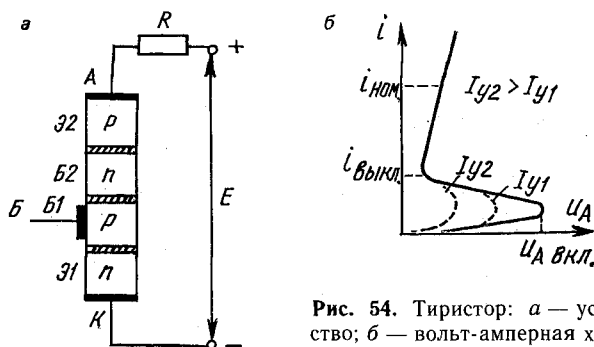


Рис. 54. Тиристор: а — устройство; б — вольт-амперная характеристика

тиристор можно считать двухэлектродным прибором, т. е. динистором. Приложенное внешнее напряжение указанной (см. рис. 54, а) полярности по отношению к эмиттерным переходам является прямым, а приходящее на коллекторный переход — обратным. Прямые напряжения на эмиттерных переходах небольшие, и поэтому внешнее напряжение почти полностью оказывается приложенным к обратно включенному коллекторному переходу. Увеличение напряжения внешнего источника увеличивает обратное напряжение и вызывает ударную ионизацию и пробой перехода. Ток в цепи тиристора скачком возрастает до значения, определяемого в основном сопротивлением включенного в цепь резистора. Зависимость между током в цепи тиристора и напряжением между анодом и катодом выражает вольт-амперная характеристика (рис. 54, б).

Таким образом, тиристор является прибором ключевым. Пока напряжение на нем не достигает значения $U_{A \text{ вкл.}}$, он оказывается в запертом состоянии, через него проходит небольшой обратный ток коллекторного перехода. При напряжении $U_{A \text{ вкл.}}$ тиристор переходит в открытое состояние. Для перевода тиристора из открытого состояния в закрытое необходимо уменьшить или полностью отключить подводимое к нему внешнее напряжение.

Переход тиристора в проводящее состояние возможен при меньшем напряжении $U_{A \text{ вкл.}}$, если в цепи управляющего электрода создать кратковременный, длительностью в несколько микросекунд, импульс тока путем подачи напряжения на переход между базой Б1 и эмиттером Э1. Полярность этого напряжения относительно катода должна быть положительной. Управляющий электрод может быть соединен с базой Б2. В этом случае управляющий импульс напряжения должен быть отрицательной полярности. Чем больше ток I_y в цепи управляющего электрода, тем меньше напряжение включения тиристора.

30. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы

Оптоэлектронными называют приборы, излучающие световые и близкие к ним по длине электромагнитные волны, воспринимающие или преобразующие их. Их делят на *излучающие приборы, приемники излучения и оптопары*, или оптроны.

Светодиоды относятся к светоизлучающим приборам. Они испускают свет при прохождении прямого тока через $p-n$ -переход. Применяются в индикаторных устройствах, системах отображения информации и др.

Светодиод (рис. 55) представляет собой полупроводниковую пластинку с $p-n$ -переходом, закрепленную на диэлектрическом основании. Кристалл полупроводника расположен внутри металлического баллона с линзой в его торце. Световое излучение возникает в процессе рекомбинации основных носителей заряда в области базы диода с прошедшими через $p-n$ -переход из эмиттера носителями заряда противоположного знака. Полупроводниковые материалы для светодиодов — карбид кремния, фосфид галлия, арсенид галлия. В зависимости от применяемого полупроводникового материала и вида примесей в нем светодиоды дают свечение определенного цвета, чаще всего зеленого, желтого, красного. Например, карбидо-кремниевые светодиоды 2Л101А дают желтое излучение, фосфид-галлиевые АЛ102В — зеленое, АЛ102А (Б, Г) — красное.

К полупроводниковым приемникам излучения относятся *фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы, фототиристоры*. Действие их основано на внутреннем фотоэффекте.

Фотодиоды — это полупроводниковые приборы, в которых действие света вызывает образование дополнительных пар электрон — дырка в области перехода. Электрическое поле перехода вызывает перемещение электронов в n -область, а дырок — в p -область полупроводника. Происходит увеличение контактной разности потенциалов между областями полупроводника диода.

Конструкция фотодиода включает (рис. 56,а) пластинку полупроводника с образованным в ней $p-n$ -переходом, поме-

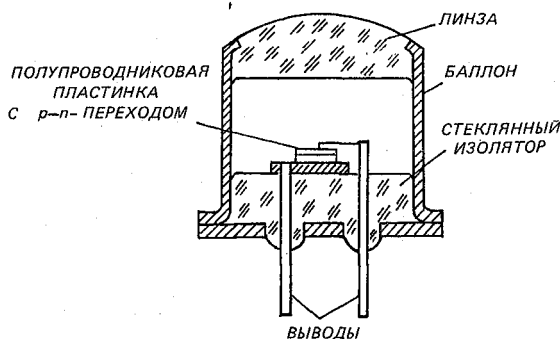


Рис. 55. Конструкция светодиода

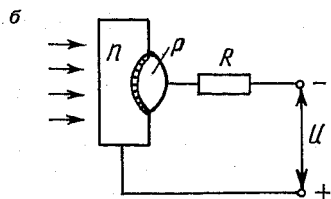
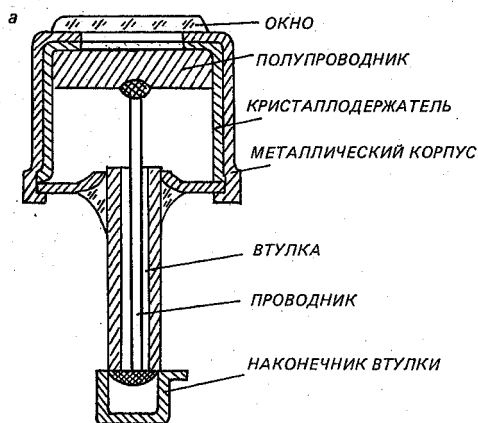


Рис. 56. Фотодиод: а — конструкция; б — схема включения

шенную в металлический корпус с окном в верхней его части. Electroдами фотодиода являются его металлические корпус и наконечник втулки, с которым соединен кристалл примеси.

Если к фотодиоду подвести обратное напряжение и в его цепь включить резистор R (рис. 56, б), образование новых пар подвижных носителей заряда под действием света будет вызывать увеличение обратного тока и падение напряжения на резисторе.

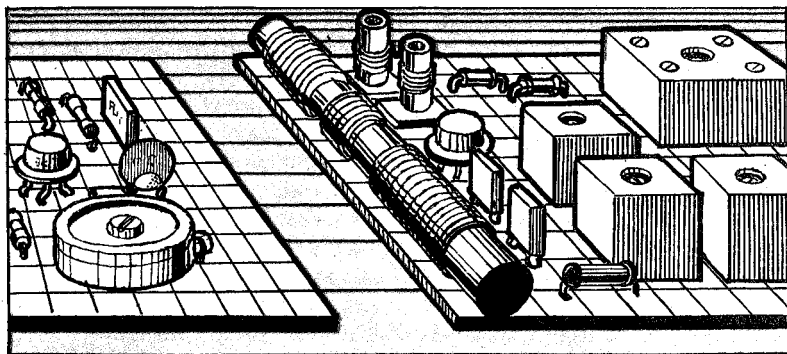
Фотодиоды используют в устройствах автоматики, в измерительных приборах, вычислительных машинах в качестве источников ЭДС и для управления токами в цепях.

В фототранзисторах происходит освещение области базы. Появление дополнительных пар электрон — дырка вызывает воздействие на ток коллектора транзистора. В фототиристорах свет воздействует на ток управляющего электрода, что определяет напряжение включения тиристора.

Оптроны включают два оптоэлектронных полупроводниковых элемента — излучающий и фотоприемный. Излучателем выступает светодиод, а фотоприемником — фоторезистор, фотодиод, фототранзистор или фототиристор. Сигналом управления током является излучение светодиода. Управляемая цепь в такой конструкции никакого воздействия на сигнал управления не оказывает.

Вопросы и задания

1. Какие вещества называют полупроводниками? Каковы их свойства?
2. Какой полупроводниковый прибор называют диодом? Назовите известные вам разновидности полупроводниковых диодов.
3. Какой транзистор называют полевым? биполярным?
4. Объясните устройство и принцип работы полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом.
5. Какие зависимости выражает характеристика прямой передачи полевого транзистора?
6. В чем отличие биполярного транзистора от полевого?
7. Какие характеристики биполярного транзистора называют входными? выходными?
8. Какой параметр транзистора называют коэффициентом передачи тока? входным сопротивлением?
9. Какие приборы называют тиристорами? светодиодами? фоторезисторами? Каков принцип их работы?



Глава VII

УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

31. Принцип работы транзисторного усилителя

Усилителями электрических сигналов называют устройства, которые увеличивают мощность подводимых к ним электрических сигналов.

Усилители содержат *активные* элементы (транзисторы, электронные лампы и др.), преобразующие энергию источника питания в энергию усиленного сигнала, и *пассивные* (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т. д.), выполняющие вспомогательную роль. Транзисторы являются в настоящее время наиболее распространенными активными элементами усилителей.

Рассмотрим принцип работы усилителя на основе анализа процессов в цепи с последовательным соединением полевого транзистора КП302Б и резистора R_C сопротивлением 1 кОм (рис. 57, а). С общим проводом цепи соединен исток. Питается цепь от источника с напряжением $E_C = 15$ В на зажимах. Для управления током транзистора установлен источник с напряжением $E_3 = 3$ В на зажимах. Управляющее напряжение затвор — исток регулируется потенциометром $R1$.

Напряжение на транзисторе $u_{c,и}$ и на резисторе $i_C R_C$ в сумме равно напряжению питания $E_C = u_{c,и} + i_C R_C$. Отсюда $u_{c,и} = E_C - i_C R_C$, т. е. при заданных значениях E_C и R_C напряжение u_c определяется значением тока i_C . Как видно из стокозатворной характеристики транзистора (рис. 57, б), ток стока появляется при напряжении $u_{з,и} = -2,5$ В и достигает значения 14,5 мА, когда напряжение $u_{з,и} = 0$. Для напряжений $u_{з,и}$ в указанных пре-

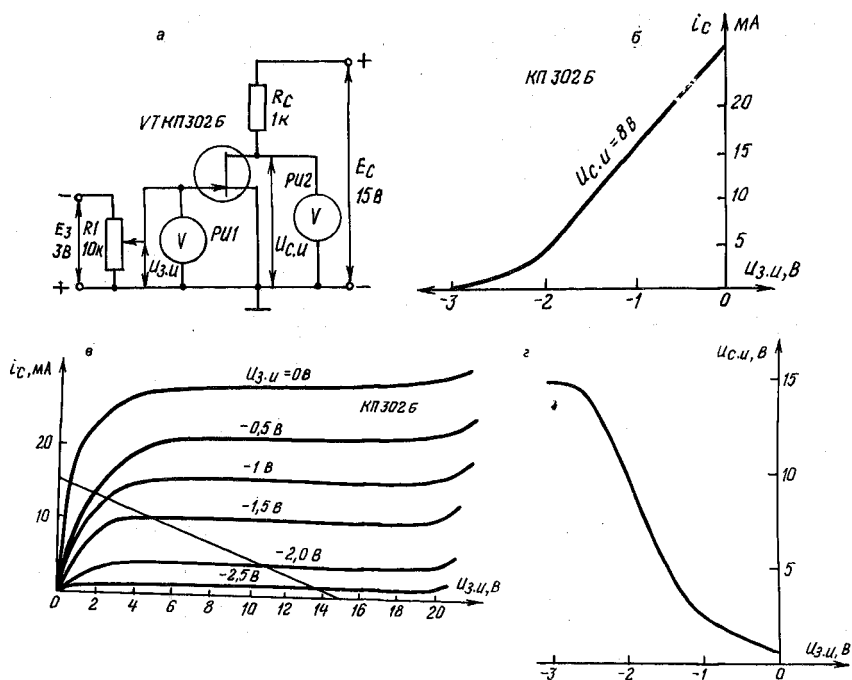


Рис. 57. Усилитель на полевом транзисторе: *а* — схема; *б* — стоко-затворная характеристика транзистора КП302Б; *в* — выходные характеристики транзистора КП302Б; *г* — зависимость напряжения на выходе усилителя от управляющего напряжения

делах можно определять значения тока i_C и рассчитывать или находить по выходным характеристикам транзистора (рис. 57, в) для каждого из этих значений напряжения u_C . По этим данным строят график зависимости напряжения стока u_C от управляющего напряжения затвор — исток $u_{3,и}$ (рис. 57, г).

Из проведенного анализа следует, что при повышении потенциала затвора наблюдается понижение потенциала стока, а малые изменения напряжения $u_{3,и}$ вызывают гораздо большие изменения напряжения $u_{C,и}$. В цепи имеется усиление по напряжению. Для его оценки введена величина, называемая коэффициентом усиления по напряжению $K_u = \Delta u_{C,и} / \Delta u_{3,и}$. Значение K_u зависит от крутизны стоко-затворной характеристики транзистора S и сопротивления резистора R_C .

В рассматриваемой цепи при изменениях управляющего напряжения $u_{3,и}$ в пределах от -2 В до $-1,5$ В (см. рис. 57, г), т. е. на величину $\Delta u_{3,и} = -1,5 - (-2) = 0,5$ В, напряжение $u_{C,и}$ изменяется от 16 В до 10 В, т. е. $\Delta u_{C,и} = 16 - 10 = 6$ В.

$$\text{Тогда } K_u = \frac{\Delta u_{C,и}}{\Delta u_{3,и}} = \frac{6}{-0,5} = -12.$$

Подобным образом можно провести анализ процессов в простейшем усилителе на биполярном транзисторе (рис. 58, а). Следует, однако, учитывать, что в управлении током биполярного транзистора имеются некоторые особенности, а в определении величины коллекторного тока возникают определенные сложности. Коллекторный ток протекает только при наличии тока базы. По входной характеристике транзистора величину коллекторного тока определить нельзя. По ней устанавливают величину тока базы и, используя семейство выходных характеристик, находят значение коллекторного тока.

Как видно из входной характеристики транзистора (рис. 58, б), ток базы появляется при напряжении база — эмиттер, большем 0,6 В. Для управления током базы, а следовательно, и током коллектора, напряжение $u_{Б.э}$ должно превосходить эту величину.

Ток коллектора i_K определяется по выходным характеристикам транзистора с учетом сопротивления резистора R_K (рис. 58, в). Используя характеристики и производя расчеты, можно установить взаимосвязь между напряжениями $u_{К.э}$ и $u_{Б.э}$ и построить кривую, отражающую зависимость $u_{К.э} = f(u_{Б.э})$.

Если к выходу усилителя подключить нагрузку, то под действием управляющего напряжения на входе усилителя будет изме-

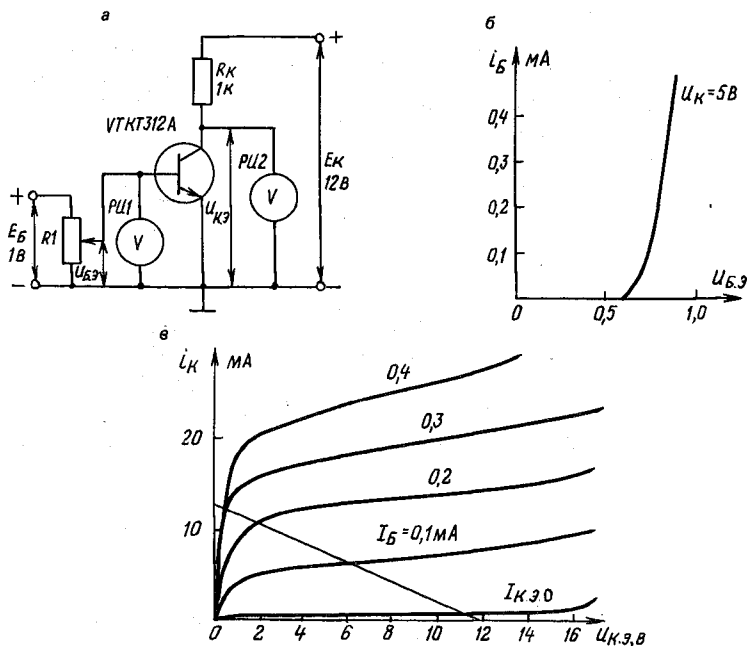


Рис. 58. Усилитель на биполярном транзисторе КТ312А: а — схема; б — входная характеристика транзистора; в — выходные характеристики транзистора

няться ток в нагрузке. Мощность, которую усилитель отдает нагрузке, может оказаться во много (в сотни и тысячи) раз больше мощности, которая расходуется во входной цепи его. Это увеличение отдаваемой нагрузке мощности и энергии образуется за счет мощности и энергии источника питания. Усилителем, таким образом, является преобразователь энергии источника питания в энергию усиленного сигнала.

Пределы изменений коллекторного тока или тока стока в транзисторе усилителя и характер зависимости этого тока от изменений напряжения затвора или базы транзистора зависят не только от подводимого напряжения сигнала, но и от установленного предварительно, до подачи входного напряжения, постоянного напряжения затвор — исток или база — эмиттер, называемого напряжением покоя или напряжением смещения и обозначаемого как $U_{з.ип}$ или $U_{б.эп}$. Установим, например, в усилителе на полевом транзисторе КП302Б напряжение смещения $U_{з.ип} = -3$ В и подведем к затвору транзистора переменное напряжение. Ток транзистора будет протекать только при повышении потенциала затвора. Понижение потенциала затвора не вызовет изменения тока стока, транзистор будет находиться в запертом состоянии. Подобным будет эффект при подаче напряжения смещения на базу транзистора КТ312А, если установить напряжение $U_{б.эп} = 0,6$ В.

Чтобы изменения токов транзисторов происходили как при понижении, так и повышении потенциалов затвора или базы, должны быть установлены такие напряжения покоя $U_{з.ип}$ и $U_{б.эп}$, чтобы при этих напряжениях смещения протекали токи. Наибольшие изменения токов транзисторов и напряжений на выходе рассмотренных простейших усилителей возможны в том случае, если эти напряжения будут соответствовать положению точки покоя P на середине линейных участков графиков для зависимости $i_{с.и} = f(u_{з.и})$ (см. рис. 57, г) или $i_{к.э} = f(u_{б.э})$ (см. рис. 58, г). Для усилителя на полевом транзисторе желательно установить напряжение смещения $U_{з.ип} = -1,9$ В, для усилителя на транзисторе КТ312А — $U_{б.эп} = 0,74$ В.

В режиме покоя ток в цепи затвора практически отсутствует, в цепи базы протекает ток базы покоя $I_{бп}$. Через транзисторы протекают токи покоя стока $I_{сп}$ и коллектора $I_{кп}$ и устанавливаются напряжения покоя сток — исток $U_{с.ип}$ и коллектор — эмиттер $U_{к.эп}$.

В зависимости от устанавливаемого напряжения смещения $U_{з.ип}$ или $U_{б.эп}$ и амплитуды входного напряжения возможны режимы работы усилителя А, В или С.

Усилитель режима А характерен тем, что в нем изменение напряжения на выходе, т. е. соответственно $\Delta u_{с.и}$ или $\Delta u_{к.э}$, пропорционально изменению напряжения на его входе, т. е. $\Delta u_{з.и}$ или $\Delta u_{б.э}$. В рассмотренном усилителе на биполярном транзисторе такая зависимость имеет место, если установлено напряжение смещения $U_{б.эп} = 0,74$ В и амплитуда переменного напряжения

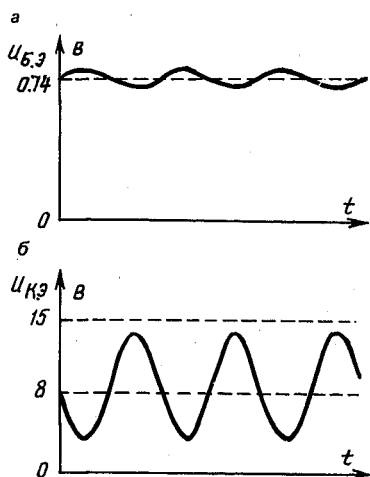


Рис. 59. Напряжения усилителя режима А: а — базовое; б — коллекторное

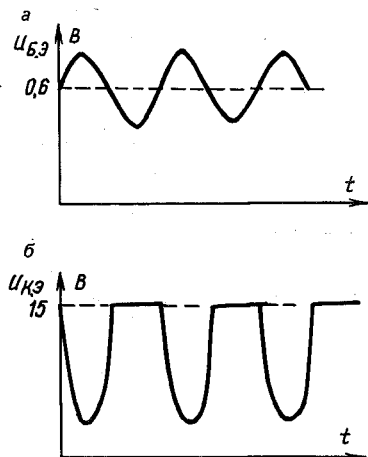


Рис. 60. Напряжения усилителя режима В: а — базовое; б — коллекторное

на базе транзистора $U_{бт}$ не превосходит 0,02 В (рис. 59).

Режиму В характерно изменение напряжения на выходе усилителя только в случае повышения потенциала его входа. Этого можно добиться, установив напряжение смещения $U_{б, эп} = 0,6$ В. При таком напряжении смещения транзистор заперт. Появление коллекторного тока и соответствующее понижение потенциала коллектора возможны, если потенциал базы повысится. Отклонения напряжения на входе усилителя в сторону его уменьшения и увеличения вызовут только одностороннее изменение коллекторного напряжения (рис. 60). Форма кривой коллекторного напряжения сильно отличается от формы кривой напряжения база — эмиттер.

В усилителе режима С потенциал затвора или базы устанавливается ниже, чем в усилителе режима В. Ток стока или коллекторный ток появляется лишь при положительных значениях переменного напряжения на входе определенной величины. В течение большей части периода переменного напряжения транзистор находится в запертом состоянии. Длительность импульсов протекающего через транзистор тока меньше половины периода входного переменного напряжения. Отличие формы кривой выходного напряжения от входного получается значительным.

32. Классификация усилителей и показатели их работы

В зависимости от применяемого активного элемента различают усилители *ламповые* (с электронными лампами), *транзисторные* (на полевых и биполярных транзисторах), *диодные* (на некоторых типах диодов) и т. д.

При подаче на вход усилителя сигнала определенной амплитуды в одних усилителях предпочитают получать по возможности большую амплитуду напряжения на выходе (усилители напряжения), в других — достичь максимально возможных изменений тока в нагрузке, не заботясь об усилении по напряжению (усилители тока), в третьих — такое усиление по току и напряжению, чтобы мощность, отдаваемая усилителем нагрузке, была как можно больше (усилители мощности).

По разновидности включаемых в цепь коллектора или эмиттера элементов различают усилители резисторные, дроссельные, трансформаторные, резонансные (с колебательным контуром) и т. д.; по значению частот усиливаемых сигналов — усилители постоянного тока (усиливают медленно меняющиеся сигналы), звуковых частот (усиливают сигналы с частотами от десятков герц до 20 килогерц), радиочастоты (работают на частотах выше 100 килогерц), широкополосные (работают в диапазоне частот от десятков герц до сотен мегагерц) и другие.

Параметры усилителя:

входное напряжение — напряжение сигнала, подводимое ко входу усилителя; характеризуется амплитудой, частотой, формой кривой и т. д.;

выходное напряжение — напряжение на выходе усилителя; также характеризуется формой кривой, амплитудой, частотой и т. д.;

коэффициент усиления по напряжению K_u определяется отношением амплитуд напряжений на выходе усилителя $U_{\text{вых.м}}$ и входе $U_{\text{вх.м}}$:

$$K_u = \frac{U_{\text{вых.м}}}{U_{\text{вх.м}}}$$

Различают также коэффициенты усиления по току K_i и по мощности K_p .

Характеристики усилителей отражают взаимосвязь усиленного сигнала на выходе усилителя и сигнала на его входе.

Амплитудная характеристика усилителя показывает зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного при неизменной его частоте; амплитудно-частотная выражает зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты входного при неизменной его амплитуде.

33. Резисторный усилитель напряжения с общим эмиттером и общим истоком

Назначение усилителя напряжения — получение по возможности большей амплитуды напряжения на выходе усилителя при минимальных искажениях формы сигнала. Усилитель называется *резисторным*, так как в цепь стока или коллектора транзистора включается резистор. С общим проводом соединяется исток или эмиттер.

Чтобы искажения формы выходного сигнала усилителя были

минимальными, обеспечивают его работу в режиме А. С этой целью на управляющий электрод транзистора — базу или затвор — подают такое напряжение смещения $U_{Б.ЭП}$ или $U_{З.ИП}$, чтобы через транзистор протекал ток покоя $I_{КП}$ или $I_{СП}$, и подводят небольшое по амплитуде, не более десятков милливольт, переменное входное напряжение. Напряжения смещения подают от того же источника, который питает цепь коллектора или истока. Для этого устанавливают специальные цепи смещения. В усилителе на биполярном транзисторе необходимое напряжение смещения можно создать путем включения резистора $R1$ в цепь базы (рис. 61, а). По отношению к источнику питания резистор $R1$ и переход база — эмиттер включены последовательно. Поэтому $U_{Б.ЭП} + I_{БП}R1 = E_K$ или $U_{Б.ЭП} = E_K - I_{БП}R1$. Требуемое напряжение смещения $U_{Б.ЭП}$ устанавливается при определенном токе базы $I_{БП} = I_{1П}$. Величина тока определяет сопротивление резистора $R1$:

$$R1 = \frac{E_K - U_{Б.ЭП}}{I_{БП}}$$

Напряжение E_K во много раз больше напряжения $U_{Б.ЭП}$. Поэтому расчет можно упростить:

$$R1 \approx \frac{E_K}{I_{БП}}$$

Большую стабильность режима по постоянному току обеспечивает цепь в виде делителя напряжения в цепи базы на резисторах $R1$ и $R2$ (рис. 61, б). Напряжением смещения является напряжение, приходящееся на резистор $R2$. По резистору $R1$ протекает ток $I_{1П}$, который является суммой тока базы $I_{БП}$ и тока $I_{2П}$, протекающего по резистору $R2$. Напряжение смещения $U_{Б.ЭП}$ является разностью напряжения E_K и падения напряжения $I_{1П}R1$ на резисторе $R1$:

$$U_{Б.ЭП} = E_K - I_{1П}R1 = E_K - (I_{БП} + I_{2П})R1.$$

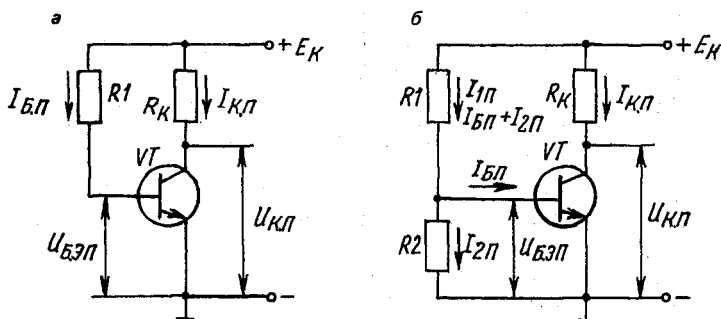


Рис. 61. Схемы цепей для подачи напряжения смещения: а — с фиксированным током базы; б — с фиксированным напряжением смещения

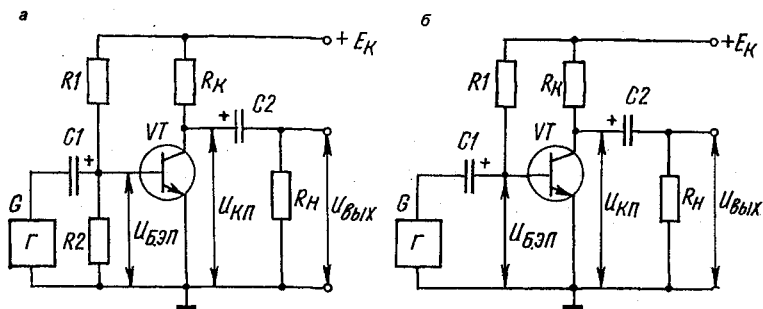


Рис. 62. Схемы резисторных усилителей: а — цепь смещения в виде делителя напряжения; б — цепь смещения с одним резистором

Чтобы постоянный ток не проходил по цепи источника входного сигнала и нагрузке усилителя, а также не нарушался режим работы транзистора, на входе и выходе усилителя устанавливают разделительные конденсаторы.

Схемы практически используемых усилителей с общим эмиттером представлены на рис. 62, а, б. Каждый из усилителей имеет транзистор VT и последовательно с ним включенный резистор R_K , на котором появляется изменяющееся напряжение при изменениях коллекторного тока. В цепи базы имеется цепь смещения, содержащая один или два резистора. Чаще устанавливают два резистора, так как в этом случае напряжение смещения более стабильно и почти не меняется при изменениях температуры транзистора. На входе и выходе усилителя установлены разделительные конденсаторы $C1$ и $C2$. Ко входу усилителя подключен источник входного сигнала — генератор G , к выходу — нагрузка усилителя R_H . При отсутствии входного сигнала напряжение между базой и эмиттером равно постоянному напряжению смещения $U_{БЭП}$, а напряжение между коллектором и общей точкой — постоянному напряжению $U_{КП}$.

Рассмотрим работу резисторного усилителя напряжения. Для этого обратимся к графикам напряжений и токов в его цепи для двух промежутков времени (рис. 63). В промежуток времени от 0 до t_1 входное напряжение $u_{вх}$ не подается, в промежуток времени, больший t_1 , на входе усилителя имеется синусоидальное входное напряжение (рис. 63, а). При наличии входного сигнала напряжение база — эмиттер $u_{БЭ}$ становится пульсирующим (рис. 63, б), равным сумме постоянного напряжения смещения $U_{БЭП}$ и переменного напряжения $u_{вх}$. Ток базы также становится пульсирующим (рис. 63, в).

Предположим, что усилитель работает в режиме А. Тогда ток коллектора изменяется с течением времени так же, как и ток базы (рис. 63, г). При увеличении тока коллектора уменьшается коллекторное напряжение, фаза переменной составляющей коллекторного напряжения отличается от фазы переменной составляющей

щей тока коллектора и фазы переменной составляющей входного напряжения на 180° (рис. 63, д). Через конденсатор C_2 постоянное напряжение на нагрузку R_n не поступает, в промежуток времени от 0 до t_1 напряжения на выходе усилителя нет. Когда напряжение u_k становится пульсирующим, через конденсатор C_2 на нагрузку R_n передается его переменная составляющая u_k и на выходе усилителя появляется переменное выходное напряжение (рис. 63, е).

В усилителе на полевом транзисторе с управляющим $p-n$ -переходом напряжение смещения $U_{з.ип}$ для перехода должно быть запирающим. Такое напряжение можно создать, если включить резистор R_n в цепь истока (рис. 64). Протекающий по каналу транзистора в направлении от стока к истоку ток стока $I_{ип}$ создает на резисторе R_n падение напряжения $U_{ип} = I_{ип} \cdot R_n$. Относительно общего провода цепи потенциал истока является положительным. Затвор соединен с общим проводом через резистор $R1$. Ток по резистору не протекает и падения напряжения на нем нет. Потенциал затвора равен потенциалу общего провода и является отрицательным относительно истока: $U_{з.ип} = -U_{ип}$. Величина напряжения смещения регулируется подбором сопротивления резистора R_n .

Подводимое к усилителю переменное напряжение вызывает изменения тока стока, а следовательно, изменяется величина напряжения u_n . Чтобы оно было постоянным, параллельно резистору R_n включают конденсатор C_n . В случае увеличения тока стока конденсатор заряжается, при уменьшении — разряжается через резистор R_n . Но при этом напряжение на конденсаторе изменяется

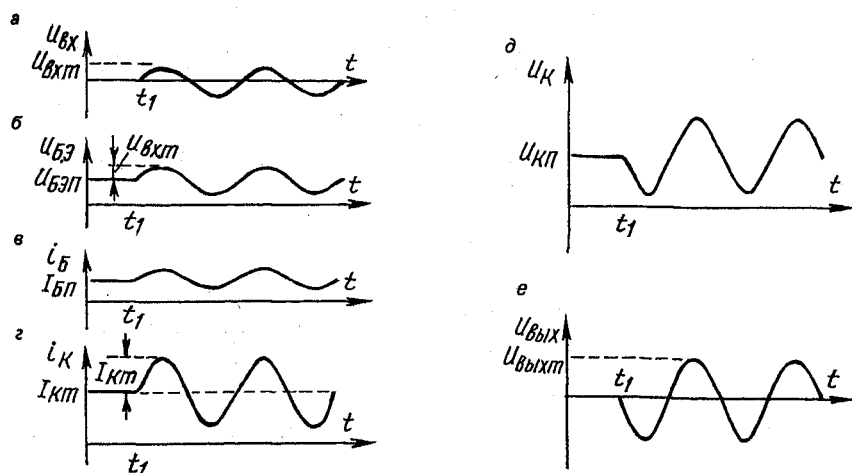


Рис. 63. Напряжения и токи транзистора в резисторном усилителе напряжения: а — входное напряжение; б — напряжение база — эмиттер; в — ток базы; г — ток коллектора; д — коллекторное напряжение; е — выходное напряжение

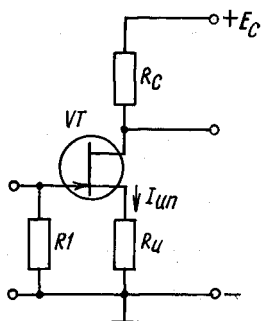


Рис. 64. Усилитель на полевом транзисторе с цепью автоматического смещения

медленно. При достаточно быстрых изменениях тока стока напряжение на резисторе R_n можно считать постоянным. Емкость устанавливаемого конденсатора C_n должна быть достаточно большой.

34. Обратная связь в усилителях. Эмиттерный повторитель

Обратная связь в усилителях создается при подаче части напряжения с выхода на вход усилителя и может быть полезной, приводящей к улучшению показателей работы усилителей или, наоборот, вызывающей нежелательные явления. Различают *положительную* и *отрицательную* связи. При положительной обратной связи напряжение, приходящее с выхода усилителя на его вход, увеличивает подводимое к переходу база — эмиттер переменное напряжение, в случае отрицательной — уменьшает. В усилителях низкой частоты применяют отрицательную обратную связь. Она способствует уменьшению искажения формы кривой усиливаемого сигнала и расширению диапазона частот, но снижает коэффициент усиления каскада. Наиболее просто обратную связь можно осуществить, если включить резистор R_3 в цепь эмиттера (рис. 65, а) или соединить резистор $R1$ с коллектором транзистора (рис. 65, б), а не с положительным полюсом источника питания.

При включении резистора R_3 , когда ко входу усилителя подводится переменное напряжение, изменяется напряжение u_3 между эмиттером и общей точкой усилителя. Амплитуда управляющего напряжения $U_{бэ\text{т}}$ при наличии обратной связи равна

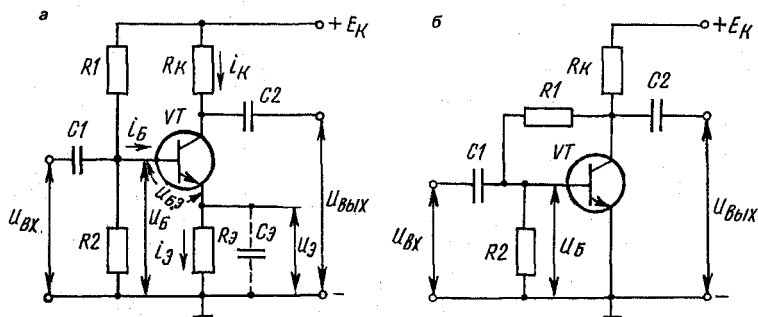
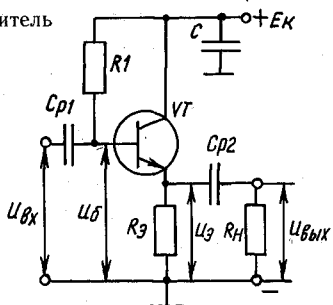


Рис. 65. Усилитель с обратной связью: а — с резистором в цепи эмиттера; б — с подключением резистора $R1$ к коллектору

Рис. 66. Эмиттерный повторитель



разности амплитуд входного напряжения $U_{вх.т}$ и переменного напряжения $U_{эп}$ между эмиттером и общей точкой.

Если параллельно резистору R_3 включить конденсатор C_3 (см. рис. 65, а; соединение показано штриховой линией) достаточно большой емкости, пульсации напряжения u_3 будут сглажены, напряжение u_3 будет оставаться практически неизменным и при подаче входного напряжения напряжение обратной связи будет отсутствовать.

Цепочку $R_3 C_3$ часто используют для температурной стабилизации режима усилительного каскада. Стабилизация режима состоит в поддержании установленного напряжения и токов покоя транзистора в случае его нагрева. Постепенное увеличение тока $I_{Эп}$ приводит к увеличению напряжения $U_{Эп}$ и уменьшению напряжения $U_{Б.Эп}$, вызывающего уменьшение тока эмиттера.

В усилителе с резистором $R1$, присоединенным к коллектору транзистора (см. рис. 65, б), ток, текущий по этому резистору и являющийся током базы, вызван не постоянным напряжением E_k , а пульсирующим коллекторным напряжением. Переменная составляющая этого напряжения сдвинута по фазе на 180° относительно входного напряжения. Если под действием входного напряжения ток базы возрастает, то переменное напряжение коллектора приводит к обратному эффекту, т. е. к уменьшению тока базы.

Имеются разновидности усилителей, в которых напряжением обратной связи является выходное напряжение усилителя. Такой усилитель может быть образован в виде цепи с последовательным включением транзистора и резистора R_3 , присоединяемого к эмиттеру (рис. 66). Резистор $R1$ обеспечивает протекание в цепи базы тока покоя базы $I_{Бп}$. Нагрузку R_n подключают к усилителю через разделительный конденсатор C_{p2} .

35. Усилители постоянного тока

Усилители постоянного тока обеспечивают усиление по напряжению, току или мощности электрических сигналов в форме сколь угодно медленно изменяющегося напряжения. Такие сигналы возникают в датчиках различных автоматических устройств, измерительной аппаратуре, стабилизаторах постоянного напряжения и т. д.

Усилители этой разновидности являются резисторными. Они не содержат разделительных конденсаторов, трансформаторов или катушек индуктивности. Резисторный усилитель переменного тока может быть преобразован в усилитель постоянного тока, если из

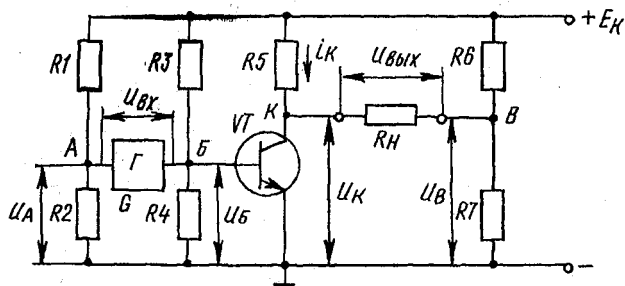


Рис. 67. Усилитель постоянного тока

его цепи изъять разделительные конденсаторы и установить дополнительно делители напряжения на резисторах R_1 , R_2 и R_6 , R_7 (рис. 67). Делители напряжения позволяют установить потенциал точки А, равный потенциалу точки В, а потенциал точки В — потенциалу точки К. При равенстве потенциалов указанных точек подключение источника сигнала между точками А и В и нагрузки между точками К и В не приводит к появлению тока в цепи генератора G и в нагрузке R_H .

Предположим теперь, что на зажимах источника входного сигнала появилось напряжение, в результате чего возросло напряжение u_B . В этом случае ток коллектора возрастет, а напряжение u_K станет меньше. Между точками К и В возникнет напряжение, и по сопротивлению нагрузки R_H в направлении от В к К пойдет ток. Если полярность входного напряжения станет противоположной, ток i_K уменьшится и напряжение u_K возрастет. Изменится полярность напряжения на нагрузке R_H и направление тока в ней.

В случае изменения напряжения питания E_K изменится напряжение u_K и напряжение на резисторе R_7 . Эти изменения напряжений не будут одинаковыми, и на нагрузке R_H появится паразитный сигнал.

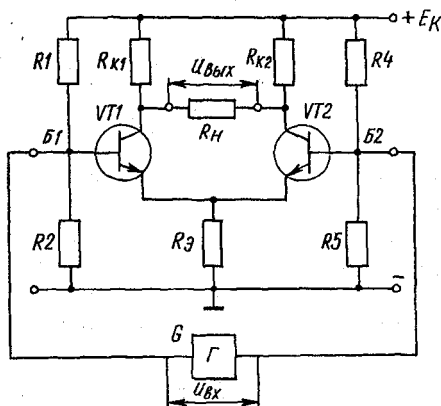


Рис. 68. Балансный усилитель постоянного тока

Паразитный сигнал можно в значительной мере уменьшить, если построить усилитель постоянного тока по *балансной* схеме (рис. 68). В таком усилителе устанавливают два транзистора с одинаковыми характеристиками и параметрами, у которых в цепях баз и коллекторов — одинаковые резисторы. Сопротивление нагрузки R_H включают между коллекторами транзисторов. В режиме покоя токи в цепях коллекторов одинаковые, коллекторные напряжения транзисторов равны, напряжение на нагрузке равно нулю и ток по

ней не проходит. Изменения напряжения питания, температуры и некоторые другие воздействия на усилитель вызывают равные приращения начальных токов транзисторов и равные приращения коллекторных напряжений. Напряжение на нагрузке остается неизменным. В реальных усилителях полной симметрии токов достичь невозможно. На выходе усилителя при отсутствии входного сигнала возникают небольшие напряжения.

Входное напряжение включается между базами транзисторов. Под его действием ток одного из транзисторов, например $VT1$, возрастает, а ток второго, т. е. транзистора $VT2$, уменьшается на такую же величину. В результате коллекторное напряжение u_{K1} уменьшается на величину $-\Delta u_{K1}$, а коллекторное напряжение u_{K2} возрастает на величину Δu_{K2} . К нагрузке R_n приложено выходное напряжение

$$u_{\text{вых}} = \Delta u_{K2} - (-\Delta u_{K1}) = \Delta u_{K1} + \Delta u_{K2},$$

которое вызывает появление тока в ней.

В балансном усилителе можно образовать два входа, если одним из них будет вход между базой транзистора $VT1$ и общей точкой усилителя, а второй — между базой транзистора $VT2$ и общей точкой. Тогда такой усилитель будет дифференциальным — выходное напряжение в нем окажется пропорциональным разности входных напряжений.

В рассмотренных усилителях постоянного тока источники входного сигнала и нагрузка не могут быть соединены с общим проводом цепи. Чтобы это осуществить, усилитель должен иметь два источника питания и специальные цепи понижения потенциалов точек усилителя, называемые цепями сдвига уровня напряжения.

36. Многокаскадные усилители

При малых амплитудах входных напряжений может оказаться, что один усилительный каскад не в состоянии обеспечить получение выходного напряжения требуемой амплитуды. В таких случаях устанавливают несколько каскадов усилителей, подавая выходное напряжение первого каскада на вход второго, напряжение с выхода второго — на вход третьего и т. д. В каждом из каскадов происходит увеличение амплитуды и мощности сигнала. Обычно ограничиваются двумя — тремя каскадами усилителя напряжения, хотя при необходимости их число может быть и больше. В каскадах усилителей устанавливают цепи обратной связи, часто напряжение обратной связи подают с выхода последнего каскада на вход первого.

Многокаскадные усилители могут быть образованы путем последовательного соединения отдельных резисторных каскадов с цепями смещения в каждом из них и передачей сигналов от каскада к каскаду через разделительные конденсаторы (рис. 69). В первом каскаде цепь смещения представляет собой делитель напряжения с резисторами $R1$, $R2$. Подключая резистор $R1$ к кол-

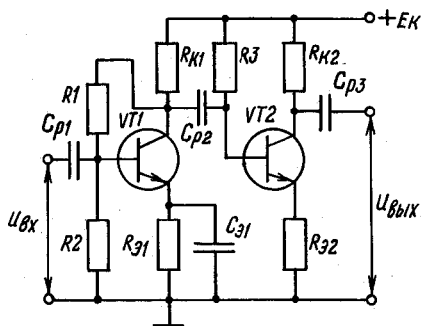


Рис. 69. Двухкаскадный усилитель с емкостной связью между каскадами

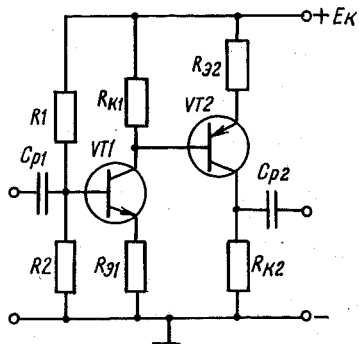


Рис. 70. Двухкаскадный усилитель на разнотипных транзисторах

лктору транзистора $VT1$, создают обратную связь по напряжению. Имеется также цепочка термостабилизации $R_{31}C_{31}$. Во втором каскаде требуемый ток покоя базы задается включением резистора $R3$. Резистор R_{32} предназначен для создания обратной связи по переменному току.

В разрабатываемых ранее многокаскадных усилителях напряжения для создания межкаскадных связей часто применялись трансформаторы. Из-за сложности в их изготовлении, сравнительно высокой стоимости и появления дополнительных искажений сигнала от применения трансформаторов отказались. Появились различные схемы усилителей с непосредственной (гальванической) связью между каскадами, при которой выход предшествующего каскада соединяют проводником со входом последующего и на вход последнего поступает как постоянное напряжение, так и переменное. Одна из них — схема с двумя разнотипными транзисторами (рис. 70). Такую пару транзисторов называют *комплементарной* или *дополняющей*. Оба каскада являются усилителями с общим эмиттером. В каждом из них имеется

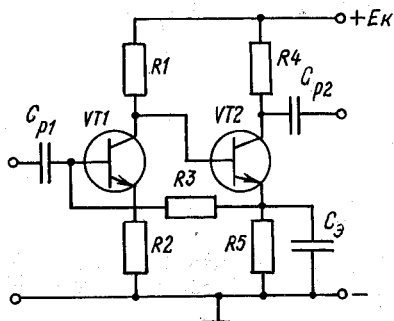


Рис. 71. Двухкаскадный усилитель с обратной связью по постоянному и переменному токам

отрицательная обратная связь по току, обеспечиваемая включением резисторов R_{31}, R_{32} в цепи эмиттеров. Приходящее на резистор R_{K1} напряжение управляет током транзистора $VT2$.

Применяются также двухкаскадные усилители с непосредственными связями между каскадами и отрицательной обратной связью по постоянному и переменному токам (рис. 71). Постоянное напряжение, под действием которого про-

текает ток в цепи базы транзистора $VT1$, снимается с резистора $R5$. В случае увеличения токов транзистора $VT2$ происходит увеличение напряжения на резисторе $R5$ и тока базы транзистора $VT1$. Потенциал коллектора этого транзистора понижается, уменьшается ток базы транзистора $VT2$, что вызывает уменьшение токов коллектора и эмиттера этого транзистора.

37. Усилители мощности

Усилители мощности предназначены для получения и передачи потребителю возможно большей мощности сигнала при заданном сопротивлении подключаемой к усилителю нагрузки. Нагрузкой их являются катушки громкоговорителей, обмотки электромагнитных реле, обмотки электрических машин и т. д. Усилители мощности работают при больших амплитудах напряжений и токов в цепях управляемых элементов — транзисторов. Мгновенные значения этих величин могут быть близкими к максимально допустимым. Важнейшими показателями усилителей мощности являются *отдаваемая в нагрузку мощность, коэффициент полезного действия, степень отличия формы выходного сигнала от формы напряжения на входе усилителя*.

Выходная мощность усилителя зависит от сопротивления нагрузки. В усилителях радиоприемников, телевизоров, магнитофонов, радиоузлов потребителями энергии усиленного сигнала являются динамические громкоговорители. Их катушки обладают сопротивлением 4...16 Ом. Если такой громкоговоритель подключить в качестве нагрузки к усилителю, в котором транзистор включен по схеме с общим эмиттером, то амплитуда тока в катушке громкоговорителя может достигать максимального для данного транзистора значения, но, поскольку сопротивление катушки является низким, амплитуда напряжения на нагрузке и отдаваемая нагрузке мощность окажутся небольшими. Чтобы увеличить сопротивление подключаемой к коллектору транзистора нагрузки, а тем самым увеличить отдаваемую ей мощность и повысить КПД усилителя, громкоговоритель подключают через понижающий трансформатор (рис. 72). Как показывают расчеты, для переменного тока первичная обмотка трансформатора создает сопротивление $R_1 = \frac{R_H}{k^2}$, где k — коэффициент трансформации. Понижающий трансформатор преобразует низкое сопротивление нагрузки в более высокое сопротивление первичной обмотки трансформатора переменному току. Одновременно трансформатор не пропускает постоян-

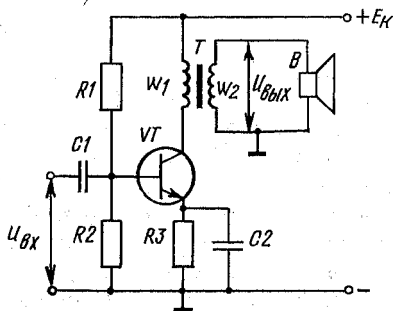


Рис. 72. Трансформаторный усилитель мощности

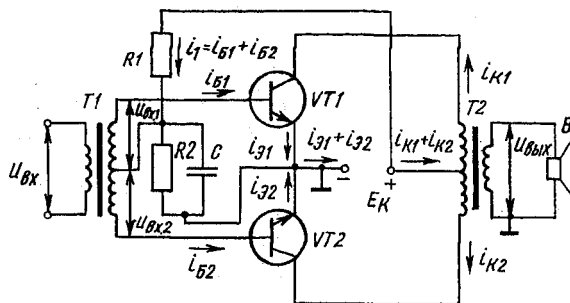


Рис. 73. Трансформаторный двухтактный усилитель мощности

ный ток по катушке громкоговорителя, так как напряжение между отводами вторичной обмотки его появляется только при изменениях коллекторного тока, который протекает по первичной обмотке. Чтобы искажения сигнала не были большими, усилитель должен работать в режиме А. В таком усилителе отдаваемая нагрузке мощность не может превосходить 40 % от мощности, получаемой им от источника питания.

С целью повышения КПД усилители мощности строят по двухтактным схемам (рис. 73). Такой усилитель может работать в режиме В. В *двухтактном* усилителе мощности устанавливают два однотипных транзистора с общим источником питания. Входной сигнал подводят к базам транзисторов через трансформатор $T1$, нагрузку подключают через трансформатор $T2$. Для создания необходимого напряжения смещения $U_{БЭП}$ собирают цепь, состоящую из резисторов $R1$ и $R2$. Параллельно резистору $R2$ ставят конденсатор C для сглаживания пульсаций напряжения.

Трансформатор $T1$, установленный на входе усилителя, позволяет получить два входных напряжения $u_{вх1}$ и $u_{вх2}$, которые сдвинуты по фазе на 180° . Между базами и эмиттерами транзисторов имеются напряжения:

$$\begin{aligned} u_{БЭ1} &= U_{БЭП} + u_{вх1}, \\ u_{БЭ2} &= U_{БЭП} + u_{вх2}. \end{aligned}$$

Графики напряжений показаны на рис. 74, а, б. Под действием этих напряжений через транзисторы проходят коллекторные токи. В течение одного полупериода переменного напряжения ток проходит через транзистор $VT1$ (рис. 74, в), в течение следующего полупериода — через транзистор $VT2$ (рис. 74, г). Ток i_{K1} проходит по верхней на схеме части первичной обмотки трансформатора $T2$ в направлении от средней точки обмотки к ее верхнему отводу, ток i_{K2} — по нижней части обмотки от ее середины к нижнему отводу. Направления токов в частях первичной обмотки трансформатора противоположны. Если рассматривать прохождение тока во всей обмотке трансформатора с учетом направлений токов i_{K1} и i_{K2} , то график этого тока можно представить как

график переменного синусоидального тока (рис. 74, д). В результате по катушке громкоговорителя, которая присоединена ко вторичной обмотке, проходит синусоидальный ток. Хотя транзисторы работают в режиме *В*, но форма кривой усиленного сигнала соответствует форме кривой сигнала, который подводится ко входу усилителя.

Применение в усилителе громоздких, сложных по устройству и имеющих высокую стоимость элементов, какими являются трансформаторы, нежелательно. Поэтому вскоре после появления мощных транзисторов были разработаны бестрансформаторные усилители мощности. Они преимущественно применяются в современных усилителях звуковых колебаний. В их состав входят входной, предоконечный и оконечный каскады.

Оконечные каскады бестрансформаторных усилителей мощности являются двухтактными. Простейший вариант такого каскада может быть создан на базе двух однотипных транзисторов с близкими характеристиками и параметрами (рис. 75). Питается усилитель от двух источников с напряжением $E_{П1}$ и $E_{П2}$ на зажимах. Нагрузку R_n включают в цепь эмиттеров. Усилитель представляет собой два эмиттерных повторителя с одной и той же нагрузкой в цепях эмиттеров. Базы транзисторов объединены, к ним подводится одно и то же входное напряжение. Когда оно является положительным, в цепи нагрузки протекает ток, являющийся эмиттерным током $i_{э1}$ транзистора *VT1*. Транзистор *VT2* в это время заперт. При изменении полярности входного напряжения транзистор *VT1* запирается, по нагрузке протекает эмиттерный ток $i_{э2}$ транзистора *VT2*. Направления токов $i_{э1}$ и $i_{э2}$ в нагрузке противоположны. Транзисторы открываются поочередно, ток в нагрузке является переменным.

Каскад усиливает ток, а следовательно, и мощность. Необходимое усиление по напряжению обеспечивает многокаскадный усилитель напряжения, который предшествует оконечному каскаду.

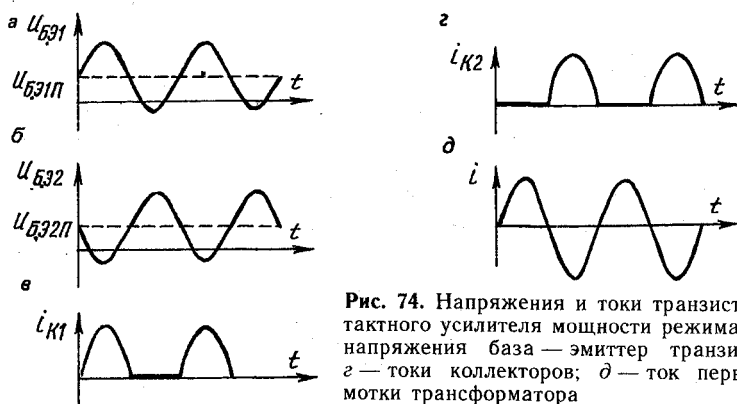


Рис. 74. Напряжения и токи транзисторов двухтактного усилителя мощности режима *В*: а, б — напряжения база — эмиттер транзисторов; в, г — токи коллекторов; д — ток первичной обмотки трансформатора

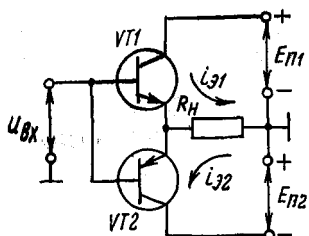
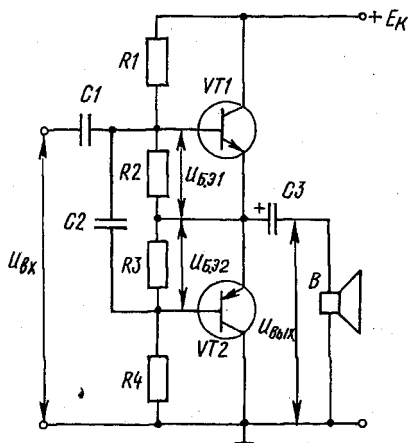


Рис. 75. Оконечный каскад бестрансформаторного усилителя мощности на разнотипных транзисторах

Рис. 76. Бестрансформаторный оконечный каскад на разнотипных транзисторах с одним источником питания



Двухтактный бестрансформаторный оконечный каскад может питаться от одного источника (рис. 76). Транзисторы $VT1$ и $VT2$ по отношению к источнику питания включены последовательно. Нагрузку — катушку громкоговорителя в усилителях звуковых частот радиоприемников, телевизоров или радиоузлов — через конденсатор $C3$ присоединяют к эмиттерам транзисторов. В цепях баз транзисторов установлены резисторы $R1...R4$. Они образуют делитель напряжения, подающий напряжения смещения на эмиттерные переходы транзисторов. Величина этих напряжений устанавливается такой, чтобы в режиме покоя через транзисторы протекал небольшой ток. Для упрощения цепи резисторы $R2$, $R3$ заменяют одним резистором. Конденсаторы $C1$ и $C2$ являются разделительными. Через них на базы транзисторов подается переменное входное напряжение.

Когда под действием входного напряжения потенциалы баз возрастают, увеличивается напряжение $u_{б,э1}$ и меньше становится напряжение $u_{б,э2}$. Коллекторный ток транзистора $VT1$ возрастает, а транзистор $VT2$ запирается, т. е. ток коллектора прекращается. В это время происходит зарядка конденсатора $C3$. По нагрузке протекает ток зарядки. В следующий полупериод входного напряжения потенциал входа понижается. Напряжение $u_{б,э1}$ становится меньше, транзистор $VT1$ запирается. Величина напряжения $u_{б,э2}$ возрастает и увеличивается ток транзистора $VT2$. Конденсатор $C3$ разряжается. Через транзистор $VT2$ и нагрузку протекает ток разрядки. Направление его в нагрузке противоположно протекающему раньше току зарядки. По нагрузке идет переменный ток, он изменяется практически по тому же закону, что и напряжение на входе каскада.

Подбор мощных разнотипных транзисторов с близкими характеристиками и параметрами во многих случаях затруднителен, а то и невозможен. Поэтому в оконечных каскадах предпочитают устанавливать однотипные транзисторы, необходимые пары кото-

рых подобрать гораздо легче. Но при их установке усложняется управление токами транзисторов. На базы транзисторов приходится подавать два управляющих напряжения, фазы которых должны отличаться друг от друга на 180° .

Рассмотрим два способа управления токами однотипных транзисторов оконечного каскада. Первый из них состоит в установке специального преобразователя входного напряжения в два напряжения одинаковой амплитуды, но отличающиеся по фазе на 180° . Им может быть каскад с резистором $R3$ в цепи коллектора транзистора $VT1$ и резистором $R4$ в цепи его эмиттера (рис. 77, а). Входное напряжение отрицательной полярности вызывает понижение потенциала базы транзистора $VT1$ и уменьшение его тока. Вследствие этого повышаются потенциалы коллектора транзистора $VT1$ и соединенной с ним базы транзистора $VT2$, увеличивается ток транзистора $VT2$. Одновременно меньше становится падение напряжения на резисторе $R4$, снижается потенциал базы транзистора $VT3$, он запирается. По нагрузке R_H через открытый транзистор $VT2$ протекает ток зарядки конденсатора $C3$. Когда потенциал входа повышается, понижаются потенциалы коллектора транзистора $VT1$ и базы транзистора $VT2$. Транзистор $VT2$ запирается. В это время повышается потенциал базы транзистора $VT3$, и через него по нагрузке R_H протекает ток разрядки конденсатора $C3$.

Второй способ управления токами однотипных транзисторов оконечного каскада состоит в образовании составных транзисторов в виде пар $VT1 - VT3$, $VT2 - VT4$ (рис. 77, б). Одно и то же входное напряжение по-разному воздействует на токи разнотипных транзисторов. Поэтому входное напряжение положительной полярности вызывает увеличение токов транзисторов $VT1$ и $VT3$, запирает транзисторы $VT2$ и $VT4$ и появление тока зарядки в цепи нагрузки. Когда полярность входного напряжения становится

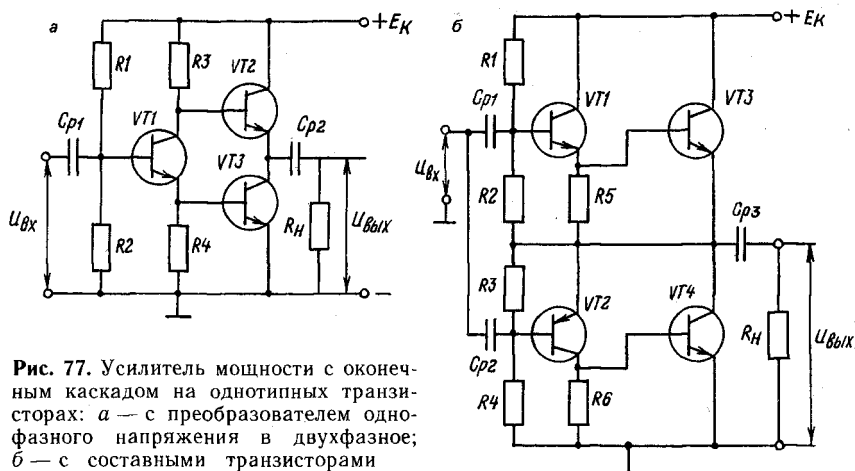


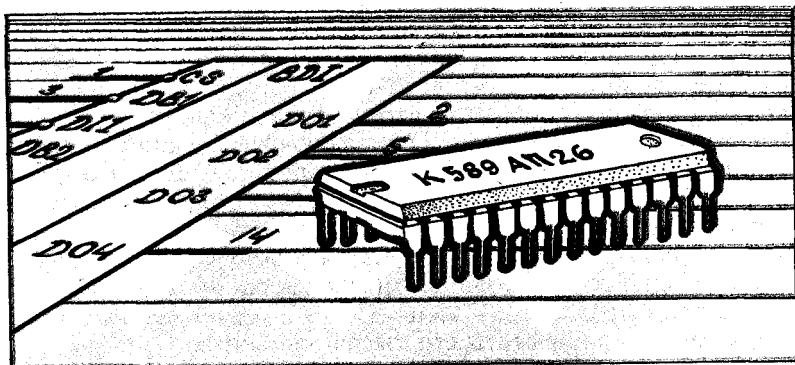
Рис. 77. Усилитель мощности с оконечным каскадом на однотипных транзисторах: а — с преобразователем однофазного напряжения в двухфазное; б — с составными транзисторами

ся отрицательной, транзисторы $VT1$, $VT3$ запираются, транзисторы $VT2$, $VT4$ открываются, конденсатор $C3$ разряжается и по нагрузке идет ток разрядки.

Применяются также и другие схемы бестрансформаторных усилителей мощности. Усовершенствование схем связано со стремлением обеспечить стабильность работы усилителя, уменьшить искажения формы сигналов, повысить КГД усилителя и улучшить другие показатели его работы.

Вопросы и задания

1. Для какой цели предназначены усилители?
2. Каково назначение управляемого элемента усилителя?
3. Объясните, каким образом достигается увеличение амплитуды сигнала в усилителе напряжения.
4. Назовите известные вам режимы работы усилителей и объясните особенности функционирования усилителей этих режимов.
5. В чем отличие резисторного усилителя от простейшего усилителя в виде цепи с последовательным включением резистора и транзистора?
6. Какие схемы включения транзисторов применяются при сборке усилителей?
7. Объясните принцип образования обратной связи в известных вам усилителях с обратной связью.
8. Какой усилитель называют эмиттерным повторителем?
9. В чем заключаются особенности усилителей постоянного тока?
10. Каковы особенности подключения источника сигнала и нагрузки в однотактных усилителях постоянного тока?
11. По каким причинам в усилителях постоянного тока возникают паразитные сигналы?
12. Почему в балансных усилителях паразитные сигналы меньше, чем в обычных однотактных?
13. Для какой цели строят многокаскадные усилители?
14. В чем состоит преимущество усилителя с непосредственными связями по сравнению с усилителями с другими видами межкаскадной связи?
15. Что необходимо предпринять, чтобы в усилителе была получена максимально возможная мощность сигнала?
16. Объясните устройство и принцип работы однотактного и двухтактного усилителя мощности с трансформаторами.
17. Объясните назначение элементов в цепях бестрансформаторных усилителей мощности и процессы в них при подаче сигнала на вход усилителя.
18. На примере известных вам схем бестрансформаторных усилителей мощности объясните управление токами оконечных каскадов с однотипными транзисторами.



Глава VIII

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

38. Понятие об интегральных микросхемах и технологии их изготовления

В 50-е гг. в производстве радиоэлектронной аппаратуры протекал бурный процесс вытеснения полупроводниковыми приборами применяемых ранее электронных ламп. Это позволило уменьшить габариты устанавливаемых в аппаратуре резисторов, конденсаторов и других элементов, снизить напряжение питания аппаратуры и потребляемую ею мощность. Началось применение печатного монтажа и конструирование сложных изделий из компактных миниатюрных блоков — микромодулей, объединяющих десятки соединенных между собой элементов небольшого размера и предназначенных для выполнения определенных функций по обработке электрических сигналов. В результате габариты радиоаппаратуры уменьшились, повысилась ее надежность, проще стал ремонт. Однако процессы сборки микромодулей не были автоматизированы, стоимость их изготовления получалась высокой.

Резкий скачок в уменьшении габаритов радиоаппаратуры, снижении ее стоимости и уменьшении потребляемой ею мощности произошел в результате развития нового направления в радиоэлектронике, получившего название *микроэлектроники* и связанного с созданием и применением миниатюрных радиоустройств. Появились миниатюрные изделия, получившие название *интегральных микросхем*.

Интегральной микросхемой называют микроминиатюрное электронное устройство, выполняющее

определенные функции преобразования и обработки сигнала (усиление, модуляция, детектирование и т. д.). Интегральная микросхема содержит большое число миниатюрных электрически соединенных между собой элементов, расположенных на небольших расстояниях друг от друга. Они заключены в один корпус и представляют единое целое. Например, кристалл микросхемы микрокалькулятора имеет размеры $5,6 \times 5,6$ мм и толщину 0,2 мм, однако в нем десятки тысяч транзисторов, резисторов, других элементов и соединений между ними. Имеются микросхемы, которые содержат до одного миллиона элементов в одном изделии. Размеры элементов бывают столь малыми, что в одном кубическом сантиметре можно разместить сто тысяч элементов.

Наиболее простые интегральные микросхемы появились в 1951 г. Они содержали элементы, выполненные в едином технологическом цикле специальными методами интегральной технологии (интегральные элементы), и отдельные (дискретные) компоненты, присоединяемые к первым. Поскольку технология изготовления микросхем оказалась смешанной, микросхемы получили название *гибридных*. По своему виду они были подобны изделиям, выполненным методами печатного монтажа, но имели малые размеры.

В качестве основания гибридной микросхемы используется керамическая подложка. В процессе изготовления на подложку накладывают трафарет и через его прорезы наносят специальные пасты. В дальнейшем пасты сушат и вжигают их вещества в подложку. В зависимости от состава пасты на поверхности подложки образуются соединительные проводники, проводящие пленки с большим удельным сопротивлением — резисторы и диэлектрические пленки. К образованным таким образом элементам цепей припаивают диоды, транзисторы, конденсаторы и другие недостающие компоненты. Образуется устройство типа усилителя, генератора или предназначенное для выполнения других функций.

Пленки микросхем, получаемые описанным способом, имеют толщину в десятки микрометров. Поэтому технологию изготовления микросхем называют толстопленочной, а сами микросхемы — толстопленочными.

В 1958 г. началось применение тонкопленочной технологии и появились тонкопленочные интегральные микросхемы. Соединительные дорожки, резисторы и диэлектрические пленки в них создаются путем нанесения тонких слоев определенного вещества на поверхность диэлектрической подложки через отверстия специального трафарета (**рис. 78**). Для создания соединительных проводников напыляют обычно алюминиевые пленки. Резисторы образуют путем напыления нихрома, хрома и смеси хрома и оксида хрома. Диэлектрические пленки получают в виде тонких пленок оксида алюминия или оксида кремния в процессе окисления.

С 1960 г. производят полупроводниковые интегральные микросхемы. Все элементы и межэлементные соединения в них создаются на поверхности и в объеме полупроводникового кристалла (пре-

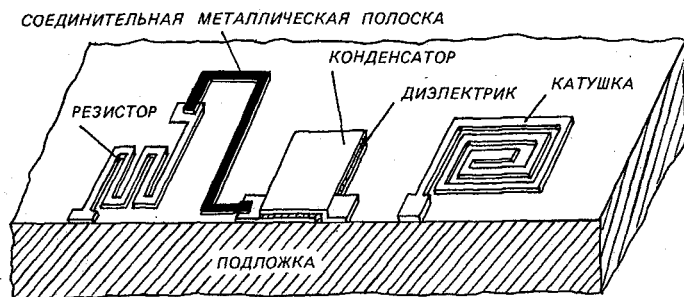


Рис. 78. Структура элементов пленочной интегральной микросхемы

ймущественно на основе кремния). Полупроводниковые микросхемы наиболее распространены.

Для создания диода, транзистора или канала с малым сопротивлением полупроводниковой микросхемы в приповерхностном слое полупроводниковой подложки (рис. 79) образуют области с определенными типами проводимости.

Технология полупроводниковых интегральных микросхем появилась в результате развития и обобщения опыта производства полупроводниковых приборов. Особенность ее состоит в многократном повторении детально разработанных и весьма точных операций. Исходным материалом для изготовления полупроводниковых микросхем является слиток кремния в виде цилиндра диаметром 80...100 мм и длиной от 1 м до 1,5 м. Его получают путем кристаллизации кремния из его расплава. Цилиндр разрезают на диски. Их шлифуют, полируют, очищают и отмывают. Образуются заготовки в виде пластин толщиной 0,2...0,3 мм и диаметром, близким к диаметру цилиндра (рис. 80, а). Пластины подвергают серии технологических операций, в ходе которых многократно наносят диэлектрические пленки, точно выполняют трафарет

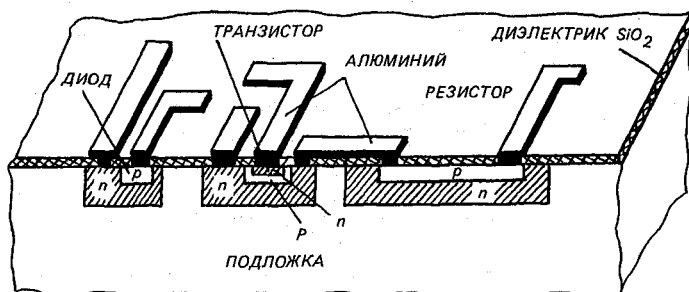


Рис. 79. Структура элементов полупроводниковой интегральной микросхемы

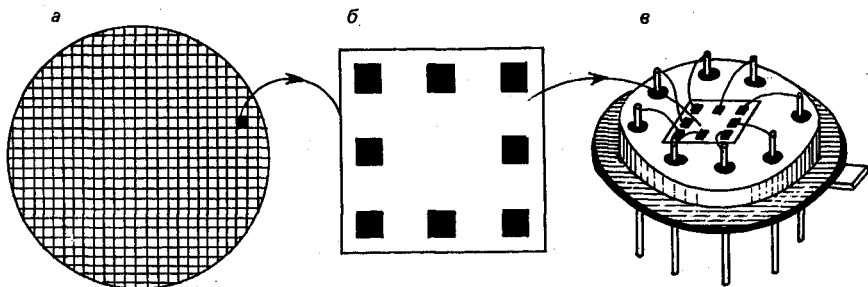


Рис. 80. Изготовление полупроводниковой интегральной микросхемы: *а* — заготовка; *б* — кристалл микросхемы; *в* — крепление кристалла на корпусе

на поверхности пластины для введения в кристалл примесей или других веществ, травят отверстия, вводят через отверстия трафарета донорные или акцепторные примеси для образования против окна трафарета области полупроводника с определенным типом проводимости, наносят металлические пленки, являющиеся соединительными проводниками. Результат этого многократно повторяемого и сложного технологического процесса — одновременное изготовление большого числа кристаллов микросхемы со всеми ее элементами. (Размер кристалла от $0,5 \times 0,5$ до 2×2 мм; рис. 80, б.) В дальнейшем пластину разрезают, измеряют параметры полученных микросхем и разбраковывают. К металлическим контактам микросхем припаивают или приваривают внешние соединительные проводники. После этого устанавливают кристаллы микросхем на основании корпусов и приваривают соединительные проводники к штырькам (рис. 80, в). На заключительном этапе производства надевают колпачки микросхем и герметизируют корпус.

Наряду с пленочными и полупроводниковыми микросхемами имеются *совмещенные* интегральные микросхемы. Диоды и транзисторы в них выполняют в приповерхностном слое полупроводника (как в полупроводниковых микросхемах), а резисторы, конденсаторы и катушки изготавливают путем нанесения пленок на предварительно изолированную поверхность этого же кристалла (как в пленочных микросхемах).

39. Особенности образования электрических цепей в интегральных микросхемах

Особенности технологии интегральных микросхем проявляются в специфике схем усилительных каскадов, способах образования цепей смещения, выполнении межкаскадных соединений и т. д. Полупроводниковые интегральные микросхемы не содержат таких элементов, как конденсаторы, высокоомные резисторы, катушки индуктивности. Роль конденсаторов, например, если их емкость является небольшой, выполняют $p-n$ -переходы, к которым подво-

дят обратные напряжения. Как известно, такие переходы обладают определенной емкостью. Для создания тока покоя в цепях баз вместо резисторов устанавливают определенным образом включенные транзисторы. Роль высокоомных резисторов выполняют входные сопротивления эмиттерных повторителей. Изготовление транзисторов оказывается более простым, чем диодов. Поэтому вместо диодов применяют транзисторы. Связь между каскадами микросхем является непосредственной; разделительные конденсаторы не применяют.

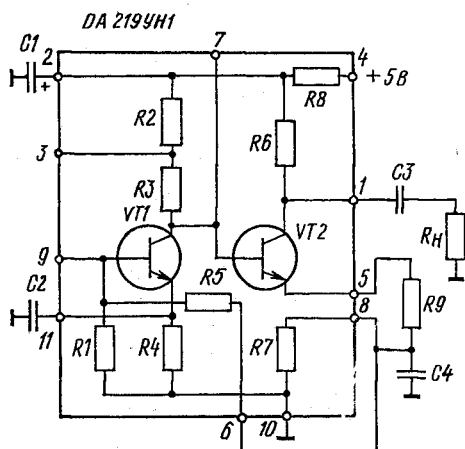


Рис. 81. Соединение элементов интегральной микросхемы 219УН1

Рассмотрим выполнение соединений элементов гибридной интегральной микросхемы ДА 219УН1 (рис. 81), используемой для усиления сигналов низкой частоты. Микросхема представляет собой двухкаскадный резисторный усилитель. Связь между каскадами — непосредственная (коллектор транзистора $VT1$ соединен с базой транзистора $VT2$). Сопротивления нагрузки в цепях коллекторов транзисторов — резисторы $R2$, $R3$. Резистор $R8$ микросхемы и внешний конденсатор $C1$ образуют фильтр в цепи источника питания. Резистор $R4$ и параллельно присоединенный к нему конденсатор $C2$ образуют цепь стабилизации тока транзистора $VT1$, а резистор $R7$ и конденсатор $C4$ — цепь стабилизации транзистора $VT2$. В цепь эмиттера транзистора $VT2$ включен резистор $R9$ для создания обратной связи во втором каскаде. В цепи базы транзистора $VT1$ нет обычного делителя напряжения, требуемого для подачи напряжения смещения. Постоянное напряжение смещения снимается с резистора $R1$, являющегося частью делителя напряжения на резисторах $R1$ и $R5$. Подводимое к делителю напряжение снимается с резистора $R7$. Рассмотренную интегральную микросхему применяют в микрофонных усилителях.

40. Система обозначений интегральных микросхем. Характеристики и параметры

Условное обозначение интегральных микросхем — буквенно-цифровое. Для микросхем широкого применения обозначение начинается с буквы К. После нее следует цифра, указывающая на особенности технологии и конструкции. Полупроводниковые микросхемы обозначают цифрами 1, 5, 7, гибридные — 2, 4, 6, 8, другие — 3.

Дальше следует двузначное число, обозначающее порядковый номер разработки в серии. Микросхемы одной серии имеют одинаковую конструкцию и технологию изготовления, определенные напряжения питания, входные и выходные сопротивления и т. д. На базе микросхем одной серии можно создать отдельный узел или законченное радиоэлектронное устройство. Обозначение серии включает букву и первые три цифры обозначения микросхемы. Если в обозначении микросхемы буква отсутствует, серия обозначается тремя цифрами.

После трехзначного числа следуют две буквы, указывающие назначение микросхемы. Расшифровка букв некоторых интегральных микросхем для обработки непрерывных сигналов приведена в таблице 2:

Таблица 2

Функции, выполняемые интегральными микросхемами	Буквенное обозначение по ГОСТу 18 682—73
Генераторы гармонических сигналов	ГС
Детекторы амплитудные	ДА
Модуляторы амплитудные	МА
Преобразователи частоты	ПС
Выпрямители	ЕВ
Стабилизаторы напряжения	ЕН
Усилители высокой частоты	УВ
Усилители промежуточной частоты	УР
Усилители низкой частоты	УН
Усилители постоянного тока	УТ
Усилители операционные и дифференциальные	УД
Микросборки диодов	НД
Микросборки транзисторов	НТ
Наборы резисторов	НР
Наборы конденсаторов	НЕ

После букв следует цифра, определяющая порядковый номер разработки микросхемы. В конце условного обозначения могут стоять буквы от А до Я, указывающие отличие микросхемы данного типа от других микросхем этой же серии.

Например, микросхема К175УВ1Б: К — микросхема широкого применения, 1 — полупроводниковая, 75 — номер разработки, сочетание символов К175 — обозначение серии, УВ — усилитель высокочастотный, 1 — первая разработка усилителя высокой частоты данной серии (имеются еще разработки 2, 3, 4, являющиеся также усилителями высокой частоты, но отличающиеся схемами), Б — вариант первой разработки.

Интегральные микросхемы являются узлами, предназначенными для выполнения разнообразных функций. Их свойства оцениваются различными характеристиками и параметрами. Для интегральных микросхем, используемых в качестве усилителей, важнейшими характеристиками являются:

амплитудная, выражающая зависимость амплитуды напряжения на выходе от амплитуды входного напряжения;

амплитудно-частотная, определяющая зависимость амплитуды напряжения на выходе от частоты входного напряжения при неизменной амплитуде его;

нагрузочная, указывающая на зависимость амплитуды выходного напряжения от сопротивления нагрузки при одной и той же амплитуде входного напряжения.

Параметры интегральных микросхем, предназначенных для обработки непрерывных сигналов,— напряжение питания, потребляемый ток, потребляемая и рассеиваемая мощности, наибольшие амплитуды входного и выходного напряжений, входное сопротивление, полоса частот усиливаемых сигналов, коэффициент усиления по напряжению и др.

41. Применение интегральных микросхем

Многие интегральные микросхемы являются узлами, предназначенными для выполнения определенных функций по обработке сигналов. Сигналы могут быть *аналоговыми* или *цифровыми*. Соответственно микросхемы делят на аналоговые и цифровые.

На базе аналоговых интегральных микросхем могут быть построены усилители низкой и высокой частоты, генераторы, модуляционные устройства, преобразователи частоты, детекторы, источники питания и другие устройства.

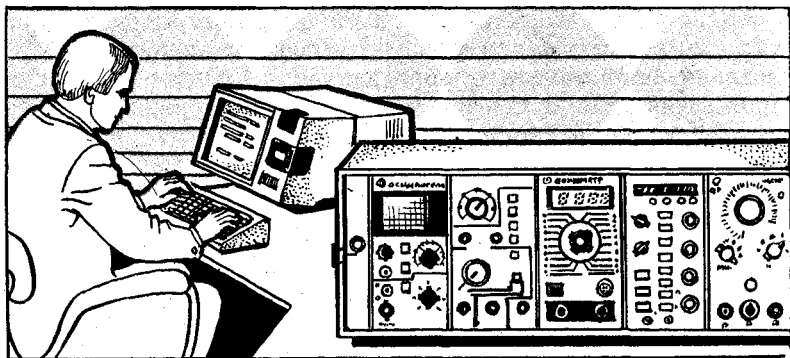
Интегральные микросхемы, предназначенные для усиления сигналов низкой и высокой частоты и выполнения других функций, реализуемых в усилителях, радиоприемниках и телевизорах, имеются во многих сериях. Наибольший интерес представляют интегральные микросхемы серий К157, К174, К224, К235, К237. Интегральные микросхемы серии К157 позволяют строить узлы магнитофонов. Серия К174 предназначена для использования в различных трактах бытовой аппаратуры. Микросхемы этой серии специально разработаны для регулирования тембра низких и высоких частот (К174УН10), для усиления выходной мощности (К174УН11) и т. д.

Цифровые интегральные микросхемы используют преимущественно в устройствах автоматики, вычислительной техники.

Применение интегральных микросхем позволяет упростить конструкцию, уменьшить габариты и потребляемую радиоаппаратурой мощность. Повышается надежность изделий.

Вопросы и задания

1. Что представляет собой интегральная микросхема? 2. На какие группы делят интегральные микросхемы в соответствии с технологией изготовления? 3. В чем заключаются особенности соединения элементов микросхем? 4. Как обозначаются интегральные микросхемы? 5. В каких устройствах применяются интегральные микросхемы? 6. Назовите серии интегральных микросхем, на базе которых могут быть построены узлы усилителей звуковой частоты в радиоприемниках.



Глава IX

ВЫПРЯМИТЕЛИ

42. Источники электропитания

Нормально работают радиоэлектронные устройства тогда, когда к ним подводится напряжение питания заданной величины и это напряжение поддерживается с необходимой точностью в течение всего времени работы устройств. Напряжение питания поступает от источников электропитания, называемых вторичными, которые сами получают энергию от первичных источников питания: сети переменного тока, аккумуляторов, гальванических, термоэлектрических, солнечных батарей.

Вторичные источники электропитания стационарной аппаратуры получают энергию от сети переменного тока и содержат выпрямители — устройства для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока. Выпрямитель включает обычно трансформатор, электрические вентили, сглаживающий фильтр, а при необходимости и стабилизатор напряжения. Трансформатор предназначен для получения определенного по амплитуде напряжения на зажимах вторичной обмотки, при котором постоянное напряжение на выходе выпрямителя имеет заданную величину. Электрические вентили являются приборами, которые обеспечивают протекание тока через них только в одном направлении. Сглаживающие фильтры уменьшают быстрые изменения напряжения на выходе выпрямителя, дают возможность получить практически постоянное напряжение на выходе при подведении к ним пульсирующего напряжения. Стабилизатор напряжения поддерживает на-

пряжение на выходе источника питания неизменным, несмотря на возрастание или убывание напряжения сети, колебания сопротивления нагрузки и окружающей температуры.

43. Схемы выпрямителей

Выпрямители, получающие энергию от сети однофазного переменного тока, строят преимущественно по однополупериодной, двухполупериодной со средней точкой и мостовой схемам выпрямления. В качестве вентилей используют обычно полупроводниковые диоды.

Однополупериодный выпрямитель (рис. 82, а) содержит трансформатор и полупроводниковый диод. К первичной обмотке трансформатора подводится напряжение u_1 , на зажимах вторичной обмотки имеется напряжение u_2 (рис. 82, б). При положительном потенциале точки А через диод VD и нагрузку R_H протекает ток i_d , являющийся током нагрузки i_H . После изменения полярности напряжения u_2 ток в цепи нагрузки и диода не проходит, так как диод пропускает ток лишь в одном направлении. Напряжение на нагрузке в этот промежуток времени равно нулю. Ток нагрузки i_H и напряжение на ней u_H являются пульсирующими, т. е. ток i_H имеет лишь одно направление, а напряжение u_H — лишь одну полярность, но мгновенные значения тока i_H и напряжения u_H изменяются по величине. Ток i_H и напряжение u_H (рис. 82, в) представляют

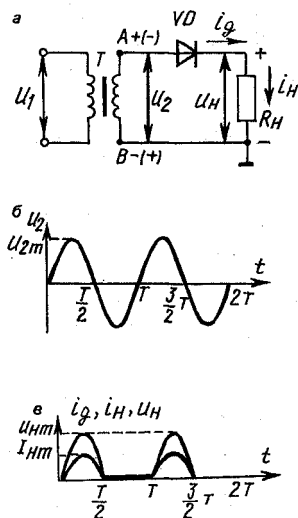


Рис. 82. Однополупериодный выпрямитель: а — схема; б, в — графики напряжений и токов

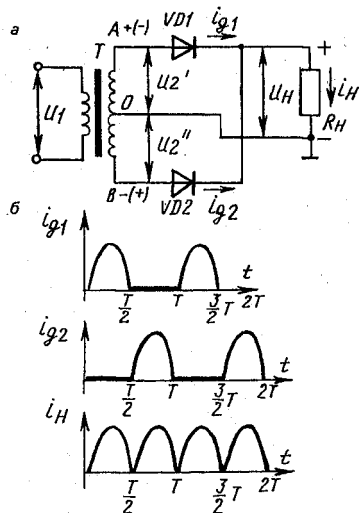


Рис. 83. Двухполупериодный выпрямитель с отводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора: а — схема; б — токи диодов и нагрузки

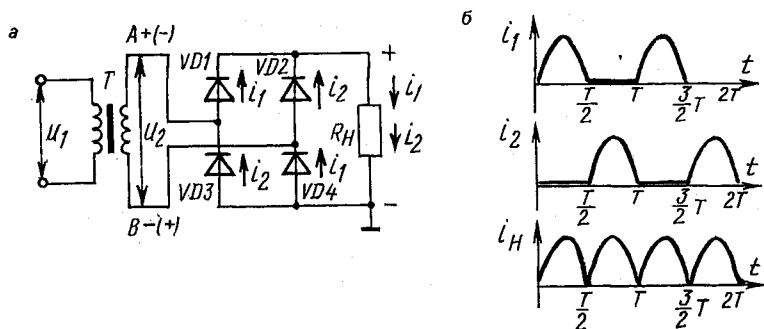


Рис. 84. Выпрямитель по мостовой схеме: а — схема; б — графики токов диодов и тока нагрузки

собой импульсы, которые следуют друг за другом через каждые полпериода.

Этого недостатка лишен выпрямитель по *двухполупериодной* схеме выпрямления со средней точкой (рис. 83, а). Он имеет трансформатор и два диода. Среднюю точку вторичной обмотки заземляют или соединяют с общей точкой устройства. Напряжения u'_2 и u''_2 между отводами вторичной обмотки трансформатора и заземленной точкой выпрямителя равны по величине, но имеют противоположную полярность. Когда потенциал точки А положителен, через диод $VD1$ проходит ток i_{d1} , являющийся током нагрузки. В этот промежуток времени потенциал точки В отрицателен и ток через диод $VD2$ не проходит.

При изменении полярности напряжений u'_2 и u''_2 в цепи диода $VD2$ возникает ток i_{d2} , являющийся одновременно током нагрузки. Этот ток протекает по нагрузке в прежнем направлении. Токи диодов i_{d1} и i_{d2} , ток нагрузки i_H и напряжение u_H на ней являются пульсирующими (рис. 83, б). Длительность каждого импульса тока составляет полпериода. Импульсы тока в нагрузке следуют друг за другом без пауз.

Чтобы не устанавливать трансформатор с отводом от средней точки, используют *мостовую схему* выпрямления (рис. 84, а). Такой выпрямитель содержит трансформатор и четыре диода. Когда потенциал точки А положителен, через диод $VD1$, нагрузку R_H и диод $VD4$ проходит ток i_1 . В цепях диодов $VD2$ и $VD3$ в этот промежуток времени тока нет. Когда полярность напряжения u_2 меняется на обратную, появляется ток i_2 , протекающий через диод $VD2$, нагрузку R_H и диод $VD3$. Длительность импульсов токов i_1 и i_2 составляет полпериода переменного напряжения (рис. 84, б), интервалы времени между импульсами токов диодов равны полупериоду. Ток нагрузки является суммой токов диодов ($i_H = i_1 + i_2$). Поэтому импульсы тока в нагрузке следуют друг за другом без пауз между ними.

44. Сглаживающие фильтры выпрямителей

Для уменьшения пульсаций напряжения на выходе выпрямителей и получения напряжения, близкого к постоянному, в них устанавливают специальные устройства, называемые *сглаживающими фильтрами*. Наиболее простой — *емкостный* фильтр — конденсатор, включенный параллельно нагрузке (рис. 85, а). Предположим, что выпрямитель собран по двухполупериодной схеме. При отсутствии фильтра напряжение u_n на выходе выпрямителя было бы пульсирующим и изменялось бы с течением времени в соответствии с графиком, изображенным штриховой линией на рис. 85, б. Если параллельно нагрузке установить конденсатор, напряжение на нагрузке будет изменяться так, как это показано на этом же рисунке сплошной линией.

При появлении тока в цепях диодов выпрямителя конденсатор заряжается до напряжения U_{2m} , т. е. до амплитудного значения напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора. Когда напряжение u_2 становится меньше, чем напряжение $u_c = u_n$, конденсатор разряжается через нагрузку R_n , напряжение на его обкладках, равное напряжению на нагрузке, уменьшается, причем уменьшается медленнее (сплошная линия), чем при отсутствии конденсатора (штриховая линия). В некоторый момент времени напряжение u_2 становится равным минимальному напряжению $u_{смин}$, до которого разрядится к тому времени конденсатор, и конденсатор вновь заряжается, напряжение между его обкладками увеличивается до значения U_{2m} . Процессы зарядки и разрядки конденсатора повторяются. Напряжение на нагрузке u_n изменяется в пределах от $u_{смин}$ до U_{2m} и становится близким по величине к значению U_{2m} .

Изменения напряжения на выходе выпрямителя с емкостным фильтром зависят от сопротивления нагрузки R_n и емкости C кон-

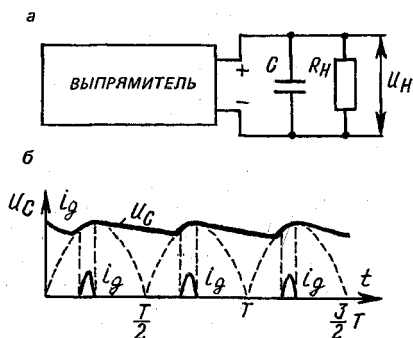


Рис. 85. Емкостный фильтр: а — схема; б — выходное напряжение и токи диодов

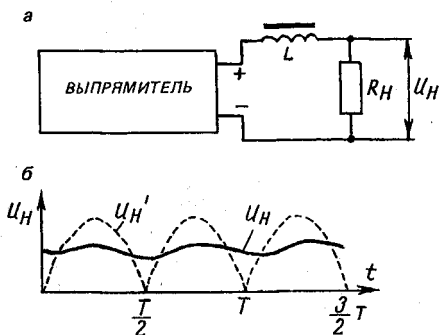


Рис. 86. Дроссельный фильтр: а — схема; б — выходное напряжение

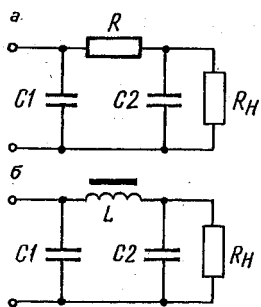


Рис. 87. Двухзвенные фильтры: а — резисторно-емкостный; б — индуктивно-емкостный

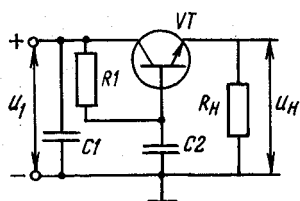


Рис. 88. Электронный фильтр

денсатора: чем больше сопротивление R_n и больше емкость C , тем в меньшей степени разряжается конденсатор.

Вторая разновидность простого фильтра — *дроссельный* фильтр (рис. 86, а), где последовательно с нагрузкой включена катушка с сердечником (дроссель). Возрастание напряжения u'_n на выходе выпрямителя вызывает возрастание тока в цепи дросселя L и нагрузке R_n . Сердечник дросселя намагничивается, в его обмотке появляется ЭДС самоиндукции, препятствующая нарастанию тока. Ток в нагрузке и напряжение на ней нарастают медленнее. Когда напряжение u'_n уменьшается, уменьшается и ток в цепи дросселя и нагрузке. В обмотке дросселя возникает ЭДС самоиндукции, которая поддерживает прежний ток в нагрузке. В результате ток i_n и напряжение u_n изменяются (рис. 86, б) незначительно.

Для значительного уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения устанавливают *двухзвенные* фильтры. Наиболее распространенные — П-образные фильтры, имеющие емкостный фильтр с конденсатором $C1$ и резисторно-емкостный фильтр $RC2$ (рис. 87, а) или емкостный фильтр с конденсатором $C1$ и фильтр с дросселем L и конденсатором $C2$ (рис. 87, б). В П-образных фильтрах напряжение с выхода емкостного фильтра поступает на второе звено, в котором дополнительно сглаживаются пульсации напряжений.

Для сглаживания пульсаций напряжения в выпрямителе применяются также *электронные* фильтры, содержащие транзисторы. Простейший электронный фильтр — фильтр, в котором транзистор выполняет роль дросселя. К цепи с последовательным включением транзистора и нагрузки (рис. 88) подводят пульсирующее напряжение. Конденсатор $C1$ частично сглаживает пульсации этого напряжения. В цепь базы транзистора включены резистор $R1$ и конденсатор $C2$. От сопротивления резистора $R1$ зависит величина тока в цепи базы. Элементы $R1$ и $C2$ образуют RC -фильтр. Напряжение u_{C2} , приходящее на конденсатор $C2$, можно считать постоянным. Следовательно, в цепи базы течет ток, величина которого с течением времени из-за пульсаций напряжения выпрямителя не меняется. Напряжение коллектор — эмиттер, приходящее на транзистор, является пульсирующим.

45. Простейшие стабилизаторы напряжения

Напряжение на выходе выпрямителя не остается величиной постоянной, что во многих случаях крайне нежелательно. Этот недостаток выпрямителей устраняют стабилизаторами напряжения.

Различают *параметрические* стабилизаторы (изменяется параметр элемента), *компенсационные* (происходит компенсация изменений напряжения, отклонение его в противоположную по сравнению с первоначальной сторону) и *комбинированные* (стабилизация напряжения достигается различными методами).

Параметрический стабилизатор напряжения (рис. 89) имеет полупроводниковый стабилитрон VD и балластный резистор R_b . Нагрузку R_n подключают параллельно стабилитрону. Напряжение U_n на нагрузке равно напряжению стабилизации $U_{ст}$. Ток нагрузки I_n и ток стабилитрона $I_{ст}$ протекают по балластному резистору R_b , создавая на нем падение напряжения:

$$\Delta U_b = (I_{ст} + I_n) \cdot R_b.$$

Когда напряжение на входе повышается, тотчас возрастает ток стабилитрона $I_{ст}$ и падение напряжения ΔU_b на балластном резисторе R_b , и наоборот, соответствующее уменьшение напряжения на входе вызывает уменьшение тока стабилитрона и падение напряжения на балластном резисторе. При колебаниях напряжения на входе напряжение на нагрузке поддерживается неизменным, если ток стабилитрона изменяется от минимального значения $I_{ст. мин}$ до максимального $I_{ст. макс.}$.

Напряжение на выходе параметрического стабилизатора поддерживается постоянным и в случае изменений сопротивления нагрузки.

Компенсационный стабилизатор напряжения (рис. 90) представляет собой сочетание параметрического стабилизатора и усилителя постоянного тока на транзисторе VT с нагрузкой R_n в цепи эмиттера. Параметрический стабилизатор создает опорное напряжение $U_{оп}$, равное напряжению стабилизации $U_{ст}$ стабилитрона. Опорное напряжение приложено между базой транзистора и общей точкой стабилизатора и равно:

$$u_{оп} = u_n + u_{бэ}, \text{ отсюда } u_{бэ} = u_{оп} - u_n.$$

Если увеличение сопротивления R_n или напряжения U_1 вызывает возрастание напряжения u_n на величину $+\Delta u_n$, напряжение $u_{бэ}$ уменьшается на величину Δu_n : $u'_{бэ} = U_{оп} - (u_n + \Delta u_n) = (U_{оп} - u_n) - \Delta u_n = u_{бэ} - \Delta u_n$. В результате ток в цепи транзистора станет меньше и напряжение u_n достигнет прежнего значения. Если напряжение на нагрузке уменьшится на величину $-\Delta u_n$,

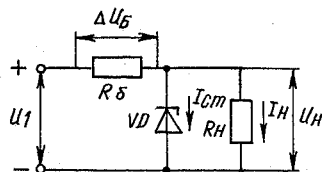


Рис. 89. Параметрический стабилизатор напряжения

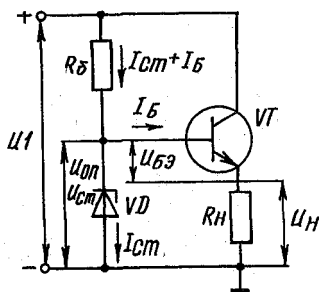


Рис. 90. Простейший компенсационный стабилизатор напряжения

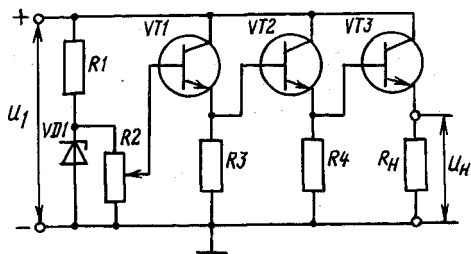


Рис. 91. Стабилизатор напряжения с регулируемым напряжением и трехкаскадным усилителем тока

напряжение $u_{БЭ}$ будет иметь значение $u''_{БЭ} = u_{БЭ} + \Delta u_n$, что приведет к увеличению тока транзистора.

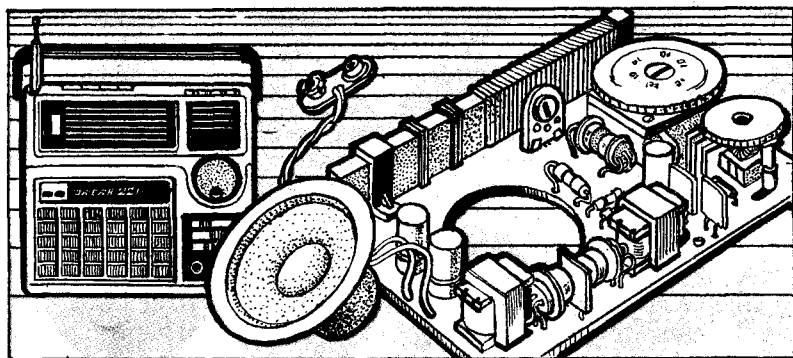
Транзистор VT в цепи стабилизатора напряжения выступает как регулирующий элемент, включенный последовательно нагрузке R_n . Когда напряжение u_n на нагрузке уменьшается, ток в цепи транзистора возрастает и напряжение u_n восстанавливается до прежнего уровня.

Пределы изменений тока нагрузки определяются допустимыми значениями тока эмиттера транзистора. Если ток нагрузки необходимо увеличить, к выходу эмиттерного повторителя на транзисторе малой мощности подключают усилитель тока на транзисторе средней мощности, а к его выходу — усилитель тока на мощном транзисторе. Поступающее на вход эмиттерного повторителя опорное напряжение может быть регулируемым. От его значения будет зависеть выходное напряжение стабилизатора. В стабилизаторе, схема которого представлена на рис. 91, для регулировки опорного напряжения установлен потенциометр R_2 . Усилитель тока является трехкаскадным.

В стабилизаторе может быть устройство защиты от перегрузок, которое вызывает запирающие транзисторов усилителя тока и отключение нагрузки при увеличении тока в нагрузке до некоторого значения, устанавливаемого специальным регулятором.

Вопросы и задания

1. Для чего предназначены выпрямители? 2. По каким схемам строят выпрямители однофазного переменного тока? 3. Начертите схему однополупериодного (двухполупериодного с отводом от средней точки обмотки трансформатора, по мостовой схеме) выпрямителя. 4. Для чего в выпрямителе устанавливают фильтр? 5. Объясните принцип работы емкостного и индуктивного фильтров. 6. Объясните назначение транзистора в электронном фильтре. 7. Объясните устройство и принцип работы параметрического стабилизатора напряжения. 8. Как устроен и работает простейший компенсационный стабилизатор напряжения? 9. Какой эффект вызывает предварительное усиление управляющего напряжения в стабилизаторе напряжения?



Глава X

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

46. Колебательный контур. Свободные колебания в контуре

Колебательный контур — это замкнутая электрическая цепь, включающая конденсатор и катушку индуктивности. В ней возможны электрические колебания, сопровождающиеся преобразованием электрического поля заряженного конденсатора контура в энергию магнитного поля его катушки и обратным ее преобразованием. Основные величины, характеризующие элементы колебательного контура, — индуктивность катушки L , емкость конденсатора C и активное сопротивление в цепи контура R .

Зарядим конденсатор контура (рис. 92) и через переключатель SA соединим его с катушкой контура. По катушке будет протекать ток, начнется процесс разрядки конденсатора. С течением времени напряжение между обкладками конденсатора u_c и запасенная в нем энергия электрического поля будут уменьшаться. Текущий по катушке ток i создает магнитное поле. Ток в катушке и связанное с ним магнитное поле вызывают появление ЭДС самоиндукции, которая препятствует мгновенному нарастанию тока до максимально возможного значения. За некоторый промежуток времени конденсатор разрядится, напряжение между его обкладками и накопленная в нем энергия электрического поля уменьшатся, а затем станут равными нулю. В этот момент времени энергия магнитного поля катушки и ток в ней будут максимальными.

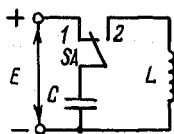


Рис. 92. Колебательный контур

При полной разрядке конденсатора напряжение на нем не поддерживает ток в цепи. Ток уменьшается, а значит, и ослабевает энергия магнитного поля катушки. В катушке появится ЭДС самоиндукции такой полярности, что она будет поддерживать протекание тока в прежнем направлении. В результате конденсатор постепенно перезарядится, напряжение на нем увеличится, но полярность его будет противополо-

ложной по сравнению с первоначальной. Энергия электрического поля конденсатора возрастет. Когда ток в катушке станет равным нулю, процесс перехода энергии магнитного поля катушки в энергию электрического поля конденсатора завершится. В этот момент времени напряжение на конденсаторе достигнет максимального значения. Однако на этом процесс не прекратится. Снова конденсатор будет разряжаться, по катушке пойдет ток, но противоположного направления. Таким образом, в контуре будут происходить колебания тока и напряжения на его элементах, хотя источник переменной ЭДС в контуре отсутствует. Эти колебания тока и напряжения называют *свободными колебаниями*.

Изменения напряжения u_c и тока i в случае свободных колебаний в идеальном контуре без потерь происходят по гармоническому закону (рис. 93, а). Фазы напряжения и тока не совпадают. Когда ток достигает максимального значения, напряжение на конденсаторе равно нулю. В моменты, когда максимальным является напряжение на конденсаторе, равным нулю становится ток в контуре.

В любом реальном контуре имеются потери, а поэтому амплитуды колебаний тока I_m и напряжения U_{cm} с течением времени убывают (рис. 93, б).

Промежуток времени, в течение которого происходит одно полное колебание в контуре, называется *периодом колебания* и обозначается буквой T . Период свободных колебаний в контуре без потерь рассчитывается по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

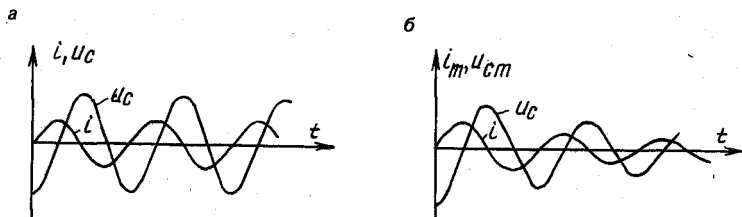


Рис. 93. Колебания напряжения и тока в контуре: а — при отсутствии потерь энергии; б — в реальном контуре

частота свободных колебаний

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

а циклическая (круговая) частота

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

От значений параметров L и C для элементов контура зависит соотношение между амплитудой напряжения на конденсаторе U_{Cm} и амплитудой тока в контуре I_m . Отношение их называют характеристическим или волновым сопротивлением контура и обозначают буквой ρ :

$$\rho = \frac{U_{Cm}}{I_m} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Для оценки ряда свойств колебательного контура введено понятие добротности контура. Добротность контура Q — это величина, измеряемая отношением максимальной запасаемой в контуре энергии

$$U_{\text{зап. макс}} = \frac{CU_{Cm}^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}$$

к энергии, теряемой в контуре за период колебаний

$$W_{\text{потерь } T} = \frac{I_m^2 R}{2}, \text{ умноженным на } 2\pi.$$

$$Q = 2\pi \frac{W_{\text{зап. макс}}}{W_{\text{потерь } T}}.$$

Добротность контура связана с его параметрами:

$$Q = \frac{L\omega}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\rho}{R}.$$

47. Вынужденные колебания в последовательном контуре. Резонанс напряжения

Последовательный колебательный контур состоит из катушки индуктивностью L , конденсатора емкостью C и активного сопротивления R , включенных последовательно (**рис. 94**). Если контур присоединить к генератору переменного синусоидального напряжения, в контуре будет протекать переменный синусоидальный ток

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha_i).$$

Напряжение u_L на катушке также синусоидальное, но по времени будет опережать ток на $T/4$, а по фазе на $\pi/2$. Синусо-

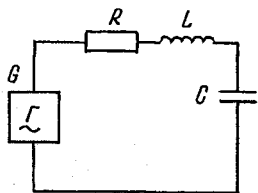


Рис. 94. Последовательный контур

идальным является и напряжение u_C на конденсаторе, но оно отстает по времени от тока на $T/4$, а по фазе — на $\pi/2$. Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током. Если ток в цепи изменяется по закону $i = I_m \sin \omega t$, то напряжение на ее элементах — в соответствии с соотношениями:

$$u_L = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

$$u_C = U_{Cm} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

$$u_R = U_{Rm} \sin \omega t.$$

В общем случае амплитуды напряжений на катушке, конденсаторе и активном сопротивлении не равны.

Периодические изменения тока в контуре и напряжения на его элементах под действием приложенной к элементам контура переменной ЭДС называют *вынужденными*.

Рассмотрим графики напряжений u_L , u_C , u_R для случая, когда $U_{Lm} > U_{Cm}$ (рис. 95, а). Значения напряжения u_L и u_C в любой момент времени противоположны по знаку. Поэтому сумму этих двух напряжений можно заменить одним напряжением с амплитудой $U_{Rm} = U_{Lm} - U_{Cm}$. Приложенное к цепи напряжение можно представить как сумму напряжений u_L , u_C , u_R :

$$u = u_L + u_C + u_R = U_{Rm} \sin \omega t + (U_{Lm} - U_{Cm}) \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Расчеты амплитуды суммарного напряжения приводят к результатам:

$$U_m = \sqrt{U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2}.$$

Путём изменения частоты подводимого к последовательному контуру напряжения можно установить такой режим в цепи, когда амплитуды напряжений на катушке U_{Lm} и конденсаторе U_{Cm}

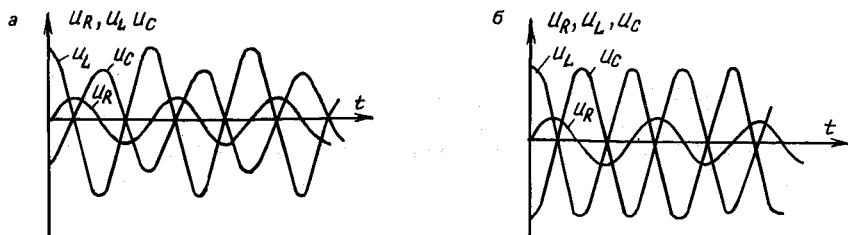


Рис. 95. Напряжения на элементах последовательного контура: а — $U_{Cm} < U_{Lm}$; б — $U_{Cm} = U_{Lm}$

окажутся равными, а амплитуда тока I_m в контуре достигнет максимального значения I_{mp} . Это явление называют *резонансом напряжений*. Частоту ω_p , при которой наступает резонанс напряжений, называют резонансной. Значение ее зависит от индуктивности катушки и емкости конденсатора контура:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Поскольку напряжения U_L и U_C противоположны по знаку, то при резонансе сумма напряжений U_L и U_C равна нулю независимо от значений амплитуд напряжений U_{Lm} и U_{Cm} (рис. 95, б). Амплитуда тока в контуре при резонансе рассчитывается из соотношения: $I_{mp} = U_m/R$.

На частотах, не равных резонансной, амплитуда тока в контуре I_m меньше значения I_{mp} . Зависимость амплитуды тока от частоты можно представить графиком (рис. 96). По оси абсцисс может быть отложена частота f или циклическая частота $\omega = 2\pi f$.

Если имеется два контура с одинаковыми значениями индуктивностей катушек и емкостей конденсаторов, но с различными активными сопротивлениями, а следовательно, с различными добротностями, то резонанс напряжения в этих контурах достигается на одной и той же частоте. Но амплитуды токов в них при резонансе будут неодинаковыми. Большей окажется амплитуда тока в том контуре, активное сопротивление которого меньше, а добротность соответственно меньше. Чем выше добротность контура при одинаковых других параметрах, тем больше амплитуда тока в нем при резонансе, тем круче располагаются скаты графика зависимости амплитуды тока от частоты.

Амплитуда напряжения на катушке U_{Lm} или на конденсаторе U_{Cm} последовательного контура пропорциональна амплитуде тока I_m в контуре. Поэтому для амплитуд напряжений на этих элементах проявляется такая же зависимость от частоты, как и для тока в цепи. Это свойство последовательного контура имеет большое практическое значение. Предположим, что к цепи в виде последовательного контура подключается несколько источников переменного напряжения. Амплитуды напряжений одинаковы, а частоты различны. Если частота напряжения одного из источников окажется равной резонансной частоте контура, то в цепи будет иметь место резонанс напряжений. Амплитуды напряжений этой частоты на конденсаторе и катушке окажутся во много раз больше, чем амплитуды напряжений других частот. Контур обнаружит, выделит напряжение с частотой, равной резонансной частоте контура. Это свойство последовательного контура используют для выделения сигнала резонансной частоты из совокупности сигналов различных частот.

Рассмотренное свойство последовательного контура оценивают

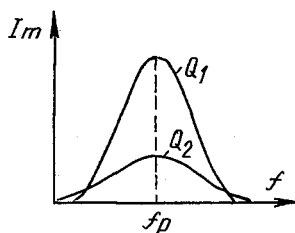


Рис. 96. Зависимость амплитуды тока в последовательном контуре от частоты

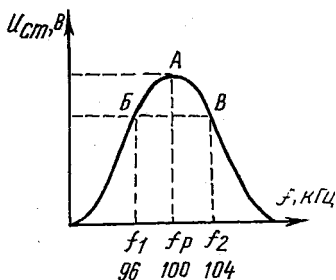


Рис. 97. Определение полосы пропускания последовательного контура

составляет 0,7 В). Горизонтальная линия, проведенная через точку с ординатой 0,7 В, пересекает график в точках B и B'. Этим точкам соответствуют частоты 96 кГц и 104 кГц. Следовательно, полоса пропускания контура заключена в диапазоне частот от 96 до 104 кГц, ширина полосы частот составляет $2\Delta f_n = 104 - 96 = 8$ (кГц).

Добротность контура Q и ширина полосы $2\Delta f_n$ пропускания взаимосвязаны:

$$Q = \frac{f_p}{2\Delta f_n}$$

В нашем случае

$$Q = \frac{100 \text{ кГц}}{8 \text{ кГц}} = 12,5.$$

48. Параллельный контур. Резонанс токов

Параллельный контур — это цепь с параллельным включением катушки индуктивности L и конденсатора C (рис. 98). Потери энергии в ветви с конденсатором очень малы. Принимаем, что активное сопротивление в цепи с конденсатором отсутствует. В катушке потери энергии имеются. Наличие их отражает активное сопротивление R в ветви с катушкой.

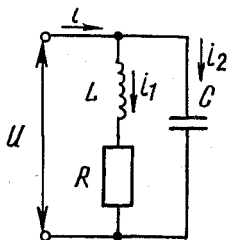


Рис. 98. Цепь с параллельным контуром

Предположим, что к параллельному контуру подводят переменное напряжение $u = U_m \sin \omega t$. В цепи с катушкой протекает ток $i_1 = I_{1m} \sin(\omega t - \varphi_1)$. Он сдвинут по фазе относительно напряжения на угол φ_1 в сторону отставания. Когда сопротивление R мало ($R \rightarrow 0$), угол φ_1 близок к $\pi/2$. Ток в цепи с конденсатором ($i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \pi/2)$) опережает по фазе напряжение на угол $\pi/2$. Сдвиг фаз между токами i_1 и i_2 составляет $\varphi_1 + \pi/2$.

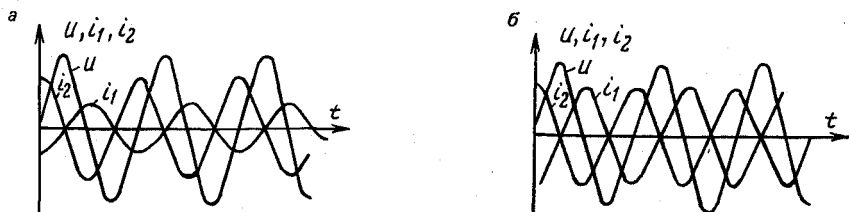


Рис. 99. Графики напряжения и токов в ветвях параллельного контура: а — $\omega \neq \omega_p$; б — $\omega = \omega_p$

Примем активное сопротивление R в ветви с катушкой небольшим и $\varphi_1 \approx \frac{\pi}{2}$. Тогда разность фаз между токами i_1 и i_2 окажется близкой к π , или к 180° . Рассмотрим графики напряжения u и токов i_1 и i_2 с учетом такого приближения (рис. 99, а). В любой момент времени токи i_1 и i_2 противоположны по направлению. Ток i в цепи источника напряжения можно приблизительно определить как разность токов i_1 и i_2 . Для идеального контура, в котором потерь энергии нет и $R=0$, $i=i_1-i_2$.

Амплитуды токов I_{1m} и I_{2m} в ветвях зависят от частоты подводимого к цепи напряжения. Ее можно установить такой, чтобы амплитуды токов I_{1m} и I_{2m} оказались равными (рис. 99, б). Тогда амплитуда тока I_m будет равна нулю. В реальном контуре, для которого $R \neq 0$, при определенной частоте напряжения амплитуда тока I_m достигает минимального значения. Такой режим цепи называют резонансом токов, а частоту — резонансной частотой ω_p , которую рассчитывают по такой же формуле, как и для последовательного контура:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Резонанс токов характерен не только тем, что амплитуда тока в цепи контура является минимальной, но и совпадением фаз тока и напряжения. Хотя контур содержит катушку индуктивности и конденсатор, но при резонансе его сопротивление является активным.

Сопротивление параллельного контура z_k можно определить отношением амплитуды подводимого напряжения U_m и амплитуды общего тока I_m : $z_k = \frac{U_m}{I_m}$. В случае резонанса $z_{k,p} = \frac{U_m}{I_{mp}}$.

Сопротивление параллельного контура при резонансе больше, чем сопротивление этого же контура при любой другой частоте подводимого напряжения. Величина его зависит от параметров контура, и рассчитать его можно по формуле

$$z_k = \frac{L}{CR} = QL\omega_p.$$

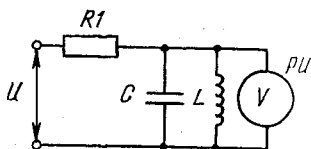


Рис. 100. Цепь для исследования избирательных свойств параллельного контура

Если к источнику переменного напряжения присоединить последовательно включенные резистор $R1$ и параллельный контур LC (рис. 100), то параллельный контур будет выделять колебания резонансной частоты. Сопротивление резистора $R1$ гораздо больше сопротивления параллельного контура при резонансе $z_{к.р}$.

Амплитуда тока в цепи I_m может быть рассчитана по формуле

$$I_m = \frac{U_m}{R_1 + z_{к.р}} \approx \frac{U_m}{R_1}.$$

Это значит, что изменение сопротивления параллельного контура практически не будет влиять на амплитуду тока в цепи.

Амплитуда напряжения в контуре $U_{к.м}$ равна произведению амплитуды тока I_m на сопротивление контура z_k ($U_{к.м} = I_m z_k$). Ее значение практически зависит лишь от сопротивления параллельного контура. В случае резонанса токов $U_{к.мр} = I_m z_{к.р}$. Когда частота подводимого напряжения будет совпадать с резонансной частотой контура, электронный вольтметр PU , изменяющий амплитуду напряжения на контуре, покажет максимальное ее значение.

Если на вход цепи, содержащей последовательно включенный резистор и параллельный контур, подать напряжения различных частот, то на контуре возникнет падение напряжения резонансной частоты или близкой к ней. Для токов, частоты которых сильно отличаются от резонансной, параллельный контур обладает малым сопротивлением, и при прохождении по цепи токов этих частот падение напряжения на контуре незначительно.

49. Понятие о связанных контурах

Кроме одиночных контуров, в радиотехнических устройствах применяются системы контуров, в которых электромагнитная энергия передается от одного контура к другому. Такие контуры называются *связанными*. Широко распространена система с *трансформаторной* (индуктивной) связью между контурами (рис. 101, а). В цепь первого контура, содержащую катушку $L1$, конденсатор $C1$ и активное сопротивление $R1$ включен генератор переменного тока. По элементам контура течет переменный ток i_1 . Внутри катушки $L1$ и вокруг нее создается переменное магнитное поле, линии индукции которого пересекают витки катушки $L2$. В катушке $L2$ индуцируется переменная ЭДС, вызывающая ток i_2 . В свою очередь при протекании переменного тока i_2 по катушке $L2$ вокруг нее также создается переменное магнитное поле, и поэтому в катушке $L1$ наводится переменная ЭДС. Чем ближе друг к другу располагаются катушки $L1$ и $L2$, тем сильнее связь меж-

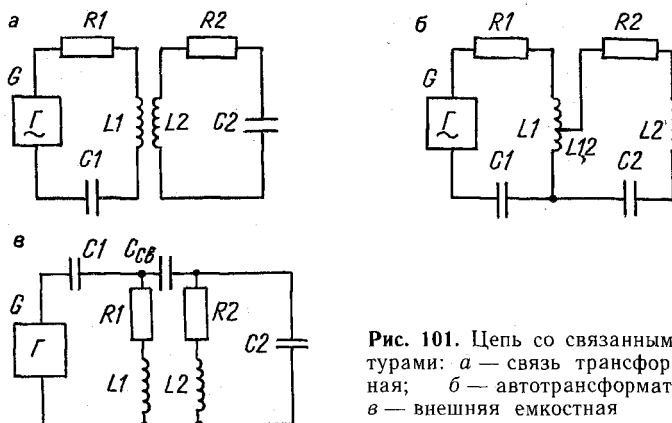


Рис. 101. Цепь со связанными контурами: а — связь трансформаторная; б — автотрансформаторная; в — внешняя емкостная

ду контурами. Сильной связи можно достичь, если расположить обе катушки на одном и том же сердечнике или намотать катушку $L2$ поверх катушки $L1$.

В случае *автотрансформаторной* связи между контурами (рис. 101,б) часть витков катушки $L1$ оказывается присоединенной ко второму контуру. Переменное напряжение u_{12} , снимаемое с катушки $L12$, вызывает появление тока i_2 во втором контуре. Чем больше витков катушки $L1$ являются общими для обоих контуров, тем сильнее связь между контурами.

При *внешней емкости связи* (рис. 101,в) второй контур подключается к первому через конденсатор $C_{св}$ обычно небольшой емкости. Увеличение емкости конденсатора $C_{св}$ усиливает связь между контурами.

В связанных контурах, как и в одиночных, амплитуды токов в контурах и амплитуды напряжений на их элементах зависят от частоты подводимого напряжения. Существенное влияние на характер зависимости оказывает связь между контурами. Для контуров с трансформаторной связью на рис. 102 графически выражено влияние частоты подводимого к первому контуру напряжения на амплитуду тока во втором контуре I_{2m} для случая очень слабой (кривая 1), сильной (кривая 3) и так называемой критической (кривая 2) связей между контурами. Кривая 1 — амплитудно-частотная характеристика одиночного контура. Кривая 2 имеет горизонтальный отрезок и довольно крутые скаты. Это значит, что амплитуда тока I_{2m} достигает максимального значения не только на резонансной частоте контуров, но и в некоторой полосе частот. Как только частота напряжения выходит за пределы этой

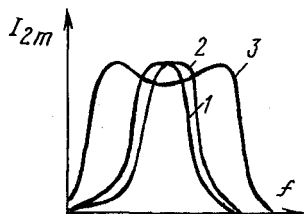


Рис. 102. Амплитудно-частотная характеристика связанных контуров

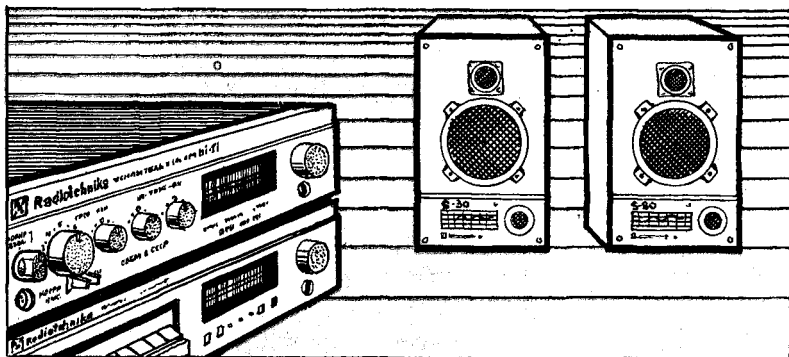
полосы частот, амплитуда тока I_{2m} резко уменьшается. При сильной связи между контурами полоса пропускания связанных контуров расширяется, в верхней части резонансной кривой наблюдается провал. В некоторых случаях для получения необходимой резонансной кривой колебательной системы устанавливают три, пять и даже больше связанных между собой контуров.

Свойства колебательных систем в виде последовательного, параллельного или связанных контуров, проявляющиеся в зависимости сопротивлений их от частоты тока, используют для выделения сигналов узкой полосы частот из совокупности сигналов различных частот, текущих по цепи. Необходимость такого выделения сигналов возникает, когда требуется получить колебания определенной частоты в генераторе колебаний, выделить сигнал определенной радиостанции при наличии сигналов других передающих станций, исключить влияние помех и т. д. Колебательные системы выступают в роли фильтров сигналов, выделяющих или отделяющих сигналы определенных частот.

Для выделения сигналов часто применяют сложные устройства в виде системы из нескольких последовательных контуров с различными видами связи между ними. Это позволяет получить близкую к П-образной форму кривой, выражающую зависимость напряжения на выходе такого устройства от частоты сигнала.

Вопросы и задания

1. Какие цепи называют колебательными контурами? 2. Объясните процесс возникновения свободных колебаний в контуре. 3. По какой формуле рассчитывают частоту свободных колебаний в контуре? 4. Что такое добротность контура? полоса пропускания? 5. Какое явление называют резонансом напряжения? При каких условиях оно возникает? 6. Какими свойствами характеризуется контур при резонансе напряжений? 7. При каких условиях возникает резонанс токов? 8. Какие контуры называют связанными? 9. Назовите виды связи между контурами.



Глава XI

РАДИОПЕРЕДАЮЩИЕ И РАДИОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА

50. Принцип осуществления радиосвязи. Структурная схема радиопередающего устройства

Радиосвязь — один из видов электрической связи, основанный на распространении электромагнитных волн в пространстве.

Электромагнитные волны — это взаимно связанные переменные электрические и магнитные поля, распространяющиеся в воздушном пространстве со скоростью $c = 300\,000$ км/с. Электромагнитное поле характеризуется напряженностью \vec{E} электрического поля и индукцией \vec{B} магнитного поля. В электромагнитной волне векторы \vec{E} и \vec{B} взаимно перпендикулярны и перпендикулярны к направлению ее распространения.

Длина электромагнитной волны λ — это расстояние между ближайшими друг к другу точками, в которых фазы колебаний напряженности электрического поля или магнитной индукции одинаковы. За один период колебаний электромагнитная волна распространяется на расстояние, равное длине волны. Длина волны связана со скоростью распространения и периодом колебаний или частотой колебаний соотношением $\lambda = cT = c/f$.

Принцип радиосвязи заключается в следующем. На передающей станции устанавливают радиопередатчик, содержащий генератор высокой частоты. На высокочастотные колебания воздействуют колебаниями низкой частоты — осуществляют модуля-

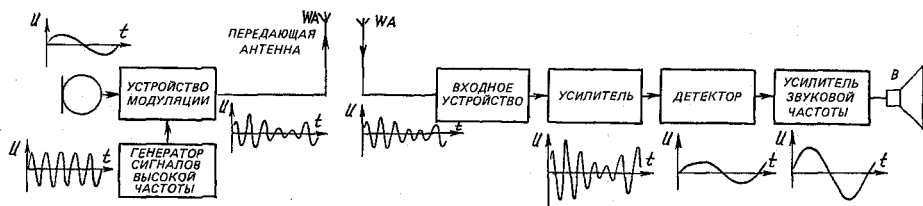


Рис. 103. Структурная схема канала радиосвязи

цию колебаний. Передатчик соединен с антенной, которая излучает в пространство электромагнитные волны.⁴

Достигая антенны приемного устройства, высокочастотные электромагнитные волны возбуждают в ней переменный ток той же частоты, на которой работал передатчик. В приемном устройстве электрические колебания усиливаются и преобразовываются — происходит процесс демодуляции, или детектирования (выделение колебаний звуковой частоты). Полученное на выходе детектора переменное напряжение соответствует звуковым колебаниям, воздействующим на микрофон в передающем устройстве. Переменный ток звуковой частоты, проходя по обмотке динамической головки, вызывает движение ее диффузора. Возникает звуковая волна.

Структурная схема устройства односторонней радиосвязи представлена на рис. 103. Там же изображены графики, показывающие изменения напряжений на входах и выходах блоков с течением времени.

51. Избирательные усилители

Избирательные усилители обеспечивают увеличение амплитуды электрических колебаний в узкой полосе частот, не создавая при этом усиления колебаний вне этой полосы. Такие усилители применяются как в передатчиках, так и приемниках. В передатчиках приходится усиливать колебания определенной частоты, генерируемые задающим генератором, колебания в пределах некоторой полосы частот, появляющиеся в процессе модуляции. В приемнике колебания выделяются входным устройством, а затем усиливаются в узкой полосе частот.

Наиболее простым избирательным усилителем является *резонансный* (рис. 104). Он содержит параллельный контур в цепи коллектора транзистора. При отсутствии входного напряжения по катушке контура L_k протекает постоянный ток коллектора I_{kp} . Когда на вход усилителя подается переменное напряжение, изменяется ток коллектора.

Сопротивление параллельного контура зависит от частоты тока в его цепи. На резонансной частоте контура это сопротив-

ление является максимальным. Как только частота входного напряжения становится равной резонансной или близкой к ней, сопротивление параллельного контура переменному току становится большим и амплитуда переменного напряжения на нем сильно возрастает. Через конденсатор $C2$ это переменное напряжение может быть подведено к нагрузке усилителя. Им обычно является входное сопротивление следующего каскада.

Плавную перестройку резонансной частоты контура осуществляют конденсатором переменной емкости, а диапазон частот контура меняют переключением катушки.

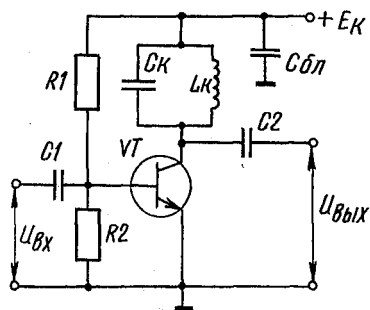


Рис. 104. Резонансный усилитель

52. Генератор незатухающих колебаний

Токи высокой частоты вырабатываются специальными генераторами высокой частоты (автогенераторы), в которых энергия источников питания постоянного тока преобразуется в энергию незатухающих электрических сигналов переменного тока требуемой частоты.

Наиболее распространенные автогенераторы с колебательными контурами — LC -генераторы.

Автогенератор (рис. 105) имеет резисторы $R1$, $R2$, катушку $L_{св}$ и конденсатор $C1$ в цепи базы транзистора, параллельный контур $L_k C_k$ в цепи коллектора транзистора. Генератор представляет собой резонансный усилитель с дополнительной цепью в виде катушки связи $L_{св}$ и разделительного конденсатора $C1$.

При подключении источника питания появляется коллекторный ток. Он является суммой двух токов — тока зарядки конденсатора и тока в катушке. В момент включения ток зарядки максимальный, с течением времени он уменьшается, за короткий промежуток времени конденсатор заряжается. Заряженный конденсатор C_k разряжается через катушку L_k ; в контуре $L_k C_k$ возникают свободные колебания. Подключенная катушка связи поддерживает эти колебания незатухающими.

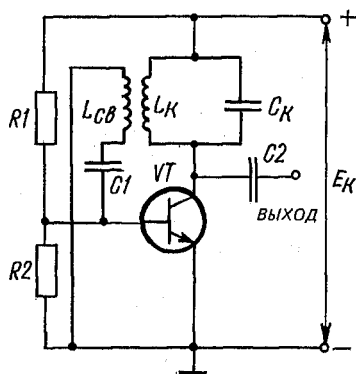


Рис. 105. Автогенератор с трансформаторной обратной связью

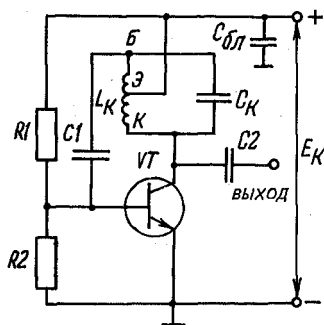


Рис. 106. Автогенератор с авто-трансформаторной обратной связью

Протекающий по катушке L_k ток вызывает появление вокруг нее изменяющегося с течением времени магнитного поля. Силовые линии этого поля пересекают витки катушки связи и вызывают в ней ЭДС. Между отводами катушки связи возникает напряжение. Один отвод катушки соединен с общим проводом цепи, второй с базой транзистора. Таким образом, напряжение между отводами катушки связи оказывается приложенным к переходу база — эмиттер транзистора и управляет коллекторным током его. Это управление током коллектора можно осу-

ществить так, чтобы изменения напряжения между базой и эмиттером поддерживали колебания тока в контуре. Для этого необходимо, чтобы напряжение способствовало увеличению коллекторного тока транзистора в промежутки времени, когда ток свободных колебаний в контуре протекает по катушке L_k в направлении по схеме сверху вниз, и его уменьшению, когда ток свободных колебаний протекает по катушке L_k в обратном направлении, т. е. необходимо, чтобы обратная связь в автогенераторе была положительной. Необходимо также, чтобы амплитуда напряжения между отводами катушки связи была достаточно большой или чтобы обратная связь была достаточно сильной. На практике знак обратной связи изменяют переключением отводов катушки, а величину обратной связи регулируют расстоянием между катушкой связи и катушкой L_k .

Катушки L_k и $L_{св}$ автогенератора образуют высокочастотный трансформатор. Такая схема автогенератора называется *трансформаторной*.

На практике широкое распространение получили автогенераторы с *автотрансформаторной* обратной связью (рис. 106). Напряжение обратной связи в таком автогенераторе снимается с части витков катушки контура L_k . При таком способе создания обратной связи три точки контура оказываются соединенными с электродами транзистора: точка K — с коллектором, точка $Э$ через конденсатор $C_{бл}$ — с эмиттером, точка $Б$ через конденсатор $C1$ — с базой транзистора. Генератор, построенный по такой схеме, называют *трехточечным*.

53. Модуляция. Устройства амплитудной модуляции

Получаемые в автогенераторах передатчиков высокочастотные гармонические колебания изменяются с течением времени. Это равнозначно бесконечному повторению одних и тех же символов

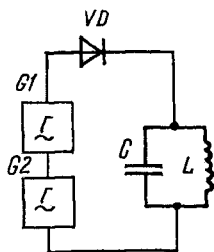


Рис. 107. Устройство модуляции с полупроводниковым диодом

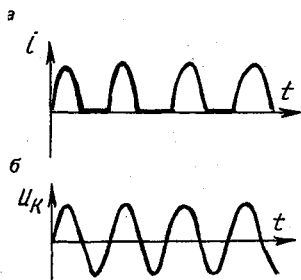


Рис. 108. Токи и напряжения в устройстве модуляции при отсутствии модулирующего напряжения: а — ток диода; б — напряжение на контуре

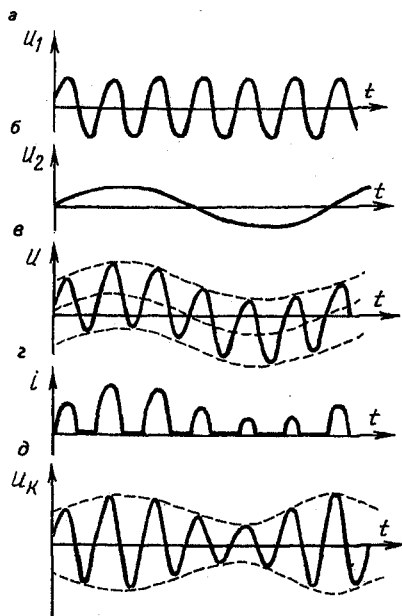


Рис. 109. Токи и напряжения в устройстве модуляции: а — напряжение высокой частоты; б — напряжение низкой частоты; в — суммарное входное напряжение; г — ток диода; д — напряжение на контуре

в одном и том же порядке. Такие колебания информацию не несут. Но они могут быть использованы в качестве носителей информации. Для записи информации управляют параметрами высокочастотных колебаний — амплитудой, частотой и фазой. Процесс преобразования высокочастотных гармонических колебаний, в ходе которого под воздействием сигнала сообщения происходят изменения амплитуды, частоты или фазы несущих колебаний, называют *модуляцией*.

В системах радиосвязи распространена *амплитудная* модуляция. Для передачи речи или музыки в качестве сигнала сообщения выступает напряжение на выходе микрофона. Частота изменения его составляет от десятков герц до 10...12 кГц, что гораздо ниже частоты несущих колебаний. В качестве сигнала управления амплитудой несущих колебаний может выступать гармоническое напряжение низкой частоты $u_{\Omega} = U_{\Omega m} \sin \Omega t$. В результате воздействия его имеют место приращения амплитуды колебаний, описываемые соотношением $\Delta U'_m = \Delta U_m \sin \Omega t$, где ΔU_m — наибольшее приращение амплитуды. Амплитуда модулированных колебаний изменяется в этом случае по закону $U'_m = (U_m + \Delta U_m \sin \Omega t)$.

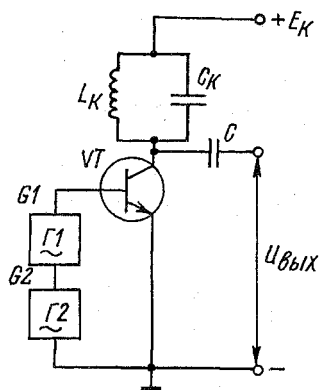


Рис. 110. Устройство базовой модуляции

Простейшее устройство амплитудной модуляции — это устройство с диодом (рис. 107). Оно включает источник напряжения высокой (генератор $G1$) и низкой (генератор $G2$) частоты, диод и параллельный контур LC , резонансная частота которого равна частоте несущих колебаний. Диод пропускает ток только в одном направлении, колебательный контур выделяет колебания несущей частоты.

Предположим, что на вход модуляционного устройства поступают только высокочастотные гармонические колебания. Текущий через диод ток представляет собой импульсы в форме половин синусои-

ды (рис. 108, а). Амплитуда импульсов тока зависит от амплитуды входного напряжения. При появлении первого импульса тока конденсатор заряжается и в контуре возникают свободные колебания. Поскольку частота повторения импульсов совпадает с частотой свободных колебаний в контуре, последующие импульсы тока вызывают подзарядку конденсатора контура. Амплитуда колебаний в контуре остается все время одной и той же (рис. 108, б). Если амплитуду высокочастотных колебаний увеличить, то произойдет увеличение амплитуды импульсов тока и амплитуды колебаний в контуре, и наоборот.

При подведении к устройству модуляции двух напряжений — высокочастотного и низкочастотного (рис. 109, а, б) на вход модуляционного устройства подается напряжение, равное сумме поданных напряжений (рис. 109, в). В результате амплитуда импульсов тока в цепи диода будет периодически изменяться (рис. 109, г). Будет изменяться и амплитуда напряжения на контуре (рис. 109, д). Высокочастотные колебания в контуре станут амплитудно-модулированными.

Чтобы одновременно модулировать и усиливать высокочастотные колебания, используют устройство базовой модуляции (рис. 110), в котором источники напряжений высокой и низкой частот включены в цепь базы транзистора, а параллельный контур — в цепь коллектора. Под действием двух входных напряжений в цепи базы проходят импульсы тока изменяющейся амплитуды, что приводит к возникновению колебаний в контуре с изменяющейся с течением времени амплитудой.

54. Преобразование частоты

В радиопередающей и радиоприемной аппаратуре приходится изменять частоту несущих высокочастотных колебаний. Процесс изменения частоты называют *преобразованием частоты*.

Устройство преобразования частоты состоит из смесителя (рис. 111) и маломощного генератора — гетеродина. На входы смесителя (один соединен с базой, второй — с эмиттером) подают два напряжения высокой частоты: модулированное напряжение сигнала u_c с частотой f_c и немодулированное напряжение u_r от гетеродина на частоте гетеродина f_r . В коллекторную цепь транзистора включают параллельный контур, настроенный на так называемую промежуточную частоту $f_{пр}$, равную обычно разности частот гетеродина f_r и сигнала f_c ($f_{пр} = f_r - f_c$). В радиовещательных приемниках промежуточная частота равна 465 кГц. Подводимое к переходу база — эмиттер переменное напряжение $u_{бэ}$ равно сумме напряжений сигнала u_c и гетеродина u_r . В режиме покоя транзистор заперт.

В результате воздействия двух входных напряжений коллекторный ток транзистора изменяется с течением времени по сложному закону. Этот ток можно представить как сумму постоянного тока и ряда синусоидальных токов. Одним из слагаемых коллекторного тока является ток промежуточной частоты ($f_{пр} = f_r - f_c$). На этой частоте сопротивление параллельного контура велико и на контуре создается значительное падение напряжения. Токи других частот падения напряжения на контуре не создают, так как для этих токов параллельный контур обладает малым сопротивлением. Снимаемое с контура напряжение амплитудно-модулированное с частотой $f_{пр}$.

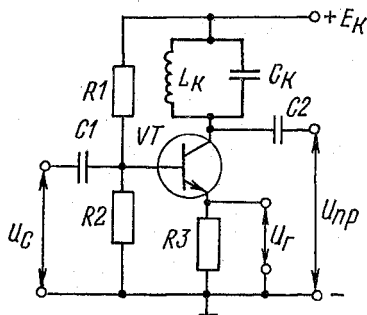


Рис. 111. Устройство преобразования частоты

55. Детектирование

Детектирование — это процесс, обратный модуляции. В результате детектирования выделяется напряжение, которое соответствует закону изменения амплитуды модулированного колебания.

Широко распространен диодный детектор (рис. 112) амплитудно-модулированных колебаний. Он состоит из диода VD , резистора R и присоединенного параллельно резистору конденсатора C . Через разделительный конденсатор C_p к детектору присоединяют сопротивление нагрузки R_n . Им является обычно вход усилителя звуковой частоты, который усиливает поступающее с выхода детектора напряжение. Ко входу детектора подводят амплитудно-модулированное напряжение высокой частоты.

Если конденсатор и цепь нагрузки отсутствуют, по резистору R проходит пульсирующий ток (рис. 113, а). При неизменяющейся амплитуде входного сигнала амплитуда импульсов тока остается одной и той же.

Подключение конденсатора существенно влияет на процессы в цепи. Когда через диод проходит ток, конденсатор заряжается, напряжение на нем достигает практически амплитудного значения входного напряжения (рис. 113, б). При отсутствии тока диода конденсатор разряжается через резистор R . Процесс разрядки идет медленно, поэтому к моменту появления следующего импульса тока напряжение на конденсаторе уменьшается лишь на небольшую величину. При появлении второго импульса тока конденсатор подзарядается и напряжение на нем опять достигает амплитудного значения входного напряжения. Изменения напряжения на резисторе небольшие. Поэтому можно считать, что напряжение на резисторе постоянно. Ток через диод идет лишь в те короткие промежутки времени, когда напряжение на входе детектора превосходит напряжение на конденсаторе.

При модулированном входном напряжении амплитуды импульсов тока диода изменяются (рис. 113, в). Напряжение на резисторе R с течением времени изменяется по тому же закону, что и амплитуда входного напряжения (рис. 113, г).

Детектирование амплитудно-модулированных сигналов можно осуществить также в детекторах на транзисторах (рис. 114). Детектор является резисторным усилителем, в котором в режиме покоя потенциал базы равен нулю. Коллектор транзистора соеди-

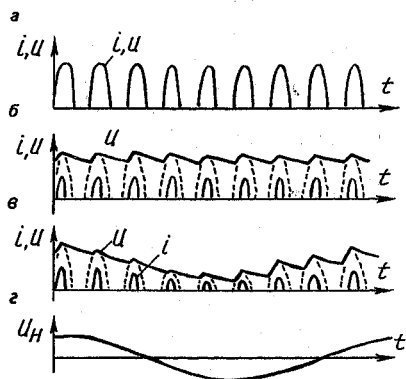


Рис. 113. Напряжения и токи диодного детектора: а — при воздействии немодулированного напряжения и отсутствии конденсатора; б — при воздействии немодулированного напряжения и наличии конденсатора; в — при воздействии модулированного напряжения; г — напряжение на выходе детектора

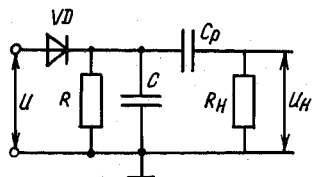


Рис. 112. Диодный детектор

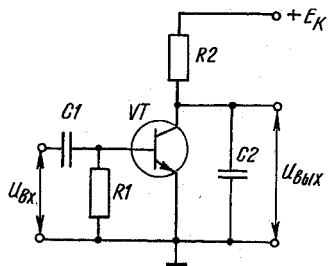


Рис. 114. Транзисторный детектор

нен с общей точкой усилителя через конденсатор $C2$. Амплитудно-модулированное входное напряжение высокой частоты вызывает появление изменяющихся по амплитуде импульсов тока базы и тока коллектора. Коллекторный ток проходит по резистору $R2$, создавая на нем падение напряжения. Конденсатор $C2$ сглаживает пульсации напряжения на резисторе $R2$.

56. Приемник прямого усиления. Основные параметры приемника.

Супергетеродинный приемник

Приемники, в которых до детектора происходит усиление сигнала той частоты, на которую настроено входное устройство, называют приемниками *прямого усиления*.

Приемник прямого усиления (рис. 115) содержит входное устройство, усилитель высокой частоты, детектор, усилитель звуковой частоты. На практике применяются приемники прямого усиления, построенные по различным схемам. Одна из схем дана на рис. 116. Входное устройство приемника — параллельный контур $LC2$, к которому через конденсатор $C1$ присоединена антенна. Настраивается контур конденсатором переменной емкости $C2$. С части витков катушки L напряжение подается через конденсатор $C3$ на вход усилителя на транзисторе $VT1$, а с выхода — на вход усилительного каскада на транзисторе $VT2$. К выходу усилителя присоединен диодный детектор на полупроводниковом диоде VD . Низкочастотное напряжение через конденсатор $C7$ поступает на вход усилителя звуковой частоты на транзисторе $VT3$.

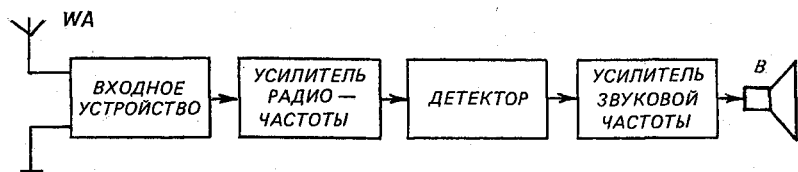


Рис. 115. Структурная схема приемника прямого усиления

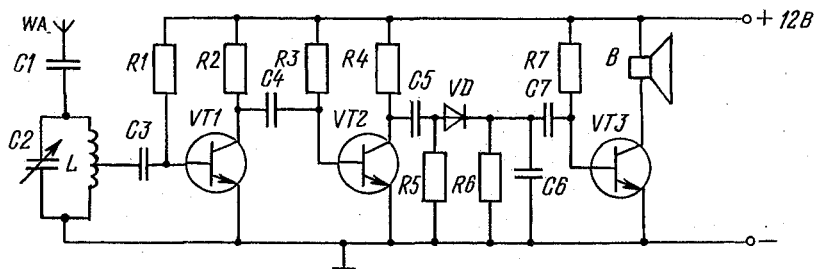


Рис. 116. Схема приемника прямого усиления

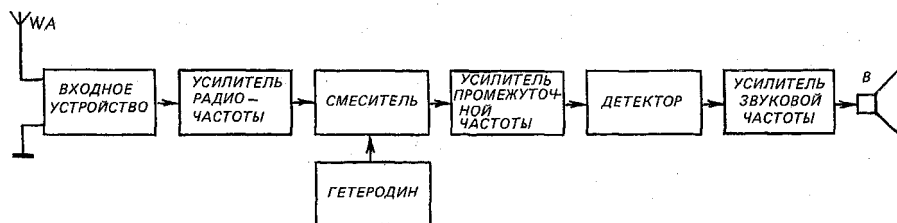


Рис. 117. Структурная схема супергетеродинного приемника

Основные параметры приемника — *чувствительность* и *избирательность*. Чувствительность приемника — способность принимать слабые сигналы. Оценивается она по наименьшей амплитуде или мощности радиосигнала на входе радиоприемника, при которой мощность низкочастотного сигнала на выходе приемника составляет 0,1 номинальной мощности, т. е. мощности, на которую приемник рассчитан. Избирательность радиоприемника — способность выделять принимаемый полезный сигнал из совокупности других сигналов различных частот, являющихся помехами. Различают помехи внешние (сигналы других радиостанций, космические, грозовые, промышленные) и внутренние (шумы).

Приемники с преобразованием несущей частоты называются *супергетеродинными*. На входе приемника (рис. 117) устанавливают входное устройство, выделяющее сигналы определенной радиостанции. Эти сигналы поступают на усилитель радиочастоты. Если усилитель резонансный, его настраивают на частоту принимаемой радиостанции одновременно с настройкой входного устройства. Усиленный сигнал высокой частоты подается на вход смесителя. Смеситель представляет собой каскад, подобный рассмотренному ранее избирательному усилителю. Транзистор работает с отсечкой коллекторного тока, подобно транзистору устройства амплитудной модуляции. Кроме модулированного сигнала, на смеситель воздействует также синусоидальное напряжение маломощного генератора приемника, называемого гетеродином. Возникают сложные изменения тока транзистора смесителя. Появляется модулированный сигнал промежуточной частоты, равной разности частот сигнала гетеродина и сигнала принятой радиостанции. Промежуточная частота остается одной и той же независимо от частоты принимаемого сигнала, так как при перестройке входного устройства с одной частоты на другую одновременно перестраивается гетеродин. Разность частот гетеродина и принимаемого сигнала не меняется. Этот сигнал выделяется сложным фильтром в цепи коллектора смесителя обычно в виде двух или большего числа связанных колебательных контуров.

Сигнал промежуточной частоты усиливается в усилителе, содержащем обычно два или больше каскада. Усиление в нем по-

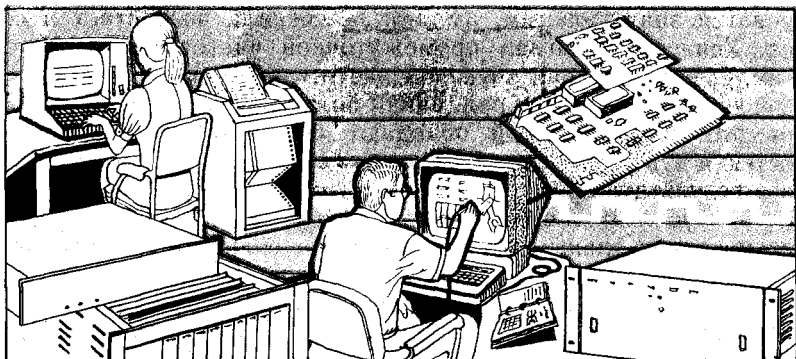
лучается значительным, амплитуда сигнала возрастает в сотни раз. Усиленный сигнал промежуточной частоты детектируется, а выделенный сигнал звуковой частоты усиливается.

Супергетеродинные приемники более сложные, чем приемники прямого усиления. Они обладают более высокой избирательностью и чувствительностью. Высокая избирательность достигается в результате преобразования частоты, а высокая чувствительность — усилением сигнала промежуточной частоты в смесителе и весьма значительным его усилением в усилителе промежуточной частоты.

Для изменения параметров приемника и создания наиболее благоприятных условий приема передач приемник регулируют вручную или автоматически. Основной вид регулировки — настройка приемника на заданную станцию, чаще всего ручную, переключая катушку контуров и плавно изменяя емкости конденсаторов контуров. В приемниках, выпускаемых в последние годы, применяется электронная настройка контуров — регулировка напряжения на варикапах.

Вопросы и задания

1. Какие блоки содержит передающее устройство? 2. Объясните, каким образом в автогенераторе поддерживаются незатухающие колебания. 3. Объясните устройство и принцип работы автогенератора с трансформаторной и автотрансформаторной обратной связью. 4. Какие условия необходимо выполнить, чтобы возбудить автогенератор? 5. Почему резонансный усилитель усиливает сигналы в узкой полосе частот? 6. Какой процесс называется модуляцией? Какие виды модуляции осуществляются при проведении радиосвязи? 7. Для чего применяют преобразование частоты сигнала? 8. Какой процесс называется детектированием сигналов? 9. Какой приемник называют приемником прямого усиления? Какие блоки входят в его состав? 10. Какой приемник называется супергетеродинным?



Глава XII

ЭЛЕМЕНТЫ ИМПУЛЬСНОЙ И ЦИФРОВОЙ ТЕХНИКИ

57. Импульсные сигналы

Функционирование многих устройств радиоэлектроники связано с использованием в них прерывистых сигналов, представляющих собой кратковременные отклонения напряжения или тока от некоторого постоянного, обычно нулевого, значения. Эти сигналы называют *импульсами*.

В зависимости от формы графиков, отражающих закон изменения напряжения или тока с течением времени, различают импульсы прямоугольной, трапецеидальной, треугольной, пилообразной, острокопечной и других форм (рис. 118).

Импульсы могут иметь положительную или отрицательную полярность или быть двухполярными. Полярность импульсов на рис. 118, а, б — положительная, на рис. 118, в — отрицательная, импульсы на рис. 118, г, д — двухполярные.

Импульсы напряжений и токов характеризуются рядом параметров:

амплитуда импульса $U_m(I_m)$ — максимальное значение импульсного напряжения (тока) положительной или отрицательной полярности, измеренное относительно нулевого уровня;

длительность импульса τ_n — время, прошедшее с момента возникновения импульса и до его исчезновения;

период повторения импульсов T_n — промежуток времени от момента появления одного импульса до момента возникновения следующего импульса той же полярности;

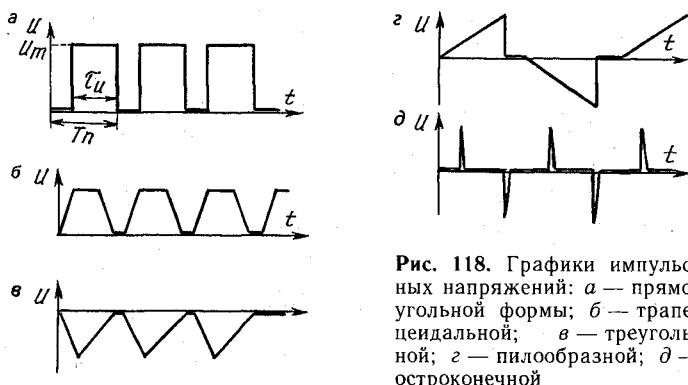


Рис. 118. Графики импульсных напряжений: а — прямоугольной формы; б — трапециoidalной; в — треугольной; г — пилообразной; д — остроконечной

частота повторения импульсов F_n — величина, обратная периоду повторения;

скважность импульсов характеризуется отношением периода повторения импульсов T_n к длительности импульса:

$$Q = \frac{T_n}{\tau_u}.$$

58. Электронные ключи

Для получения и преобразования сигналов в виде прямоугольных или близких к ним по форме импульсов напряжения применяются устройства, в которых многократно в единицу времени осуществляются замыкания и размыкания электрических цепей. Функции замыкания и размыкания цепей выполняют *электронные ключи*. Электронный ключ имеет два рабочих состояния: замкнутое или разомкнутое. Замкнутый электронный ключ обладает малым сопротивлением, в его цепи протекает ток, на выходе управляемой ключом цепи имеется напряжение. Сопротивление разомкнутого электронного ключа является большим, ток в его цепи практически отсутствует и напряжение на выходе управляемой им цепи можно применять равным нулю.

Применяются также *диодные* и *транзисторные* ключи. Действие диодного ключа основано на свойстве диода пропускать ток в одном направлении. Схема диодного ключа такая же, как и для однополупериодного выпрямителя (см. рис. 82, а). Ключ содержит последовательно включенные диод и резистор. При положительном напряжении на входе через диод протекает ток, на резисторе имеется напряжение. Когда входное напряжение является отрицательным, оно выступает как обратное напряжение на диоде. Ток через диод практически не протекает, напряжение на резисторе отсутствует. Диодный ключ находится в разомкнутом состоянии, сопротивление его большое. Таким образом, замкнутое или разомк-

нутое состояние ключа определяется полярностью подводимого напряжения.

Транзисторный ключ можно собрать в виде цепи с последовательным соединением резистора R_k и транзистора (рис. 119), как в простейшем резисторном усилителе. С целью ограничения тока базы включается резистор R_b . Управление ключом осуществляется посредством подаваемого на переход база — эмиттер напряжения. Когда напряжение на входе цепи управления равно нулю, ток в цепи базы не протекает, практически отсутствует коллекторный ток. Ключ находится в разомкнутом состоянии. Напряжение положительной полярности и достаточно большой величины вызывает появление тока такой величины, когда транзистор переходит в режим насыщения и приходящееся на него напряжение снижается. Ключ замкнут, через него протекает ток.

Недостатком ключа на биполярном транзисторе является протекание в запертом транзисторе обратного тока коллекторного перехода и потребление мощности цепью управления. Поэтому в качестве управляемого элемента ключа выгоднее применять полевые транзисторы. Почти идеальным является ключ на комплементарной паре МДП-транзисторов: в разомкнутом состоянии он не пропускает ток, а для управления потребляет очень малую мощность.

В транзисторе $VT1$ ключа (рис. 120) может возникнуть канал с проводимостью p -типа, в транзисторе $VT2$ — канал n -типа. Затворы транзисторов объединены. К ним подводится управляющее напряжение. Когда входное напряжение является низким, близким к нулю, между затвором и истоком транзистора $VT1$ устанавливается напряжение $u_{з.и1}$, почти равное напряжению питания. В транзисторе индуцируется канал p -типа. Через канал выход ключа соединяют с положительным полюсом источника питания. В это время напряжение затвор — исток транзистора $VT2$ ниже порогового. Канал во втором транзисторе не появляется, ток через транзистор $VT2$ не протекает. Выход ключа надежно отключается от общего провода.

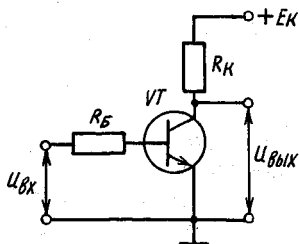


Рис. 119. Электронный ключ на биполярном транзисторе

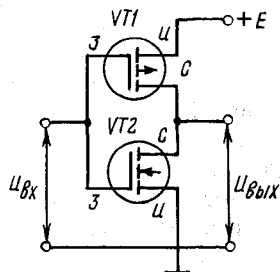


Рис. 120. Электронный ключ на МДП-транзисторах

Положительное, близкое к напряжению питания управляющее напряжение обеспечивает возникновение канала с проводимостью n -типа в транзисторе $VT2$ и соединение выхода ключа через канал с общим проводом цепи. Между затвором транзистора $VT1$ и его истоком устанавливается близкое к нулю напряжение. Ток через транзистор не протекает. Выход ключа отсоединяется от положительного полюса источника питания, и потенциал его устанавливается равным нулю.

Транзисторный ключ на биполярном транзисторе можно применять для преобразования синусоидального напряжения в импульсное с формой импульсов, близкой к прямоугольной. Переменное напряжение достаточно большой амплитуды используется в качестве управляющего напряжения, подаваемого на вход ключа. В течение полупериода это напряжение имеет отрицательную полярность, в течение последующего — положительную. Когда напряжение на входе является отрицательным, ток в цепи коллектора отсутствует и коллекторное напряжение является высоким, практически равным напряжению питания. Напряжение положительной полярности в состоянии вызвать переход транзистора в режим насыщения. В эти промежутки времени коллекторное напряжение снижается почти до нуля. Переходы от высокого напряжения на выходе ключа к низкому и обратные переходы совершаются за короткие промежутки времени. Изменения выходного напряжения являются режимами.

Для преобразования переменного напряжения в импульсное может быть применен ключ на диоде в сочетании с ограничителем выходного напряжения диодного ключа в виде присоединенного параллельно резистору стабилитрона (рис. 121, а). Диод $VD1$ пропускает ток в одном направлении, поэтому на резисторе R напряжение только положительной полярности. Когда напряжение на нагрузке достигает значения напряжения стабилизации $U_{ст}$ (рис. 121, б), происходит пробой стабилитрона $VD2$, возрастание напряжения на нагрузке прекращается. Параллельно включенный стабилитрон ограничивает импульсы положительной полярности по уровню $U_{ст}$. Амплитуда импульса U_m равна в этом случае напряжению стабилизации $U_{ст}$.

59. Переходные процессы в цепи с конденсатором и резистором

Работа многих устройств цифровой и импульсной техники связана с процессами зарядки и разрядки конденсатора через резистор. Они происходят при подключении конденсатора к источнику постоянного тока и замыкании пластин

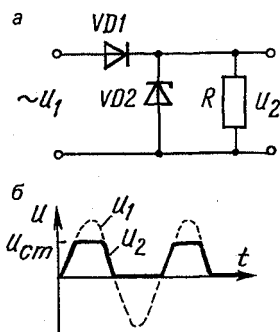


Рис. 121. Преобразование синусоидального напряжения в трапецидальное: а — схема цепи; б — график напряжения

заряженного конденсатора через резистор. Такие процессы называют *переходными*.

Рассмотрим цепь, содержащую источник постоянного тока с напряжением E на зажимах, резисторы $R1$ и $R2$, конденсатор C и переключатель SA (рис. 122, а). Если установить переключатель в положение, при котором конденсатор оказывается присоединенным к резистору $R1$, то по резистору будет проходить ток зарядки конденсатора i_3 . Этот ток вызывает накапливание заряда на обкладках конденсатора и увеличение напряжения u_C между ними (рис. 122, б). По мере увеличения напряжения u_C ток зарядки будет уменьшаться (рис. 122, в), а когда конденсатор полностью зарядится и напряжение u_C станет равным E , ток проходить не будет. Изменения тока зарядки и напряжения на конденсаторе с течением времени происходят по экспоненциальному закону.

Для оценки промежутка времени, в течение которого заряжается конденсатор, вводится постоянная времени цепи зарядки $\tau_3 = R_1 C$. За это время ток зарядки изменяется от максимального

$$\text{его значения } i_{3, \text{ макс}} = E/R \text{ до величины } i_{31} = \frac{i_{3, \text{ макс}}}{e} \approx \frac{i_{3, \text{ макс}}}{2,71} \approx \approx \frac{i_{3, \text{ макс}}}{3}, \text{ а напряжение } u_C \text{ — от нуля до } u_{C1} = E \left(1 - \frac{1}{e}\right) \approx \approx E \left(1 - \frac{1}{2,71}\right) \approx \frac{2}{3} E.$$

Если установить переключатель SA в положение, при котором заряженный до напряжения $u_{C, \text{ макс}} = E$ конденсатор окажется соединенным с резистором $R2$, конденсатор начнет разряжаться, по резистору $R2$ потечет ток разрядки i_p , напряжение на конденсаторе u_C (рис. 123, а) и ток разрядки (рис. 123, б) с течением времени будут уменьшаться, приближаясь к нулевому значению.

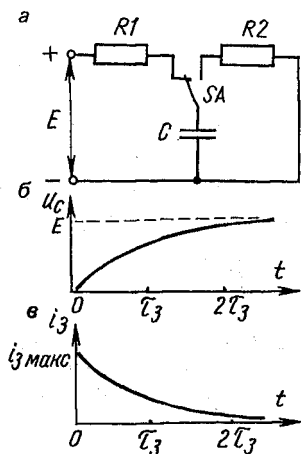


Рис. 122. Зарядка конденсатора: а — цепь зарядки; б — напряжение на конденсаторе; в — ток зарядки

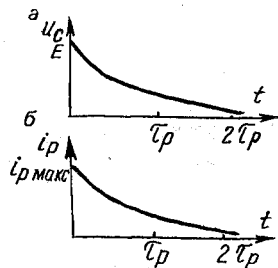


Рис. 123. Разрядка конденсатора: а — напряжение на конденсаторе; б — ток разрядки

Кривая графика является экспонентной. Цепь разрядки характеризуется постоянной времени цепи разрядки $\tau_p = R_2 C$, измеряемой промежутком времени, в течение которого ток разрядки и напряжение на конденсаторе убывают от их максимального значения

$$i_{p, \max} = \frac{E}{R_2}, \quad u_{C, \max} = E \quad \text{до значений} \quad i_{p2} = \frac{i_{p, \max}}{e} \approx \frac{i_{p, \max}}{3}, \quad u_{C2} = \frac{E}{e} \approx \frac{E}{3}, \quad \text{т. е. уменьшаются примерно в три раза.}$$

60. Мультивибратор

Цепи с резисторами и конденсаторами содержатся в генераторах импульсов. Одним из них является *мультивибратор* — генератор многих колебаний. Он позволяет получить импульсы напряжения, близкие по форме к прямоугольным. Мультивибратор включает два соединенных между собой усилителя, причем выход первого из них соединен со входом второго, а выход второго — со входом первого.

В мультивибраторе на биполярных транзисторах (рис. 124) в цепи коллекторов включены резисторы R_{K1} , R_{K2} . Для создания токов баз установлены резисторы R_{B1} , R_{B2} . Коллектор транзистора $VT1$ через конденсатор $C1$ соединен с базой транзистора $VT2$, а коллектор транзистора $VT2$ через конденсатор $C2$ — с базой транзистора $VT1$. Транзисторы мультивибратора находятся поочередно то в состоянии насыщения, то в режиме отсечки. Когда первый транзистор заперт, то второй насыщен. В момент перехода первого транзистора в режим насыщения второй транзистор запирается. Переключение транзисторов связано с процессами зарядки и разрядки конденсаторов в цепи мультивибратора. Для объяснения этих процессов предварительно рассмотрим цепь, представленную на рис. 125.

Ключ SA находится в разомкнутом состоянии. После подключения источника питания через резистор R_{B2} и диод VD будет протекать ток. Одновременно заряжается конденсатор. Ток зарядки будет протекать по резистору R_{K1} и через диод VD . Прямой ток

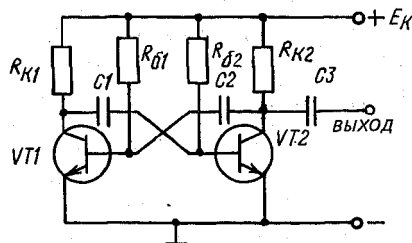


Рис. 124. Мультивибратор

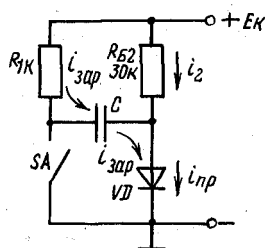


Рис. 125. Цепь зарядки и разрядки в мультивибраторе

диода i_{np} в это время равен сумме тока зарядки i_3 и тока i_2 . После зарядки напряжение на конденсаторе станет равным напряжению питания, т. е. E .

Замкнем ключ SA . Тогда одна из обкладок конденсатора окажется соединенной с общим проводом. Приходящееся на конденсатор напряжение будет приложено к диоду, причем для диода оно окажется запирающим. Ток через диод не течет, но токи в цепях резисторов протекать будут. По резистору R_{K1} будет идти ток от источника питания и дальше через замкнутый ключ. По резистору R_{62} пойдет ток разрядки, так как конденсатор будет разряжаться через этот резистор, источник питания и ключ. Когда конденсатор разрядится, ток по резистору R_{62} будет течь, так как начнется перезарядка конденсатора. Направление тока в резисторе R_{62} сохранится прежним. Потенциал ϕ соединенной с резистором R_{62} и диодом обкладки конденсатора становится положительным и постепенно повышается. Объясняется это тем, что при напряжении на конденсаторе, равном напряжению отпирания диода, появится ток диода и процесс зарядки конденсатора прекратится.

Если теперь разомкнуть ключ SA , то напряжение на конденсаторе понизится до нуля вследствие его разрядки через диод, источник питания и резистор R_{K1} и начнется описанный уже процесс его зарядки и повышение потенциала пластины конденсатора, соединенной с резистором R_{K1} .

В мультивибраторе на биполярных транзисторах роль диода выполняет переход база — эмиттер транзистора. Цепь мультивибратора, включающая резистор R_{K1} , конденсатор $C1$, переход база — эмиттер транзистора $VT2$, аналогична рассмотренной. Роль ключа в ней выполняет автоматически запираемый и переводимый в режим насыщения транзистор $VT2$. Имеется и вторая такая же цепь. Она включает резистор R_{K2} , конденсатор $C2$, переход база — эмиттер транзистора $VT1$ и автоматический ключ — транзистор $VT2$.

Предположим, что напряжение между обкладками конденсатора $C1$ равно нулю, конденсатор $C2$ заряжен, потенциал обкладки его, соединенной с резистором R_{K2} , положительный и транзистор $VT2$ переходит в режим насыщения. Тогда напряжение на конденсаторе $C2$ через открытый транзистор $VT2$ окажется приложенным к переходу база — эмиттер транзистора $VT1$. Транзистор $VT1$ перейдет в запертое состояние, что соответствует замыканию ключа в цепи (см. рис. 125). Конденсатор $C1$ будет заряжаться. Ток зарядки будет течь по резистору R_{K1} и через эмиттерный переход транзистора $VT2$. В результате состояние насыщения транзистора $VT2$ будет сохраняться, но по мере зарядки конденсатора $C1$ ток базы i_{62} транзистора $VT2$ будет уменьшаться.

Обкладки конденсатора $C2$ соединены между собой через резистор R_{61} , источник питания и открытый транзистор $VT2$. С течением времени конденсатор $C2$ будет разряжаться, а после полной его разрядки начнется повышение потенциала пластины конденсато-

ра, соединенной с резистором R_{61} и базой транзистора $VT1$, т. е. будет происходить его перезарядка. Как только напряжение на конденсаторе составит доли вольта, произойдет отпирание транзистора $VT1$ и переход его в состояние насыщения. Напряжение на конденсаторе $C1$ окажется приложенным к эмиттерному переходу транзистора $VT2$, и он перейдет в режим отсечки, т. е. окажется запертым. Начнется зарядка конденсатора $C2$, причем положительным будет потенциал обкладки, соединенной с коллектором транзистора $VT2$. Ток зарядки будет течь по резистору R_{K2} и через эмиттерный переход транзистора $VT1$. В процессе зарядки напряжение на конденсаторе $C2$ практически станет равным напряжению E_K . В это время конденсатор $C1$ разряжается. После зарядки полярность напряжения на нем изменится на противоположную, а когда напряжение станет минимальным, транзистор $VT2$ перейдет в режим насыщения и будет разряжаться конденсатор $C2$.

Нахождение транзистора $VT1$ в запертом состоянии определяется постоянной времени $\tau_1 = R_{61}C_2$, а для транзистора $VT2$ — постоянной времени $\tau_2 = R_{62}C_1$. С течением времени коллекторные напряжения транзисторов изменяются. Постепенное возрастание коллекторного напряжения объясняется процессом зарядки конденсаторов в течение определенного промежутка времени. Горизонтальный участок графика у его вершины соответствует нахождению транзистора в запертом состоянии. Переход транзистора от режима отсечки в режим насыщения происходит за короткий промежуток времени. Поэтому спад напряжений получается быстрым. Во время протекания в цепи базы тока зарядки конденсатора потенциал коллектора транзистора понижается.

Длительность импульсов можно приблизительно рассчитать по формулам: $\tau_1 = 0,7 R_{61}C_2$, $\tau_2 = 0,7 R_{62}C_1$. При $R_{61} = R_{62}$ и $C_1 = C_2$ $\tau_1 = \tau_2$. Мультивибратор с такими параметрами называют *симметричным*.

Процессы в рассмотренном мультивибраторе протекают без внешних воздействий. Мультивибратор работает в автоколебательном режиме. Возможен ждущий режим работы, когда мультивибратор пребывает в состоянии равновесия до тех пор, пока на него не будет подан импульс запуска. Под действием импульса запуска мультивибратор переходит в новое состояние, из которого он возвращается спустя некоторое время. На выходе мультивибратора появляется один импульс напряжения по форме, близкой к прямоугольной. Для получения следующего импульса необходимо подать другой запускающий импульс.

Простой мультивибратор (рис. 126) можно создать на базе операционного усилителя, если к инвертирующему входу его присоединить цепочку $CR1$, а на неинвертирующий вход подать часть выходного напряжения, снимаемого с резистора $R2$ делителя напряжения $R2R3$.

Предположим, что в момент включения источников питания на входе операционного усилителя устанавливается положительное

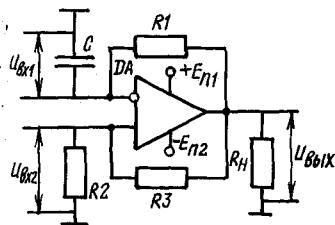


Рис. 126. Генератор прямоугольных импульсов напряжения на базе операционного усилителя

напряжение. Такой же является полярность напряжения $u_{вх2}$. Конденсатор заряжается, напряжение $u_{вх1}$ повышается. Как только оно превысит напряжение $u_{вх2}$, на выходе усилителя и на неинвертирующем входе его установится отрицательное напряжение. Конденсатор будет перезаряжаться. Через некоторое время напряжение на нем превысит по величине напряжение $u_{вх2}$ и опять изменится полярность выходного напряжения. Таким образом, напряжение на выходе окажется импульсным, форма импульсов близкой к прямоугольной.

угольной, полярность импульсов то положительной, то отрицательной.

Подключив только один источник питания $E_{п1}$ и соединив вывод для подключения второго источника питания с общим проводом, можно получать униполярные прямоугольные импульсы напряжения положительной полярности.

61. Транзисторный триггер

Триггером (рис. 127) называется устройство, которое может находиться сколь угодно долго в одном из двух возможных устойчивых состояний и скачкообразно переключаться по сигналу извне из одного состояния в другое. В одном из состояний напряжение на выходе триггера высокое, в другом — низкое.

Симметричный триггер на дискретных элементах может быть выполнен в виде двухкаскадного усилителя с одинаковыми параметрами элементов в каскадах, в котором выход первого каскада через цепочку $R1C1$ соединяют со входом второго, а выход второго каскада через цепочку $R2C2$ — со входом первого. Базы транзисторов через резисторы $R_{б1}$ и $R_{б2}$ соединяют с отрицательным

полюсом источника запирающего напряжения, которое удерживает транзистор в установившемся состоянии.

Состояние триггера, при котором в цепях коллекторов обоих транзисторов протекали бы одинаковые токи, невозможно. Если, например, произойдет незначительное увеличение потенциала коллектора транзистора $VT1$, то это вызовет увеличение токов базы и коллектора транзистора $VT2$ и понижение потенциала его кол-

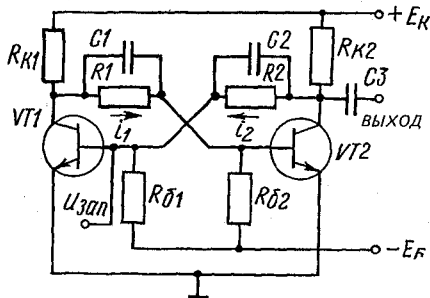


Рис. 127. Транзисторный триггер

лктора. Ток базы i_{b1} транзистора $VT1$ станет меньше, что приведет к дальнейшему повышению потенциала коллектора этого транзистора. Произойдет увеличение тока базы транзистора $VT2$ и переход его в режим насыщения. Коллекторное напряжение транзистора $VT2$ снизится до долей вольта, в результате произойдет запираание транзистора $VT1$.

Для перевода триггера из одного устойчивого состояния в другое необходимо подать на базу запертого транзистора импульс напряжения положительной полярности или на базу насыщенного транзистора — импульс напряжения отрицательной полярности. Если на базы обоих транзисторов одновременно подать импульсы напряжения положительной полярности, запертый транзистор откроется и триггер перейдет во второе устойчивое состояние. Переключение можно также осуществить подачей на базы транзисторов импульсов напряжения отрицательной полярности или подачей импульсов напряжения на коллекторы транзисторов.

62. Представление информации в устройствах цифровой техники

Как уже было сказано в § 1, представление сигнала в цифровой форме состоит в выражении его уровня через определенные промежутки времени числом интервалов отсчетов уровня — числом ступенек уровня. В цифровой технике для записи этих чисел используют только две цифры (символы): 0 и 1. Система записи является двоичной. Символы 0 и 1 в виде их комбинаций используют не только для записи чисел, но и для отражения различной другой информации. Представление информации набором символов называют *кодированием*, записываемый набор символов — *кодом*, а отдельные группы символов — *словом*.

Повсеместное применение в цифровой технике двоичного кода объясняется возможностью простого выражения символов 0 и 1 через электрические величины. Например, символу 0 может соответствовать отсутствие импульса напряжения или тока, низкий уровень напряжения или появление напряжения отрицательной полярности, а символу 1 — появление напряжения или тока, высокий уровень напряжения или появление напряжения положительной полярности. Наиболее распространен способ представления символов 0 и 1 положительным напряжением определенного уровня. Этот способ называют *потенциальным*. Символу 0 соответствует низкое напряжение, значение его не может быть больше 0,4 В (рис. 128), а символу 1 — высокое напряжение, уровень его должен быть больше 2,4 В. Наибольшее значение его ограничено напряжением питания устройств цифровой техники. Для многих функциональных элементов это напряжение равно 5 В. При исполь-

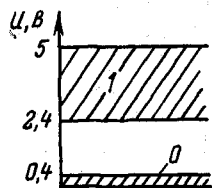


Рис. 128. Уровни напряжения логического нуля и логической единицы

зовании такого стандарта для обозначения символов 0 и 1 уровни напряжения в пределах от 0,4 В до 2,4 В не фиксируются. Время, на которое появляется напряжение низкого или высокого уровня, не оговаривается. В процессе передачи информации переходы от напряжения низкого уровня к напряжению высокого уровня, что соответствует переходу от символа 0 к символу 1, а также обратные переходы происходят очень быстро и могут повторяться миллионы раз в секунду. В связи с этим передача цифровой информации и ее обработка связаны с формированием, распространением по электрическим цепям и фиксацией кратковременных, близких по форме к прямоугольным импульсов напряжения.

К устройствам цифровой техники относятся цифровые вычислительные машины. В них обрабатывается различная информация. Ее представляют в виде чисел, текста, изображений предметов, графиков, сигналов о ходе технологического процесса и т. д. Вся информация представляется в двоичном коде, т. е. посредством символов 0 и 1. Для ведения вычислений осуществляется переход от записи чисел в распространенной десятичной системе счисления к записи в двоичной системе счисления. Цифры двоичной системы располагают в соответствии с правилами позиционной системы счисления. При такой записи значимость цифры зависит от места, которое она занимает. Нам хорошо известна десятичная система счисления. В ней применяется десять цифр. Основанием системы является число десять. Если в записи числа цифра сдвигается на один разряд влево, то ее значимость увеличивается в десять раз, а при смещении вправо, наоборот, ее значимость в десять раз уменьшается. Запись числа 627,48 представляется в виде: $A/2 = (627,48)_{10} = 6 \cdot 10^2 + 2 \cdot 10^1 + 7 \cdot 10^0 + 4 \cdot 10^{-1} + 8 \cdot 10^{-2}$.

При использовании двух цифр 0 и 1 основанием системы счисления является число 2. Запись числа 1101,11 в двоичной системе счисления расшифровывается следующим образом:

$$A/2 = (1101,11)_2 = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-2} = 8 + 4 + 0 + 1 + 0,5 + 0,25 = (13,75)_{10}.$$

В общем случае представление числа A в двоичной системе счисления может быть изображено в виде

$$A/2 = a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_0 \cdot 2^0 + a_{-1} \cdot 2^{-1} + \dots + a_{-m} \cdot 2^{-m}, \text{ где } a_0, a_1, a_2, \dots \text{ — цифры в соответствующих разрядах числа; } n, m \text{ — номера, определяющие положение цифры при отсчете от запятой влево и вправо.}$$

Для сокращения записей больших чисел и операций над ними в вычислительных машинах применяют также системы счисления с основанием 8 и 16. При этом для записи цифр восьмеричной и шестнадцатеричной систем счисления используют двоичный код. Двоичный код для выражения чисел является универсальным.

63. Выполнение арифметических действий над числами в двоичном коде

В цифровых вычислительных машинах результаты выполнения арифметических операций над числами в двоичном коде устанавливаются по правилам сложения, вычитания и умножения.

Сложение	Вычитание	Умножение
$0+0=0$	$0-0=0$	$0 \cdot 0=0$
$1+0=1$	$1-0=1$	$1 \cdot 0=0$
$0+1=1$	$1-1=0$	$0 \cdot 1=0$
$1+1=10$	$10-1=1$	$1 \cdot 1=1$

В процессе сложения ($1+1$) происходит переполнение разряда. Появляется цифра 1 старшего разряда, которая переносится на один разряд влево. В ходе вычитания ($10-1$) в младшем разряде уменьшаемого отсутствует цифра 1. Приходится производить заем числа 2, или цифры 1, в старшем разряде уменьшаемого.

Складывают два многоразрядных числа поразрядным сложением цифр, начиная с младшего разряда. В случае переполнения разряда переносят цифры 1 в старший разряд. Например:

$$\begin{array}{r} 1101 \\ + 1011 \\ \hline 11000 \end{array}$$

Если при вычитании в соответствующем разряде уменьшаемого отсутствует цифра 1, то занимают цифру 1 в старшем разряде уменьшаемого. Например:

$$\begin{array}{r} \downarrow \\ 1101 \\ - 1011 \\ \hline 0010 \end{array}$$

Умножение чисел, представленных в двоичном коде, сводится к выполнению циклов умножения на ноль или единицу и суммированию полученных произведений. Получается аналогия с умножением чисел в десятичной системе счисления. Только умножение на цифры множителя получается очень простым. Умножение множимого на ноль — это запись нулей во всех разрядах множимого, а умножение его на единицу — повторение записи множимого. Рассмотрим пример выполнения операции умножения двух двоичных чисел. При записи хода умножения учтем, что в устройствах суммирования одновременно выполняется сложение только двух чисел. Если требуется сложить несколько чисел, то находят вначале сумму первых двух. К полученному результату прибавляют третье число. Новый результат суммируют с четвертым числом и т. д. до завершения операции сложения. При сложении нескольких чисел появляются промежуточные результаты.

Например:

$$\begin{array}{r}
 \times 1101 \\
 \hline
 1101 \\
 + 1101 \\
 \hline
 \Pi_1 + 100111 \\
 + 0000 \\
 \hline
 \Pi_2 + 100111 \\
 + 1101 \\
 \hline
 \Pi 10001111
 \end{array}$$

Цифрой младшего разряда множителя является 1. Множимое записывают в качестве первого слагаемого для нахождения первого промежуточного результата Π_1 . Далее следует умножение на цифру 1 во втором разряде множителя. Этой цифре соответствует число 2 десятичной системы счисления. Умножение множимого на 2 в двоичном коде представляет сдвиг его на один разряд влево. Поэтому множимое сдвигают и подписывают под первым полученным числом. Находят сумму этих двух слагаемых, которая представляет собой первый промежуточный результат Π_1 . Третьей цифрой множителя является 0. Сдвигая на один разряд влево, записывают результат умножения множимого на нуль, т. е. в разрядах сдвинутого множимого записывают нули и находят второй промежуточный результат Π_2 . Далее следует четвертый шаг в выполнении операции умножения — сдвиг множимого на один разряд влево и умножения на цифру 1, или просто запись множимого. Затем определяют окончательный результат операции умножения — число Π . Таким образом, нахождение произведения сводится к последовательности записей множимого или нулей в его разрядах со сдвигом множимого после каждой записи на один разряд влево и суммированию двух чисел для нахождения вначале промежуточных результатов Π_1, Π_2, \dots , а потом и окончательного результата Π .

Деление двоичных чисел, как и десятичных, заключается в повторении циклов умножения, вычитания и сдвига чисел. Например:

$$\begin{array}{r}
 10001111 \mid 1011 \\
 - 1011 \quad \mid 01101 \\
 \hline
 01101 \\
 - 1011 \\
 \hline
 001011 \\
 - 1011 \\
 \hline
 000000
 \end{array}$$

Если делитель сдвинуть до совмещения старших разрядов делимого и делителя, то вычитание делителя из делимого будет невозможным. Поэтому в старшем разряде частного пишут нуль и смещают делитель на один разряд вправо. Находят остаток

и к нему приписывают цифру третьего разряда делимого. Сдвигают делитель на один разряд вправо и вычитают. В четвертом шаге деления вычитание невозможно, поэтому очередной цифрой частного становится 0. После этого дописывают цифру младшего разряда делимого. Поскольку вычитание возможно, записывают цифру 1 в младшем разряде частного и вычитают. Остаток равен нулю, поэтому деление завершается.

Знак числа при записи его в машине кодируют цифрой впереди старшего разряда кода числа. Цифру 0 применяют для обозначения положительных чисел, цифру 1 — для обозначения отрицательных. Так, число $+7$ в двоичном коде имеет обозначение 0.111. Число -7 записывается в виде 1.111. Точка отделяет знаковый разряд от записи числа.

Для упрощения в выполнении операций над числами в двоичном коде вводят видоизмененные двоичные коды. Применяется, например, дополнительный код чисел. Отрицательное число в дополнительном коде записывают путем замены цифры 1 на цифру 0 и цифры 0 на цифру 1 в разрядах обычной его записи и добавляют единицу в младший разряд в новой записи. Цифра знакового разряда сохраняется. Представление чисел в дополнительном коде позволяет заменить действие вычитания двоичных чисел действием сложения, а деление выполнять путем последовательного выполнения операций сдвига делителя и сложения. Если требуется выполнить сложные вычисления, то их сводят к выполнению только арифметических действий. Поскольку все арифметические действия сводятся к осуществлению сложения чисел и выполнению сдвига, то все операции над числами сводятся к этим простейшим. Запись и сдвиг двоичных чисел производятся в узлах, называемых регистрами, а сложение — в сумматорах.

В процессе выполнения арифметических операций приходится сравнивать выраженные в двоичном коде числа, из двух чисел выбирать большее или меньшее, определять знаки чисел, устанавливать знаки произведений или частных от деления и производить другие логические операции. Для этого служат специальные устройства.

64. Логические основы действия цифровых устройств

Используемые в цифровых вычислительных машинах и других цифровых системах символы 0 и 1 называются *двоичными переменными*. Эти переменные отображаются соответственно напряжениями низкого и высокого уровня. Прием, преобразование, хранение и выдача информации в двоичном коде осуществляются в цифровых устройствах в виде электронных цепей, имеющих входные зажимы (входы) и выходные (выходы). В процессе приема информации, ее преобразования и выдачи на входы цифровых устройств подают напряжения низкого или высокого уровня. На их выходах имеются напряжения низкого или высокого уровня,

причем состояния выходов зависят от состояния входов. Это общее свойство цифровых устройств позволило назвать их *цифровыми автоматами*.

Цифровые автоматы подразделяют на *комбинационные* и *последовательностные*. В комбинационных устройствах состояния выходов — напряжения низкого или высокого уровня на каждом из них — определяются только состояниями их входов — напряжениями низкого или высокого уровня на них. Предшествующие состояния автомата роли не играют. Можно говорить о том, что в комбинационных устройствах двоичные переменные на выходах y_1, y_2, \dots, y_m зависят только от двоичных переменных x_1, x_2, \dots, x_n на их входах.

В последовательностных цифровых устройствах состояния выходов, выражаемые набором двоичных переменных y_1, y_2, \dots, y_m , определяются не только набором переменных x_1, x_2, \dots, x_n на их входах, но и предшествующими состояниями цифрового автомата; зависят от того, какие напряжения были на выходах цифрового автомата до теперешней установки напряжений на его входе. Эти устройства напоминают предшествующие состояния. Поэтому их называют *цифровыми автоматами с памятью*.

Работают цифровые автоматы по определенным законам и правилам. Эти законы и правила отражены математическим аппаратом алгебры логики. Она была разработана английским математиком Джорджем Булем (1815—1864) и по его имени получила название булевой алгебры.

Алгебра логики имеет дело с двумя переменными. Одна из них — 0, вторая — 1. Для этих двоичных переменных существуют логические, или булевы функции. Функции могут приобретать только значения 0 или 1. Логические функции задают алгебраическими выражениями, таблицами (таблицами истинности) или описывают словами. Значения логических функций определяют в результате выполнения логических операций над логическими переменными, или над аргументами этих функций. Характер логических функций, их количество, законы и правила, которым они подчиняются, существенно отличаются от известных из обычной алгебры. Переменные алгебры логики 0 и 1 не являются цифрами 0 и 1. И в то же время между этими переменными и названными цифрами имеется определенное соответствие. Это позволяет действующие по законам алгебры логики цифровые автоматы и системы на их базе применять для выполнения арифметических действий над числами в двоичном коде.

Для двух переменных алгебры логики возможно существование 16 логических функций. Простейших функций три: *отрицание* (инверсия, или операция НЕ), *логическое умножение* (конъюнкция, или операция И) и *логическое сложение* (дизъюнкция, или операция ИЛИ). При помощи этих трех простейших функций можно выразить все другие.

65. Простейшие функции алгебры логики

Операция НЕ (отрицание, инверсия) выполняется над одной переменной по правилу: при аргументе $x=0$ функция $y=1$, если $x=1$, то $y=0$. Отрицание обозначается чертой над переменной, являющейся аргументом функции: $y=\bar{x}$. Функцию НЕ можно задать и таблицей.

x	$y = \bar{x}$
0	1
1	0

Операция И (конъюнкция, или логическое умножение) для двух переменных имеет обозначение: $y=x_1 \cdot x_2$. В зависимости от значения переменных выполнение ее приводит к результатам: $0 \cdot 0=0$; $1 \cdot 0=0$; $0 \cdot 1=0$; $1 \cdot 1=1$. Значения переменных и функции отражает таблица.

x_1	x_2	$y = x_1 \cdot x_2$
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Нулевое значение хотя бы одного из аргументов определяет нулевое значение функции. Операцию конъюнкции можно распространить на любое число переменных.

Операция ИЛИ (дизъюнкция или логическое сложение) для двух переменных записывается в форме: $y=x_1 \vee x_2$. Ее результаты ($0 \vee 0=0$, $1 \vee 0=1$, $0 \vee 1=1$, $1 \vee 1=1$) показаны в таблице.

x	x	$y = x_1 \vee x_2$
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Равенство единице хотя бы одного из аргументов обеспечивает единичное значение функции ИЛИ. Равенство $1 \vee 1=1$ не имеет аналога в двоичной арифметике, где $1+1=10$.

Кроме этих трех простейших логических функций, часто приходится использовать еще три более сложные. Это логические функции И — НЕ (штрих Шеффера), ИЛИ — НЕ (стрелка Пирса) и Исключающее ИЛИ (неравнозначность, или сумма по модулю 2).

Логическая функция И — НЕ осуществляется в результате

выполнения операции И ($y' = x_1 \cdot x_2$), а затем операции НЕ ($y = \overline{y'} = \overline{x_1 \cdot x_2}$). Ее значение дано в таблице.

x_1	x_2	$y' = x_1 \cdot x_2$	$y = \overline{y'} = \overline{x_1 \cdot x_2}$
0	0	0	1
1	0	0	1
0	1	0	1
1	1	1	0

Логическая функция ИЛИ — НЕ реализуется в ходе операции ИЛИ ($y' = x_1 \vee x_2$) и последующей операции НЕ ($y = \overline{y'} = \overline{x_1 \vee x_2}$). Результаты операции сведены в таблицу.

x_1	x_2	$y' = x_1 \vee x_2$	$y = \overline{y'} = \overline{x_1 \vee x_2}$
0	0	0	1
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	1	1

Функцию Исключающее ИЛИ записывают в виде: $y = x_1 \oplus x_2$. Значение ее является нулевым ($y = 0$), если аргументы функции одинаковы ($x_1 = x_2 = 0$ или $x_1 = x_2 = 1$), и единичным — когда они неравнозначны ($x_1 \neq x_2$). Значения функции даны в таблице.

x_1	x_2	$y = x_1 \oplus x_2$
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Значения функции $y = x_1 \oplus x_2$ аналогичны значениям функции $y = x_1 \oplus x_2$ для всех значений аргументов, за исключением случая, когда $x_1 = x_2 = 1 : 1 \oplus 1 = 0$, $1 \vee 1 = 1$. В результате выполнения операции Исключающее ИЛИ может быть определена цифра младшего разряда суммы двух одноразрядных чисел.

Получаемые выражения определяют варианты выполнения заданной сложной функции путем последовательного выполнения других логических функций.

66. Логические элементы НЕ, И, ИЛИ

Выполнение логических функций реализуют в радиоэлектронных цепях, называемых *логическими элементами*. Они различаются по характеру выполняемых функций, числу входов и выходов и другим показателям. Практическое выполнение логического элемента одного и того же назначения может быть различным.

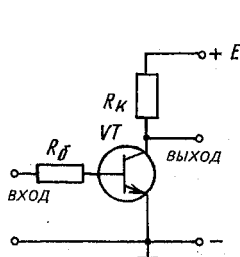


Рис. 129. Простейший элемент НЕ

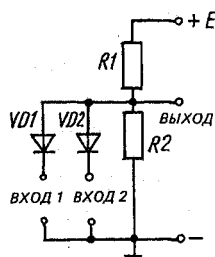


Рис. 130. Элемент И на диодах

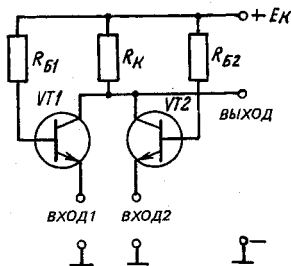


Рис. 131. Элемент И на транзисторах

В качестве элемента НЕ может быть использован транзисторный ключ (рис. 129). Предположим, что для создания тока в цепи коллектора на переход база — эмиттер транзистора необходимо подать напряжение, превышающее 0,6 В. При низком относительно общего провода потенциале входа ($u_{вх} < 0,4$ В) или соединении входного зажима с общим проводом цепи (логический нуль на входе) ток в цепи коллектора практически отсутствует. Падения напряжения на резисторе $R_к$ нет, на выходе устанавливается напряжение, близкое к напряжению питания (логическая единица). Напряжение высокого уровня на входе ($u_{вх} \geq 2,4$ В), соответствующее логической единице, вызывает ток базы, достаточный для перехода транзистора в режим насыщения. Коллекторное напряжение снижается, на выходе устанавливается состояние логического нуля.

Элемент И с двумя входами может быть выполнен в виде цепи, содержащей два диода и резистор (рис. 130). К цепи подводят напряжение питания E , предположим, стандартное ($E = 5$ В). При соединении входов с общим проводом цепи по резистору через диоды в прямом направлении будет протекать ток. Напряжение на выходе элемента будет равно напряжению на открытых диодах, т. е. окажется низким. Отключив один из диодов от общей цепи или подав на один из входов напряжение высокого уровня, можно предотвратить прохождение тока через один из диодов. Через второй диод ток по-прежнему будет проходить, и состоянию выхода будет соответствовать логический нуль.

Если подать напряжение высокого уровня на все входы цепи или отсоединить их от общей точки цепи, ток через диоды протекать не будет, уровень напряжения на выходе цепи будет высоким (логическая единица на выходе). Цепь выполняет логическую операцию И.

Для образования элемента И можно применить транзисторы. Рассмотрим цепь, содержащую два одинаковых транзистора с объединенными коллекторами и включенным последовательно с транзисторами резистором $R_к$ (рис. 131). Базы соединены с положительным полюсом источника питания через резисторы $R_{Б1}$, $R_{Б2}$. Входные напряжения образованного элемента — это

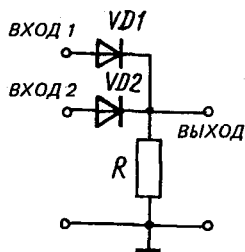


Рис. 132. Элемент ИЛИ на диодах

напряжения между эмиттерами транзисторов и общим проводом.

Сигналом логического нуля на входах соответствует соединение эмиттеров с общим проводом или подача на входы напряжений не выше 0,4 В. При низких потенциалах входов через транзисторы будут протекать токи. Сопротивления резисторов R_{61} , R_{62} выбирают такими, чтобы в транзисторах был реализован режим насыщения. Следовательно, в этом случае напряжение на транзисторах окажется очень малым и потенциал выхода элемента окажется низким. Если отключить один из эмиттеров от общего провода или подать на один из входов напряжение высокого уровня при соединении второго входа с общим проводом, то прекратится ток только одного транзистора. Второй транзистор будет находиться в режиме насыщения, и выходное напряжение элемента будет соответствовать логическому нулю. Высокий уровень выходного напряжения возникнет при размыкании цепей обоих транзисторов или при подаче на оба входа элемента напряжений высокого уровня.

Элемент ИЛИ можно построить в виде цепи, включающей два диода и резистор (рис. 132). Если на входы цепи не будет подано напряжение, ток по резистору протекать не будет и напряжение на нем будет равно нулю. При входном напряжении не более 0,4 В напряжение на выходе элемента окажется меньше входного. На выходе элемента установится состояние логического нуля. Подав на один из входов или на оба входа цепи напряжение, превосходящее 2,4 В, получим на выходе цепи примерно такое же напряжение. Если состояниям первого или второго или одновременно первого и второго входов соответствует логическая единица, то состоянию выхода ее также соответствует логическая единица. Цепь выполняет логическую операцию ИЛИ.

67. Логические элементы И — НЕ, ИЛИ — НЕ

Сложный элемент И — НЕ с двумя входами (логический элемент 2И — НЕ) может быть образован, если соединить выход элемента 2И на диодах или транзисторах со входом элемента НЕ в виде электронного ключа.

Двухвходовый логический элемент ИЛИ — НЕ (обозначение 2ИЛИ — НЕ) можно создать, если установить два транзисторных ключа, объединив коллекторы транзисторов (рис. 133). Входное напряжение низкого уровня или соединение входов с общим проводом коллекторный ток не вызовет. Выходное напряжение окажется высоким, соответствующим логической единице. Если на один из входов или на оба входа одновременно подать напряжение более 2,4 В, произойдет насыщение соответственно одного или двух транзисторов одновременно и напряжение

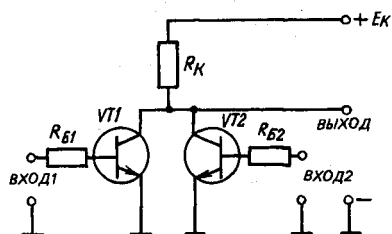


Рис. 133. Элемент 2ИЛИ — НЕ на биполярных транзисторах

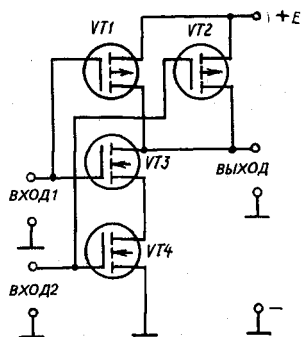
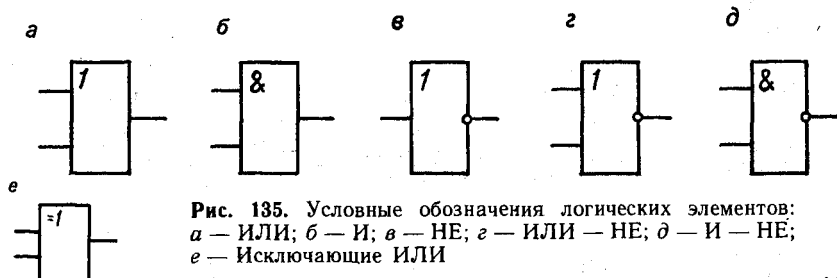


Рис. 134. Элемент 2И — НЕ на комплементарных МДП-транзисторах

на выходе станет близким к нулю. На выходе логического элемента установится состояние логического нуля.

Очень просто могут быть образованы логические элементы И — НЕ, ИЛИ — НЕ на комплементарных МДП-транзисторах, т. е. на транзисторах с каналом с проводимостью p -типа в одном из них и каналом n -типа — в другом. Элемент 2И — НЕ представляет в этом случае цепь с последовательным включением двух пар комплементарных транзисторов (рис. 134). В транзисторах $VT1$, $VT2$ образуются индуцированные каналы p -типа, в транзисторах $VT3$, $VT4$ — каналы n -типа.

Если на вход 1 элемента подать напряжение низкого уровня, то транзистор $VT1$ будет открыт, а транзистор $VT3$ — закрыт. Выход логического элемента окажется соединенным с положительным полюсом источника питания через открытый транзистор $VT1$ и отключенным от общего провода закрытым транзистором $VT3$. Такое состояние цепи будет сохраняться независимо от напряжения на входе 2. Если это напряжение окажется низким, то будет открыт транзистор $VT2$ и закрыт транзистор $VT4$. Соединится выход с положительным полюсом источника питания через два открытых транзистора — $VT1$ и $VT2$, а последовательно с закры-



тым транзистором $VT3$ окажется включенным и закрытый транзистор $VT4$. Если напряжение на входе 2 окажется высоким, то транзистор $VT2$ окажется закрытым, а транзистор $VT4$ — открытым. Выход будет соединен с положительным полюсом источника питания через открытый транзистор $VT1$, соединения же выхода с общим проводом не будет, так как закрытым является транзистор $VT3$.

На выходе элемента установится напряжение низкого уровня только в том случае, если открыты будут и транзистор $VT3$, и транзистор $VT4$, а транзисторы $VT1$ и $VT2$ будут находиться в закрытом состоянии. Чтобы наступило такое состояние, напряжения высокого уровня должны быть установлены на обоих входах логического элемента.

На структурных схемах логические элементы обозначают прямоугольниками (рис. 135). Слева указывают входы, справа — выходы элемента. Знак отрицания (инверсии) на выходе или входе элемента отражают кружочком небольшого диаметра. Внутри обозначения элемента в верхней его части ставят символ логической функции элемента.

Логические элементы, собираемые из отдельных компонентов радиоэлектронной цепи, в настоящее время применяют редко. Предпочитают применять готовые логические элементы интегрального исполнения. Они имеют малые размеры, низкую стоимость, в них обеспечивается усиление сигналов и получение достаточной выходной мощности. В настоящее время наиболее распространены элементы транзисторно-транзисторной логики (сокращенно ТТЛ), эмиттерно-связанной логики транзисторной логики (ЭСТЛ), на комплементарных транзисторах (КМДП или КМОП). Многие устройства цифровой техники строят на элементах типа ТТЛ микросхем серии К155, на элементах типа КМДП серий К176, К561. В простейших устройствах часто применяют микро-

схему К155ЛА3. Она включает четыре одинаковых элемента 2И — НЕ. Напряжение питания стандартное — 5 В. Отрицательный полюс источника питания соединяется с 7-м выводом, являющимся общим выводом (общим проводом) всех логических элементов микросхемы, положительный полюс — с выводом 14. Номера выводов от входов элементов микросхемы и выходов ее указаны на рис. 136.

Схемы соединений логических элементов разрабатывают на основании алгебраических выражений, которые записывают и преобразуют в соответствии с законами и правилами алгебры логики. В качестве примера даны схемы (рис. 137) соединений элементов 2И — НЕ для образования элементов НЕ, 2И, 2ИЛИ и организации элемента.

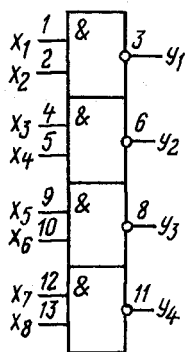
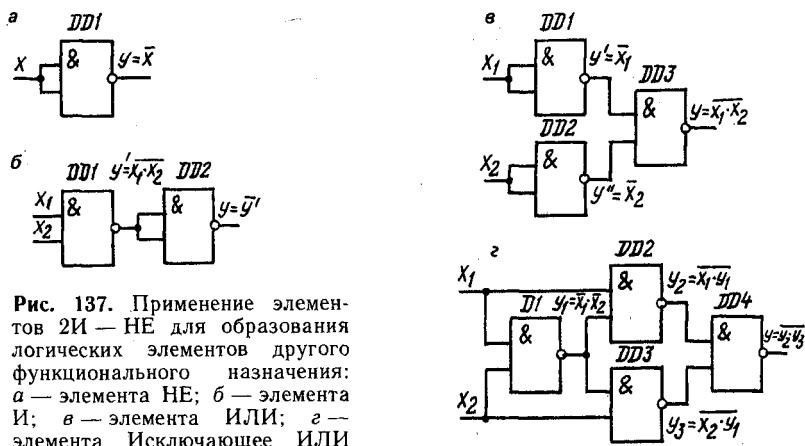


Рис. 136. Микросхема К155ЛА3



Исключающее ИЛИ. Правильность функционирования образованных логических элементов можно проверить. Для этого на их входы следует подавать сигналы 0 и 1 и последовательно определять состояния выходов элементов.

68. Комбинационные устройства

В комбинационных устройствах состояния выходов определяют только состояниями их входов, предшествующие состояния устройства роли не играют. К ним относятся преобразователи кодов, в которых комбинация логических нулей и единиц, или двоичных переменных на входе, однозначно определяет комбинацию состояний выхода.

Преобразователем кодов является *шифратор*. Когда в шифраторе на одном из его входов появляется логическая единица, то в зависимости от номера входа устанавливаются определенные состояния его выходов. Это шифр данного входа, выражаемый набором логических нулей и единиц. В вычислительных машинах шифратор, записывающий цифры десятичной системы счисления в виде четырехзначного двоичного числа, содержит десять входов (для цифр 0, 1, 2, ..., 9) и четыре выхода. При нажатии клавиши 0 на выходе появляется ее код — 0000. Цифре 1 соответствует код 0001, цифре 2 — код 0010, ..., цифре 9 — код 1001. Состояния каждого из десяти входов шифратора при нажатии соответствующей клавиши и состояния устанавливающихся при этом состояний выходов даны в таблице.

Входы										Выходы			
x_9	x_8	x_7	x_6	x_5	x_4	x_3	x_2	x_1	x_0	y_3	y_2	y_1	y_0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Необходимый для сборки шифратора набор логических элементов может быть установлен на основе анализа данной таблицы. Из нее видно, что состояние $y_0 = 1$ устанавливается при нажатии любой из нечетных клавиш, т. е. при состоянии 1 любой из клавиш x_1, x_3, x_5, x_7 или x_9 , состояние $y_1 = 1$ — при нажатии клавиш $x_2, x_3, x_6, x_7, y_2 = 1$ — клавиш x_4, x_5, x_6 или $x_7, y_3 = 1$ — клавиш x_8 или x_9 . Известно, что в логическом элементе ИЛИ состояние $y = 1$ устанавливается при появлении логической единицы на любом его входе. Следовательно, шифратор можно образовать на базе четырех элементов ИЛИ. Один из них должен быть пятиходовым, два — четырехходовыми и один — с одним входом. Соединения входов с идущими от клавиш проводами выполняют по схеме рис. 138.

Из схемы видно, что нажатие на клавишу с номером 7 вызовет подачу напряжения высокого уровня на один из входов элементов $DD1, DD2, DD3$. Установятся состояния $y_0 = 1, y_1 = 1, y_2 = 1, y_3 = 0$, будет получена комбинация нулей и единиц 0111, которая является числом 7, выраженным в двоичном коде.

Другим часто применяемым комбинационным устройством является *дешифратор*. В нем заданный набор двоичных переменных на входе вызывает появление напряжения высокого уровня на одном из его выходов. Номер выхода определяется набором входных переменных в виде нулей и единиц. Каждый выход имеет свой набор переменных — шифр. Дешифратор разгадывает этот шифр, определяет, к какому выходу он относится.

Наиболее простые дешифраторы — с одним входом и двумя выходами и с двумя входами и четырьмя выходами. Дешифратор с двумя входами и четырьмя выходами можно образовать на базе двух инверторов и четырех двухходовых элементов И (рис. 139). При наличии двух переменных x_0 и x_1 , которые поступают на вход дешифратора, инверторы позволяют иметь еще две — \bar{x}_0 и \bar{x}_1 . Из четырех переменных $x_0, x_1, \bar{x}_0, \bar{x}_1$ можно образовать четыре их комбинации по две в каждой: x_0 и x_1, x_0 и \bar{x}_1, \bar{x}_0 и x_1, \bar{x}_0 и \bar{x}_1 . Эти комбинации переменных поступают на входы элементов И. В за-

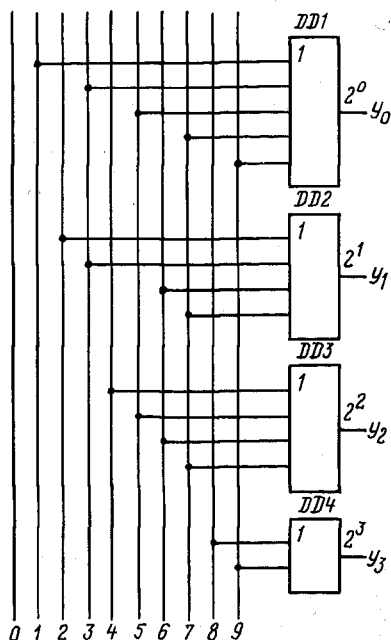


Рис. 138. Структурная схема шифратора

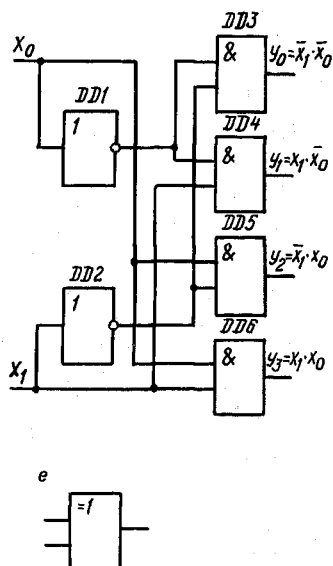


Рис. 139. Структура дешифратора

висимости от значений переменных x_0 и x_1 на обоих входах одного из логических элементов 2И — НЕ устанавливаются состояния логической единицы. На выходе этого элемента появляется напряжение высокого уровня. Значения переменных x_0 и x_1 , уровни сигналов на входах элементов 2И — НЕ и состояния выходов даны в таблице.

Входы		Выходы			
x_1	x_0	$y_3 = x_1 \cdot x_0$	$y_2 = x_1 \cdot \bar{x}_0$	$y_1 = \bar{x}_1 \cdot x_0$	$y_0 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_0$
0	0	$0 \cdot 0 = 0$	$0 \cdot 1 = 0$	$1 \cdot 0 = 0$	$1 \cdot 1 = 1$
0	1	$0 \cdot 1 = 0$	$0 \cdot 0 = 0$	$1 \cdot 1 = 1$	$1 \cdot 0 = 0$
1	0	$1 \cdot 0 = 0$	$1 \cdot 1 = 1$	$0 \cdot 0 = 0$	$0 \cdot 1 = 0$
1	1	$1 \cdot 1 = 1$	$1 \cdot 0 = 0$	$1 \cdot 1 = 0$	$0 \cdot 0 = 0$

Дешифраторы изготавливают в виде законченных изделий, представляющих собой интегральные микросхемы. Они имеются во всех сериях микросхем типа ТТЛ и КМДП. Микросхемы К514ИД1, К514ИД2 (рис. 140, а) предназначены для преобразования кода цифр 0, 1, 2, ... 9 в виде четырехразрядных двоичных чисел в набор из семи цифр двоичного кода. Выходные сигналы дешифратора

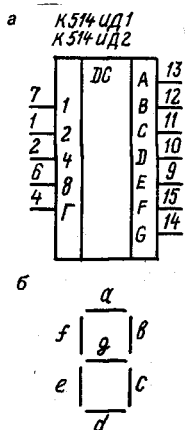


Рис. 140. Управление семисегментным индикатором: а — микросхема К155ИД1; б — расположение сегментов индикатора

используются для управления свечением семи-сегментных светодиодных или жидкокристаллических цифровых индикаторов. Сегменты индикаторов (рис. 140, б) расположены так, что в зависимости от сочетания светящихся элементов появляются определенные цифры десятичной системы счисления. Например, при высвечивании элементов б и с образуется изображение единицы. Если высвечиваются все сегменты, за исключением сегмента г, получается изображение нуля. Входы микросхемы, начиная с младшего разряда двоичного кода, имеют обозначения 1, 2, 4, 8; выходы маркируют буквами а, б ... ф. Буквы указывают, к каким выводам цифрового индикатора они должны быть присоединены. Выдача двоичного кода на выход микросхемы является управляемой. Для этого имеется дополнительный вход, обозначенный буквой Г. Когда на вход Г подают напряжение высокого уровня ($\Gamma = 1$), происходит выдача сигналов дешифратора на выходные выводы микросхемы. В это время происходит высвечивание соответствующей цифры индикатора. При установке напряжения низкого уровня ($\Gamma = 0$) сигналы на выходы микросхемы не подаются и свечение сегментов индикатора прекращается.

В процессе приема и обработки информации приходится принимать ее от нескольких источников и поочередно направлять по одному и тому же каналу. Такую задачу решает комбинационное устройство, называемое *мультиплексором* (коллектором, собирателем). В мультиплексоре имеется несколько входов, на которые подается информация в виде напряжений низкого или высокого уровня, и один выход. Адрес входа, с которого в данный момент времени информация передается на выход, задается двоичным кодом адреса.

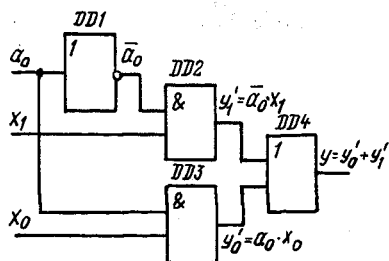


Рис. 141. Мультиплексор на два входа

Рассмотрим простейший мультиплексор (рис. 141) с двумя выходами (x_0, x_1) и одним адресным входом (a_0). Мультиплексор содержит инвертор — элемент НЕ, два элемента И и элемент ИЛИ. Наличие инвертора позволяет, кроме кода адреса a_0 , иметь также второй сигнал управления \bar{a}_0 . Состояния выходов элементов И и элемента ИЛИ определяются сигналом управления a_0 на адресном входе и сигналами на информационных входах. Так, при $a_0 = 0$

на выходах элементов И устанавливаются состояния $y_0' = 0 \cdot x_0 = 0$, $y_1' = 1 \cdot x_1 = x_1$, а на выходе элемента ИЛИ — состояние $y = y_0' + y_1' = 0 + x_1 = x_1$. На выход мультиплексора подается информация $y = x_1$. Когда $a_0 = 1$, то $y_0' = 1 \cdot x_0 = x_0$, $y_1' = 0 \cdot x_1 = 0$ и $y = y_0' + y_1' = x_0 + 0 = x_0$. На выход мультиплексора передается сигнал $y = x_0$.

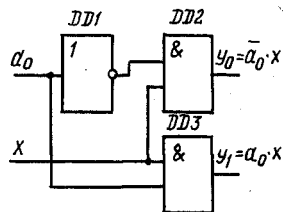


Рис. 142. Демultipлексор на два выхода

В устройствах цифровой техники приходится также поступающую по одному и тому же каналу информацию направлять по различным каналам, или адресам. Адрес канала задается двоичным кодом. Устройства такого распределения информации называют *демultipлексорами* (селекторами, коммутаторами). Простейший вариант демultipлексора (рис. 142) может быть образован из одного инвертора и двух элементов И. Первый адрес задается кодом $a_0 = 0$. Тогда $y_0 = 1 \cdot x = x$, $y_1 = 0 \cdot x = 0$. Информация передается на выход элемента $DD2$. Вторым является адрес $a_0 = 1$. Для него $y_0 = 0 \cdot x = 0$, $y_1 = 1 \cdot x = x$. Информация поступает на выход элемента $DD3$.

69. Сумматоры

Сумматор является устройством, предназначенным для арифметического сложения двух чисел в двоичном коде. Он относится к комбинационным устройствам — результат сложения определяется имеющимися на его входах в данный момент времени сигналами.

В процессе сложения двух многоразрядных двоичных чисел в каждом из его разрядов складываются две цифры и к полученному результату прибавляется цифра переноса из младшего разряда — суммируются три цифры. В результате определяется цифра в данном разряде суммы и цифра переноса в старший разряд.

Для суммирования только двух двоичных цифр применяется устройство, называемое *полусумматором*. В нем имеется два входа, на которые подаются соответствующие цифрам напряжения низкого или высокого уровня. Выходов также два. Состояние одного выхода определяет цифру суммы, состояние второго — цифру переноса. Для суммирования двух цифр без определения цифры переноса может быть применен элемент Иключающее ИЛИ. Состояния выходов его определяются равенствами: $0 \oplus 0 = 0$, $1 \oplus 0 = 1$, $0 \oplus 1 = 1$, $1 \oplus 1 = 0$. В первых трех случаях состояние выхода однозначно определяет результат сложения. В четвертом случае в результате сложения должно получиться $1 + 1 = 10$. Цифра 0 фиксируется, цифра переноса в старший разряд — 1 — в этом элементе не определяется.

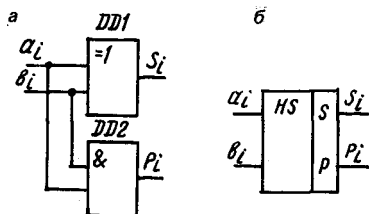


Рис. 143. Полусумматор: а — структура; б — условное обозначение

Чтобы построить одноразрядный полусумматор, необходимо элемент Иключающее ИЛИ дополнить устройством для фиксирования цифры переноса. Это может быть элемент И, для которого $1 \cdot 1 = 1$. Он включается так (рис. 143), что на его выходе появляется переменная 1, если обе цифры слагаемых в данном разряде равны единице. При других сочетаниях входных сигналов на его выходе устанавливается логический нуль, что равнозначно цифре 0.

Определить цифру данного разряда суммы с учетом цифры переноса из младшего разряда можно, если полученный уже результат суммирования двух цифр данного разряда слагаемых сложить с цифрой переноса из младшего разряда. Для проведения этого повторного сложения понадобится второй полусумматор, выполненный аналогично первому. Необходимо предусмотреть также появление цифры переноса как на первом, так и на втором этапе выполнения операции сложения. Для этого нужно включить на выходах полусумматоров элемент ИЛИ (рис. 144, а). На выходе его появится цифра переноса, если она возникнет в результате суммирования цифр слагаемых или в результате сложения полученной суммы цифр и цифры переноса из младшего разряда. Рассмотренное устройство является одноразрядным сумматором. Оно содержит три входа и два выхода (рис. 144, б).

Складывают многоразрядные двоичные числа в многоразрядном сумматоре, состоящем из одноразрядных сумматоров. Число их должно быть равным числу разрядов слагаемых.

Серия К155 микросхем содержит три сумматора: К155ИМ1 —

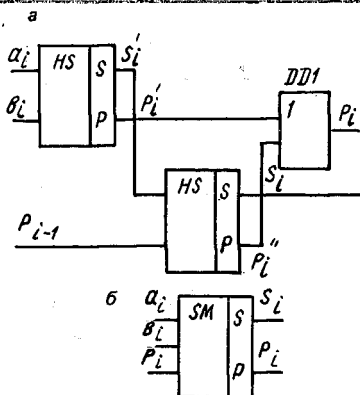


Рис. 144. Одноразрядный сумматор: а — структура; б — условное обозначение

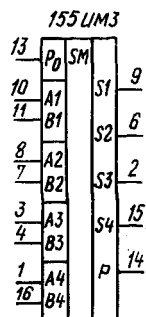


Рис. 145. Микросхема К155ИМ3

одноразрядный, К155ИМ2 — двухразрядный, К155ИМ3 — четырехразрядный. Четырехразрядный сумматор К155ИМ3 (рис. 145) имеет четыре пары входов ($A1B1$, $A2B2$, $A3B3$, $A4B4$) для подачи сигналов, соответствующих цифрам разрядов слагаемых, и ввод p_0 для подачи цифры переноса из разряда с номером на единицу меньшим номера разряда цифр на входах $A1B1$. На выходах $S1...S4$ появляются сигналы, определяющие цифры разрядов суммы, на выходе p — определяющие цифру переноса в старший разряд, в нашем случае под номером 5.

70. Триггеры

Триггеры являются последовательностными устройствами, т. е. цифровыми автоматами с памятью. Состояния выходов триггера определяются подаваемыми на его входы сигналами и предшествующими им состояниями. У триггера имеется два устойчивых состояния, в которых он может находиться сколько угодно долго. Триггеры применяются для хранения информации.

Наиболее простым триггером является асинхронный RS-триггер. Он содержит два входа — вход установки триггера S и вход переключения (переустановки) триггера R , а также два выхода — прямой выход, Q , состояние которого (0 или 1) соответствует напряжению на входе S (0 или 1), и инверсный выход \bar{Q} , состояние которого противоположно состоянию входа S . Триггер называется асинхронным, поскольку переходит в определяемое входными сигналами состояние мгновенно, как только эти сигналы появятся. RS-триггеры строят обычно на базе элементов И — НЕ, ИЛИ — НЕ путем введения обратных связей, т. е. выполнения соединений выходов элементов с их входами в определенном порядке.

Рассмотрим состояния выходов триггера на элементах ИЛИ — НЕ (рис. 146, а) в зависимости от сигналов на его входах. Как известно, в элементах ИЛИ — НЕ напряжение высокого уровня на одном из его входов вызывает появление напряжения низкого уровня на его выходе независимо от уровней напряжений на других его входах.

Установим состояния входов $S = 1$, $R = 0$. Выход триггера Q относится к элементу $DD2$. Поэтому установится состояние $Q = 0$. На обоих входах элемента $DD1$ будет состояние 0. На выходе его, являющемся прямым выходом триггера, установится состояние $Q = 1$.

Пусть $S = 0$, $R = 1$, тогда $Q = 0$. На обоих входах элемента $DD2$ будут низкие напряжения. Установится состояние его выхода $Q = 1$. Сигналы $S = 0$, $R = 0$ не меняют

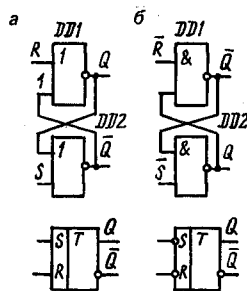


Рис. 146. Асинхронные RS-триггеры на элементах: а — ИЛИ — НЕ; б — И — НЕ

состояний выходов элементов $DD1$, $DD2$. Триггер не переключается. Если $S=1$, $R=1$, то $Q=0$, $\bar{Q}=0$. На обоих выходах имеются нулевые напряжения. Но тогда устройство не является триггером, так как у триггера состояния выходов Q и \bar{Q} должны быть противоположными. Установка состояний $S=1$, $R=1$ запрещена. Двоичные переменные на входах триггера и соответствующие им состояния выходов даны в таблице.

S	R	Q	\bar{Q}
1	0	1	0
0	1	0	1
0	0	Переключений нет, сохраняется прежнее состояние	
1	1		
Состояние неопределенное, запрет			

В RS -триггере на элементах И — НЕ (рис. 146, б) управляющим сигналом является напряжение низкого уровня (0). Поэтому входы R и S обозначают буквами с черточками, а на условных обозначениях триггера входы помечены знаками инверсии.

В элементах И — НЕ низкий потенциал входа однозначно определяет состояние выхода независимо от уровня напряжения на других входах. Поэтому при $\bar{S}=0$, $\bar{R}=1$ имеем $Q=1$, $\bar{Q}=0$. Когда $\bar{R}=0$, $\bar{S}=1$, то $Q=0$, $\bar{Q}=1$. Если $\bar{S}=0$, $\bar{R}=0$, то устанавливаются состояния выходов триггера $Q=1$, $\bar{Q}=1$. Подача сигналов $\bar{S}=0$, $\bar{R}=0$ запрещена. Сигналы $\bar{S}=1$, $\bar{R}=1$ переключений триггера не вызывают.

Асинхронные RS -триггеры — ограниченного применения. В устройствах вычислительной техники и автоматики больше распространены синхронные RS -триггеры. Переключение в них происходит под действием дополнительного сигнала синхронизации. Превращение асинхронных RS -триггеров в синхронные осуществляется включением на их входы дополнительных элементов соответственно ИЛИ — НЕ и И — НЕ.

Рассмотрим синхронный RS -триггер на элементах ИЛИ — НЕ (рис. 147, а). При наличии логической единицы на входе C на выходах дополнительных элементов $DD1$ и $DD2$, а следовательно, и на входах элементов $DD3$ и $DD4$, образующих асинхронный RS -триггер, появляются логические нули (0). Независимо от состояний входов R и S состояния выходов элементов $DD3$ и $DD4$ останутся теми же. Переключений триггера не будет. Если на вход C подать напряжение низкого уровня (0), состояния выходов элементов $DD1$ и $DD2$ будут определяться состояниями входов R и S и установятся определенные состояния выходов Q и \bar{Q} .

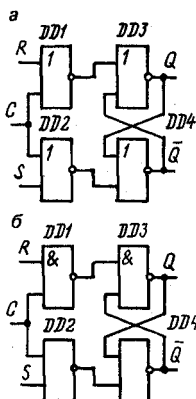


Рис. 147. Синхронные RS-триггеры на логических элементах: а — ИЛИ — НЕ; б — И — НЕ

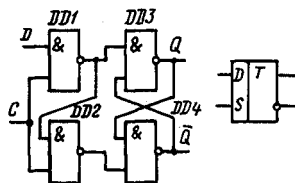


Рис. 148. D-триггер на элементах И — НЕ

Аналогичным образом можно описать состояния синхронного RS-триггера на элементах И — НЕ (рис. 147, б). Следует помнить, что сигнал, определяющий состояние элемента И, соответствует логическому нулю. При состоянии логического нуля (0) на входе C на выходах элементов DD1 и DD2 и входах элементов DD3 и DD4 будут состояния логической единицы (1), переключение RS-триггера на элементах DD3 и DD4 независимо от состояний входов R и S не произойдет. Переключения триггера возможны лишь при состоянии логической единицы (1) на входе C.

Разновидностью синхронного триггера является D-триггер, называемый триггером задержки. D-триггер на элементах И — НЕ (рис. 148) представляет собой RS-триггер (элементы DD3, DD4) и цепь из элементов DD1, DD2, формирующих управляющие сигналы. На вход D подается сигнал, который передается затем на выход триггера, а на вход C — сигнал синхронизации. Пока на входе C имеется напряжение низкого уровня (0), на выходах элементов DD1, DD2 и на входах элементов DD3, DD4 — напряжения высокого уровня (1) и независимо от состояния входа D состояния выходов Q и Q-bar остаются без изменения. Появление сигнала высокого уровня (1) на входе C обеспечивает установку выходов Q и Q-bar триггера в соответствии с состоянием входа D. Таким образом, передача сигнала со входа D этого триггера на его выход задерживается до появления сигнала синхронизации.

В рассмотренных синхронных RS- и D-триггерах переключения возможны во все время присутствия сигнала синхронизации. Эти триггеры получили название *статических*. Имеются *динамические* триггеры, в которых смена состояний выходов возможна только в течение короткого промежутка времени, в момент, когда происходит изменение сигнала синхронизации. В динамических триггерах сильно ограничиваются возможности переключений под действием случайных помех. Триггеры этого типа строят двухступенчатыми. Вначале происходит запись информации в

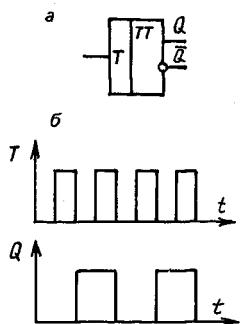


Рис. 149. Счетный триггер: *а* — обозначение; *б* — напряжения на входе и выходе триггера

первую ступень триггера, а в момент изменения уровня сигнала синхронизации — во вторую ступень.

К числу динамических двухступенчатых триггеров принадлежит универсальный *JK*-триггер. Он имеет два входа *J* и *K* для подачи управляющих сигналов и вход синхронизации *C*. Вход *J* соответствует входу *S*, а вход *K* — входу *R* рассмотренного ранее *RS*-триггера. Однако в отличие от *RS*-триггера появление напряжения высокого уровня одновременно на входе *J* и входе *K* изменяет состояние выходов *JK*-триггера на противоположное. Это свойство *JK*-триггера позволяет легко преобразовать его в триггеры других типов. Поэтому его называют универсальным.

Разновидностью двухступенчатых триггеров являются счетные триггеры, называемые также *T*-триггерами. Они могут быть построены на базе *RS*- *D*- или *JK*-триггеров. Счетный триггер имеет один вход (рис. 149, *а*). Поступающий на него импульс напряжения переключает триггер (рис. 149, *б*): первый импульс из состояния $Q=0$ в состояние $Q=1$, второй устанавливает состояние $Q=0$ и т. д.

71. Генераторы прямоугольных импульсов напряжения на логических элементах

Управляющими сигналами логических элементов и устройств являются напряжения низкого (менее 0,4 В) и высокого (более 2,4 В) уровня. Им соответствуют символы 0 и 1. Переходы от одного уровня напряжения к другому должны совершаться четко, за короткий промежуток времени и без каких-либо колебаний напряжения. Подавать управляющие напряжения на входы логических элементов при помощи обычных ключей нельзя. Причина — многократные повторения замыканий и размыканий цепи во время соединения контактов ключа, называемые «дребезгом контактов». Для ручного управления элементами применяют генератор одиночных перепадов напряжения, который, по существу, является *RS*-триггером (рис. 150). Первое же соприкосновение контактов ключа устанавливает триггер в состояние $Q=0$, $\bar{Q}=1$. Возникающие в дальнейшем разрывы в контактах ключа равносильны подаче на вход *R*-триггера сигнала логической единицы. Поскольку вход *S*-триггера в это время от общего провода отключен, то нарушение контакта соответствует подаче на оба входа сигналов логической единицы; триггер не переключается. Перепад напряжения на выходе его является единственным в момент первого соприкосновения контактов ключа.

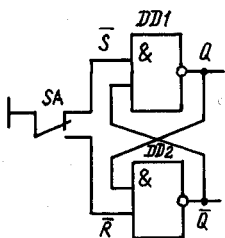


Рис. 150. Генератор одиночных перепадов напряжения

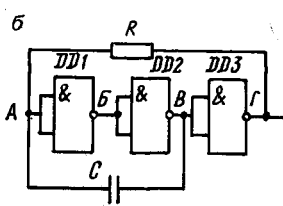
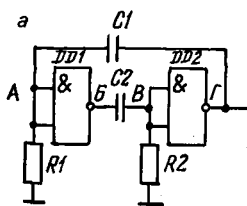


Рис. 151. Генератор прямоугольных импульсов с времязадающими RC -цепями: а — с двумя; б — с одной

Множественно повторяемые перепады напряжений реализуют в специальных *генераторах прямоугольных импульсов*. Можно построить генератор импульсов на двух инверторах (рис. 151, а). В нем повторяются процессы зарядки и разрядки конденсатора, как в мультивибраторе. Предположим, что в момент подачи напряжения питания устанавливается высокий потенциал точки Г и конденсаторы не заряжены. Поэтому начинается процесс зарядки конденсатора $C1$. Ток зарядки течет по резистору $R1$, на нем создается падение напряжения; потенциал точки А является высоким. На выходе элемента $DD1$ устанавливается напряжение низкого уровня. По мере зарядки конденсатора потенциал точки А понижается, а при определенном его значении происходит переключение инвертора $DD1$; устанавливается высокий потенциал точки Б. Поскольку конденсатор $C2$ не заряжен, напряжение с выхода элемента $DD1$ передается на вход инвертора $DD2$ и устанавливается низкий потенциал точки Г. С течением времени конденсатор $C1$ разряжается, а конденсатор $C2$ заряжается. Через некоторое время переключение инверторов повторяется.

Смена состояний выходов инверторов повторяется через определенные промежутки времени, которые зависят от постоянных времени R_1C_1 и R_2C_2 цепей зарядки.

Можно образовать генератор прямоугольных импульсов напряжения на элементах НЕ с одной только времязадающей цепью (рис. 151, б). Генератор содержит три элемента НЕ. Выход элемента $DD3$ (точка Г) через резистор соединен со входом первого элемента (точка А), а выход второго элемента (точка Б) через конденсатор C — со входом первого (точка А). Предположим, что в момент подключения источника питания устанавливается высокий потенциал точки Г и низкий потенциал точки А. В этом случае конденсатор будет заряжаться через резистор и выходную цепь элемента $DD2$. Через некоторый промежуток времени произойдет повышение потенциала точки А и переключение элементов $DD1$ — $DD3$. Потенциал точки Б станет высоким, а потенциал точки Г — низким. Конденсатор начнет разряжаться через резистор R и выходную цепь элемента $DD3$. Через определенный про-

межутков времени потенциал точки *A* понизится, опять произойдет переключение элементов.

В рассмотренных генераторах импульсов в случае применения элементов транзисторно-транзисторной логики сопротивления резисторов не могут быть более 2 кОм. Поэтому для обеспечения длительности импульсов в десятые доли секунды или больше, необходимо устанавливать конденсаторы емкостью в сотни микрофарад. Чтобы емкости конденсаторов были меньше, применяют видоизмененные схемы генераторов. Одной из них является схема с электронным ключом на входе первого инвертора (рис. 152). Здесь устанавливают только один конденсатор.

Предположим, что в момент включения источника питания потенциал точки *B* является низким, а потенциал точки *A* — высоким. Между этими точками включена цепь *R1CR2*. Конденсатор будет заряжаться. Одновременно будет повышаться потенциал соединенной с обкладкой конденсатора базы транзистора. Через некоторый промежуток времени появится ток базы и транзистор окажется открытым. Через транзистор точка *A* будет соединена с общим проводом цепи. Потенциал точки *B* станет высоким, а точки *A* — низким.

Конденсатор начнет разряжаться через переход база — эмиттер транзистора, источник питания, внутреннюю цепь элемента *DD1* и резистор *R2*. После разрядки конденсатора ток в указанной цепи не прекратится, так как будет заряжаться конденсатор. Но теперь будет повышаться потенциал пластины, соединенной через резистор *R2* с точкой *B*. Происходить это будет до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не станет близким к напряжению питания. Когда перезарядка конденсатора прекратится, ток в цепи базы течь не будет. Транзистор окажется в запертом состоянии, точка *A* с общим проводом соединяться не будет, что будет соответствовать сигналу логической единицы на входе элемента *DD1*.

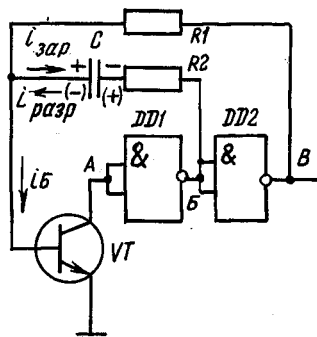


Рис. 152. Генератор импульсов с транзисторным ключом на входе инвертора

Начнется процесс разрядки конденсатора. Но теперь ток разрядки будет идти по резистору *R2*, внутренней цепи элемента *DD1*, источнику питания, внутренней цепи элемента *DD2* и резистору *R1*. Это направление тока совпадает с первоначальным после включения источника. Через некоторое время начнется перезарядка конденсатора и повышение потенциала базы.

Резистор *R1* включен в цепь базы транзистора. Он может иметь сопротивление в десятки килоом и больше. Для получения импульсов с периодом повторения в десятые доли секунды можно установить конденсатор емкостью в единицы нанофарад.

72. Регистры

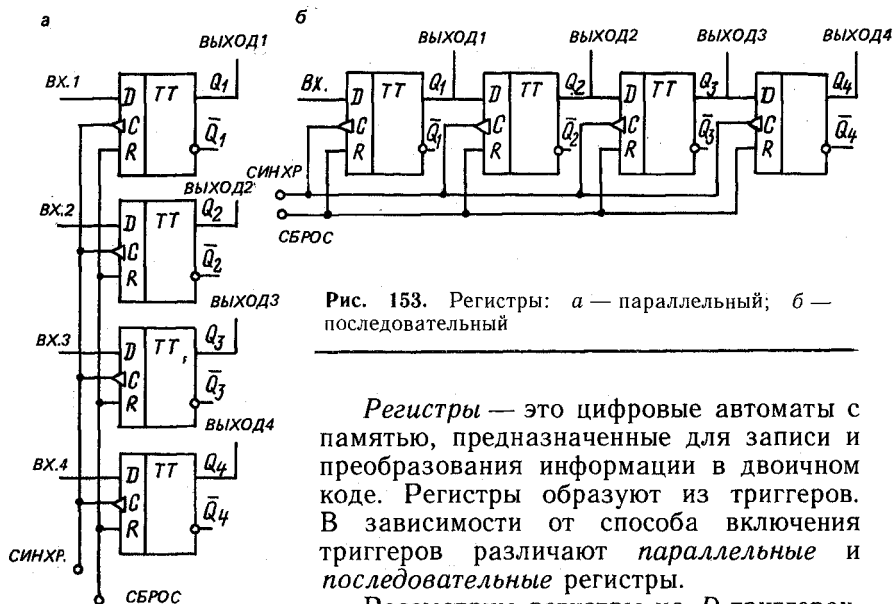


Рис. 153. Регистры: а — параллельный; б — последовательный

Регистры — это цифровые автоматы с памятью, предназначенные для записи и преобразования информации в двоичном коде. Регистры образуют из триггеров. В зависимости от способа включения триггеров различают *параллельные* и *последовательные* регистры.

Рассмотрим регистры на D-триггерах. В параллельном регистре (рис. 153, а) информация в виде напряжений соответственно низкого или высокого уровней

подается на входы всех триггеров. Триггеры приводятся в действие путем подачи импульса синхронизации. Переключение триггеров, т. е. запись информации, производится во всех триггерах одновременно.

В последовательном регистре (рис. 153, б) выход первого триггера соединяется со входом второго, выход второго — со входом третьего и т. д. Информация извне поступает только на вход первого триггера. Импульсы синхронизации подаются на все триггеры одновременно. Первый импульс записи обеспечивает передачу информации со входа первого триггера на его выход, а следовательно, на вход второго триггера. После этого информация на входе первого триггера может быть изменена. Второй импульс синхронизации вызывает передачу информации со входа второго триггера на его выход и поступление новой информации на вход первого триггера. Последующий импульс синхронизации вызовет сдвиг информации еще на один шаг вправо. В связи с таким смещением информации последовательный регистр называют *сдвигающим*. Сдвигать информацию можно вправо или влево.

Интегральная технология позволяет образовывать регистры в виде интегральных микро-

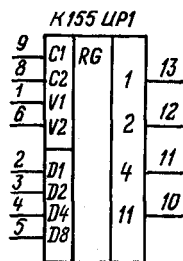


Рис. 154. Микросхема К155УР1

схем. Микросхема К155ИР1 (рис. 154) является универсальным четырехразрядным сдвиговым регистром. Она может быть применена как последовательный или параллельный регистр. Вход $V1$ предназначен для ввода информации в последовательном коде, а четыре входа $D1...D8$ — для записи информации в параллельном коде. На управляющий вход $V2$ подают сигналы выбора режима записи. Напряжение низкого уровня на нем позволяет образовать последовательный регистр. Сдвигается информация под действием импульсов синхронизации на входе $C1$. Чтобы регистр превратить в параллельный, на вход $V2$ подают напряжение высокого уровня. Записывается информация при подаче импульсов напряжения на вход $C2$.

73. Счетчики

Счетчиком называется цифровое устройство, осуществляющее счет входных импульсов и фиксирующее результат счета. Счетчики строят на основе триггеров.

Простейший двоичный счетчик импульсов можно образовать, если последовательно соединить счетные триггеры (рис. 155, а). Триггеры являются двухступенчатыми. Каждый триггер имеет вход R для установки прямого выхода Q в состояние 0. Эти входы

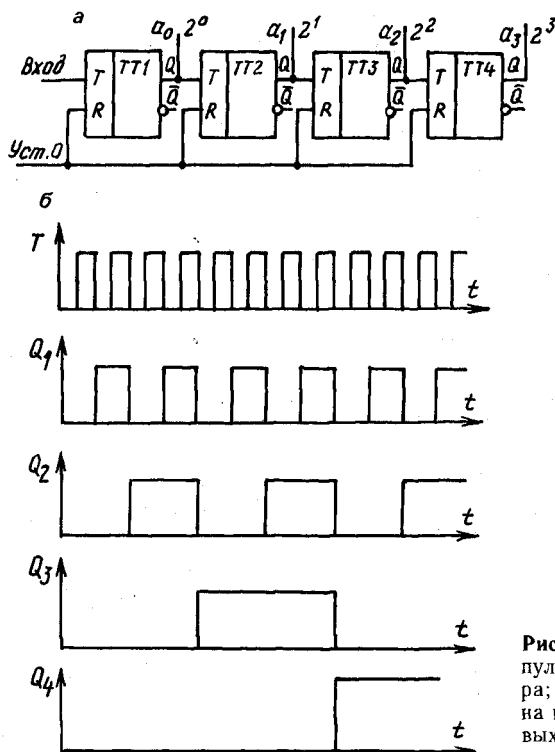


Рис. 155. Счетчик импульсов: а — структура; б — напряжения на входе счетчика и на выходах триггеров

объединены. Сигнал установки нуля (сброса показаний) одновременно переводит все триггеры в состояние 0, во всех разрядах счетчика появляются нули.

Импульсы напряжения поступают на вход первого триггера. В момент окончания первого импульса переключается первый триггер, на его выходе появляется сигнал логической единицы, или напряжение высокого уровня. Этот сигнал является входным для второго триггера. Затем на вход счетчика поступает второй импульс напряжений. Когда напряжение на входе убывает до нуля, переключается первый триггер и на его выходе устанавливается состояние 0. В этот момент времени на выходе второго триггера устанавливается состояние 1. Изменения напряжений на входе счетчика и на выходах триггеров представлены на временной диаграмме (рис. 155,б). Состояние выходов каждого из триггеров, или выхода счетчика, в зависимости от числа поступивших на вход счетчика импульсов отражает таблица:

Число импульсов	a_3	a_2	a_1	a_0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

Число возможных состояний счетчика N определяется числом триггеров n : $N=2^n$. В нашем случае $n=4$, поэтому $N=16$; 16-й импульс на входе счетчика установит все его триггеры в состояние 0 — счетчик переполнится, 17-й импульс будет зафиксирован как первый.

Путем образования обратных связей можно построить счетчик, в котором счет будет заканчиваться после 10-го, 12-го и т. д. импульсов. Во многих счетчиках интегрального исполнения такие связи создаются в процессе их изготовления.

Рассмотренный нами счетчик является суммирующим. Двоичное число, выражаемое напряжениями на выходах счетчика, увеличивается на единицу в результате появления очередного импульса напряжения на его входе. Если соединить триггеры

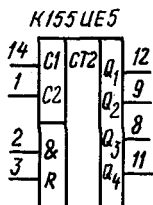


Рис. 156. Микросхема К155ИЕ5

счетчика так, чтобы вход последующего триггера был соединен не с прямым, а с инверсным выходом предшествующего триггера, то будет образован счетчик, в котором каждый импульс напряжения на его входе будет уменьшать содержание счетчика на единицу. Такой счетчик называют *вычитающим*. Могут быть построены реверсивные счетчики, работающие как суммирующие или вычитающие.

В серии 155 имеется ряд счетчиков: К155ИЕ1, К155ИЕ2, К155ИЕ4...К155ИЕ8. Микросхема К155ИЕ5 (рис. 156) содержит четыре триггера и может быть использована как суммирующий двоичный счетчик со счетом до 16 или при создании обратных связей в качестве двоично-десятичного счетчика со счетом до 10 и выражением результата счета в двоичном коде. Выводы с обозначениями $Q_1...Q_4$ являются выходами триггеров, $C1$ — вход первого триггера, на него поступают импульсы, число которых определяется; $C2$ — вход второго триггера. С выходом первого он не соединен. Для образования четырехразрядного счетчика вход $C2$ необходимо соединить с выходом Q_1 . На входы с обозначением $\&$, R_0 подают сигналы установки нуля. Сбрасываются показания счетчика при подаче на них напряжения высокого уровня. При счете эти входы должны быть соединены с общим проводом. Для превращения счетчика в двоично-десятичный, выход Q_2 необходимо соединить со входом $\&$, а выход Q_4 — со входом R_0 . Когда на выходах Q_2 и Q_4 одновременно появятся сигналы высокого уровня, сбрасываются показания счетчика. Эти состояния устанавливаются под воздействием десятого от начала счета импульса. Счетчик будет вести суммирование до десяти.

74. Запоминающие устройства

Для кратковременного или длительного хранения представленной в двоичном коде информации и выдачи ее применяются *запоминающие устройства* (ЗУ). Каждая цифра разряда двоичного кода хранится в отдельном запоминающем элементе. Группа элементов памяти с числом их, равным числу разрядов запоминаемой в двоичном коде информации, называется *ячейкой памяти*. Ячейка памяти может содержать только один элемент памяти. Общее число ячеек во всем запоминающем устройстве называют его *емкостью*, а номер ячейки — ее *адресом*. Принято также представлять емкость запоминающего устройства как произведение числа ячеек на число разрядов в каждой из них.

Основными типами запоминающих устройств являются *оперативные* (ОЗУ), предусматривающие запись и считывание информации, *постоянные* (ПЗУ), допускающие только считывание информации, и *внешние* запоминающие устройства. Различные типы запоминающих устройств применяются в электронно-вычи-

слительных машинах. В современных ЭВМ оперативные и постоянные запоминающие устройства являются полупроводниковыми, выполняемыми в виде больших интегральных микросхем (БИС), а внешние — накопителями информации на материалах с магнитными свойствами.

Оперативные запоминающие устройства делят на *статические* и *динамические*. Элементы статических полупроводниковых ОЗУ являются триггеры. Они могут хранить информацию как угодно долго, пока подается напряжение питания. В динамических ОЗУ информация хранится в виде заряда на обкладках конденсатора. Время хранения непродолжительное, поэтому информацию приходится периодически обновлять (регенерировать). В то же время запоминающие элементы динамических ОЗУ являются очень простыми, занимают мало места. Емкость динамических ОЗУ намного больше, чем статических. Необходимость регенерации затрудняет, а в некоторых случаях исключает применение динамических ОЗУ.

Различают *словарный* и *матричный* способ построения микросхем запоминающих устройств. Словарный способ можно объяснить на примере микросхемы K155PY2 (рис. 157). Она содержит 16 ячеек, по четыре триггера в каждой ячейке. Адреса ячеек задают четырехразрядным двоичным кодом. Он подается на входы $A1...A4$, которые являются входами дешифратора. Набор из четырех цифр двоичного кода может выражать числа от 0 до 15, т. е. указывать адрес любой из ячеек памяти микросхемы. Число входов получается в четыре раза меньше числа ячеек. Поступающая в запоминающее устройство информация подводится к четырем — по числу элементов памяти в ячейке — входам $D1...D4$, снимается с выходов $Q1...Q4$. Входы V, W предназначены для введения сигналов управления триггерами. Возможны четыре варианта функционирования ячеек памяти: запись имеющейся на входах $D1...D4$ информации; хранение ее; выдача; отключение триггеров и передача информации со входов $D1...D4$ непосредственно на выходы $Q1...Q4$.

В микросхемах ОЗУ с емкостью памяти в сотни и тысячи бит при словарном способе сильно увеличивается число соединительных дорожек к ячейкам памяти и усложняются дешифраторы кода адресов. При увеличении емкости памяти переходят к матричной организации ОЗУ. Ячейки в этом случае располагаются по строкам и столбцам: например, 256 ячеек можно расположить по 16 строкам, по 16 ячеек в каждой строке. Будет образована матрица, содержащая 16 строк и 16 столбцов (рис. 158). Для выборки ячейки задается номер строки и номер столбца. Сигналы выборки поступают на соединительные дорожки с выходов дешифраторов. Для передачи сигналов выборки к 256 ячейкам необходимо иметь 16 горизонтальных и 16 вертикально расположенных дорожек, т. е. всего 32 соединительные дорожки. Это намного меньше числа ячеек. Номера строк и столбцов задаются четырехразрядным двоичным кодом на входах дешифраторов. Таким об-

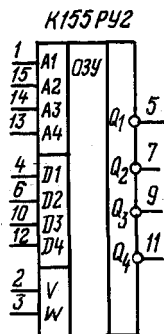


Рис. 157. Микросхема K155PY2

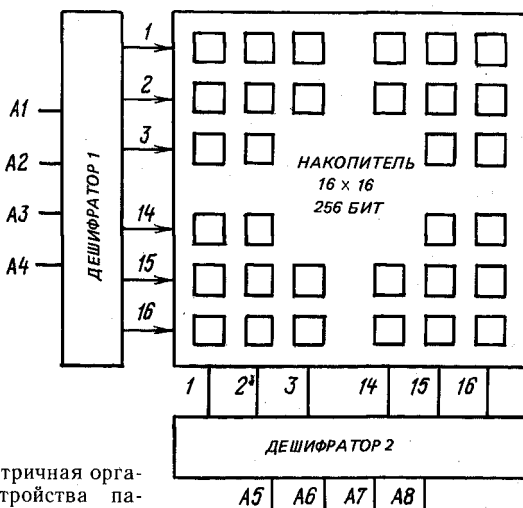


Рис. 158. Матричная организация устройства памяти

разом, для адресации 256 ячеек памяти необходимо иметь только восемь входов микросхемы для подведения к ним сигналов адресов.

Для хранения информации в больших объемах емкость ОЗУ и ПЗУ наращивают путем увеличения числа интегральных микросхем. При этом может быть увеличено как число ячеек, так и число разрядов в каждой ячейке.

75. Понятие об устройстве и принципе действия ЭВМ

На основе представлений об устройстве и работе некоторых цифровых автоматов рассмотрим возможность их применения при решении простейших задач, например задачи типа вычислений по формуле

$$Y = (A + B) - (C + D),$$

где A, B, C, D — числа, имеющие определенные значения.

Очевидно, последовательность действий, называемая *алгоритмом*, может быть записана в порядке:

$$\begin{aligned} Y_1 &= A + B, \\ Y_2 &= C + D \\ Y &= Y_1 - Y_2 \end{aligned}$$

Задача простейшая, поэтому для ее решения необходимо выполнить только действия сложения и вычитания.

Для выполнения операций применим сумматор $СМ$ (рис. 159) с регистрами $P1, P2$ на его входе и регистром $P3$ на выходе. Допол-

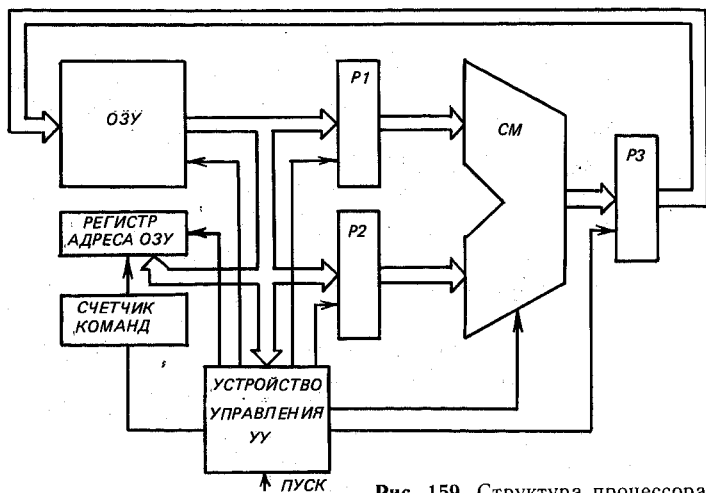


Рис. 159. Структура процессора ЭВМ

нительно установим ОЗУ, регистр адрес ОЗУ, счетчик команд и устройство управления.

Предположим, что *операнды* — числа, над которыми производятся действия, хранятся в ОЗУ по адресам $A1$, $A2$, а для хранения результата имеется ячейка с адресом $A3$. Чтобы выполнить сложение, последовательно открывают доступ информации из ячейки памяти с адресом $A1$ и записывают слагаемое в регистр $P1$. Затем открывают доступ из ячейки с адресом $A2$ и записывают второе слагаемое в регистр $P2$. После этого выполняют сложение в сумматоре, записывают полученный результат в регистр $P3$, а из него — в память по адресу $A3$.

Подобным образом выполняют и вычитание. Только в этом случае для замены вычитания сложением вычитаемое в сумматоре представляют в дополнительном коде. Переход к дополнительному коду поступившего на вход сумматора вычитаемого и приведение в действие сумматора производится одним и тем же сигналом управления. Когда следует сигнал логического нуля в качестве управляющего, происходит сложение. Сигнал логической единицы вызывает изменение кода поступающего на вход сумматора числа, и одновременно выполняется вычитание.

Рассмотренный пример показывает, что для выполнения простейшей операции сложения необходимо привести в действие в определенной последовательности ряд устройств. Для этого к каждому из них должен поступить сигнал управления в виде логического нуля или логической единицы, или в виде напряжения низкого или высокого уровня. Эти сигналы вырабатывают устройство управления. В свою очередь, для образования набора сигналов управления в УУ в это устройство должна поступать информация о том, какие действия и в какой последовательности необходимо выполнить для реализации каждой операции, по каким

адресам хранятся числа, над которыми выполняются действия, и куда должны быть занесены результаты операции. Эта информация в виде двоичного кода образует машинную команду.

Машинная команда имеет две части. Первая ее часть является *кодом операции* (КОП) и однозначно определяет последовательность выполняемых в цифровых устройствах машины действий. Вторая часть, называемая *адресной*, содержит адреса используемых операндов и адрес ячейки для размещения результата.

Код операции	Адресная часть
--------------	----------------

Набор машинных команд, которые должна выполнять машина, образует программу решения задачи.

Составим машинную программу для решения сформулированной нами задачи. Очевидно, понадобится три команды. Две из них — команды на выполнение сложения, третья — вычитания. Обозначим код операции сложения — 0001, код операции вычитания — 0010. Для записи команд программы в ОЗУ выделим ячейки с адресами 0000—0011. Данные и результаты запишем в ячейку ОЗУ по адресам: A — 0101, B — 0110, C — 0111, D — 1000, Y_1 — 1001, Y_2 — 1010, Y — 1011. Запись программы сведем в таблицу.

Адрес команды	Операция	Действие	Код операции	Адрес A первого операнда	Адрес A_2 второго операнда	Адрес A_3 третьего операнда
0001	Сложение	$A + B = Y_1$	0001	0101	0110	1001
0010	Сложение	$C + D = Y_2$	0001	0111	1000	1010
0011	Вычитание	$Y_1 - Y_2 = Y$	0010	1001	1010	1011

Каждая команда представляет собой 16-разрядное двоичное слово. Например, первая команда имеет вид: 0001010101101001.

В устройстве, содержащем сумматор, могут быть выполнены также операции умножения и деления, которые можно реализовать операциями сложения и вычитания. При умножении определяют значения цифры младшего разряда множителя. Обозначим эту цифру как a_0 . Если $a_0 = 1$, то множимое поступает на вход сумматора и затем запоминается в регистре результата P_3 . Если $a_0 = 0$, множимое на вход сумматора не передается и во всех разрядах регистра P_3 сохраняются нули. Вторым шагом в умножении является сдвиг множимого на один разряд влево, выделение и определение значения цифры a_1 второго разряда множителя. При $a_1 = 1$ сдвинутое множимое суммируется с полученным в первом действии сложения результатом. Если $a_1 = 0$, полученный ранее результат сохраняется в регистре P_3 без изменения. Опять осу-

ществляют сдвиг множимого на один разряд влево и определяют значение цифры a_2 , в зависимости от этого значения к имеющемуся результату прибавляют сдвинутое множимое или результат сохраняют без изменения. Такие действия повторяют до тех пор, пока число шагов не станет равным числу разрядов операндов.

При делении чисел сохраняют последовательность действий, связанную со сдвигом делителя и вычитанием.

Операции умножения и деления могут быть представлены в виде специальной программы, включающей команды сложения, вычитания, сдвига, определения знака результата. Такие программы могут входить в систему команд ЭВМ и иметь свой код операции.

Помимо рассмотренных операций, машина выполняет и другие: преобразование кодов чисел, их сравнение, инвертирование, сдвиг, выполнение операций И и ИЛИ, обмен информацией. Результаты анализируются на ноль, наличие переноса, знак результата и т. д. Все операции выполняются в цифровых автоматах машин, объединенных в арифметико-логическое устройство (АЛУ).

Операнды и результаты действий хранятся в ячейках памяти ОЗУ. В этом же ОЗУ под определенными адресами могут быть записаны выполняемые машиной команды. В процессе решения задачи запись программы в ячейках памяти и запись операндов сохраняются. Поэтому выполнение программы может многократно повторяться. Предусмотренные записанной программой действия могут быть выполнены над другими числами. Для этого эти числа надо занести по указанным в командах программы адресам вместо записанных там ранее чисел.

Очередность выполнения команд задает счетчик команд. В начале работы машины на его выходах устанавливают число, которое соответствует адресу первой выполняемой команды. Адрес команды поступает в регистр адресов ОЗУ. В дальнейшем записанная по этому адресу команда считывается из ОЗУ и поступает в устройство управления. После выполнения операции содержание счетчика увеличивается на единицу. Образуется новый адрес команды. Команда считывается, поступает в устройство управления, выполняется второе действие.

Возможны случаи, когда очередность действий зависит от результата выполненных уже действий. Тогда используются команды переходов. По ним содержание счетчика команд увеличивается не на единицу, как при обычном порядке их выполнения, а принудительно изменяется на указанное в заданной команде число.

Устройство управления (УУ) выдает сигналы на выборку команды из ОЗУ, декодирует команду, вырабатывает и передает сигналы для управления прохождением операндов в регистры АЛУ, через сумматор, через логические блоки, анализирует результат и выдает сигналы на запись его в ОЗУ, формирует адрес следующей команды.

Арифметико-логическое устройство совместно с устройством управления образуют центральное устройство ЭВМ, называемое

процессором (обработчик информации). Процессор выполняет действие в соответствии с размещаемой в ОЗУ программой, обеспечивая взаимодействие всех узлов вычислительной машины.

Выполнение машинной команды является сложной процедурой. Производится выборка команды, декодирование ее, формирование адресов операндов, выборка операндов, выполнение операций, запоминание результата, определение адреса следующей команды. В каждом из этих действий одновременно участвует несколько автоматов, выполняющих элементарную операцию, называемую *микрооперацией*. Микрооперацией является, например, считывание операнда, запись операнда в регистре, суммирование и т. д. Последовательность выполнения микроопераций определяется наборами сигналов управления, которые формируют устройства управления. Эти наборы сигналов зависят от команды, которая выполняется в процессоре. По мере усложнения команд наборы сигналов управления становятся более сложными, усложняются АЛУ, трудно устанавливаются условия смены сигналов. Создание цифрового автомата в виде устройства управления представляет значительные трудности. Выход из этого сложного положения был найден путем осуществления принципа микропрограммного управления. При его реализации наборы сигналов управления, необходимые для выполнения групп микроопераций, не формируются, а хранятся сформированными в памяти микрокоманд. Каждая микрокоманда, кроме набора сигналов управления, содержит также условия перехода к следующей микрокоманде. Выполнение команды в машине сводится к последовательной реализации записанных микрокоманд. Эту последовательность микрокоманд называют *микропрограммой*. Микропрограмма определяет, какие сигналы и в какой последовательности должны следовать для выполнения данной машинной команды.

Кроме процессора, ЭВМ содержит и другие блоки. К ним относятся устройства для ввода и вывода информации (клавиатура, дисплей, печатающее устройство и др.), а также внешние запоминающие устройства для хранения больших объемов информации и большого числа данных.

В начале 70-х гг. в результате достижений микроэлектроники появились микропроцессоры. Это микросхемы или наборы небольшого числа микросхем, выполняющие арифметические и логические операции и осуществляющие программное управление вычислительными процессами. Различают два вида микропроцессоров: *однокристальные с фиксированной системой команд*; *многокристальные микропрограммируемые*. Первые — более простые, поэтому их используют в различных устройствах. Вторые функционируют по разрабатываемой пользователем системе команд. Они являются основой для построения специализированных устройств. На базе микропроцессоров могут быть построены микроЭВМ широкого назначения и многие устройства автоматики.

Программирование в машинных кодах в виде нулей и единиц и запись таких команд вручную в память машин были только в

первых ЭВМ. В современных машинах после включения электропитания запускается программа — загрузчик, записанная в ПЗУ. Из внешней памяти ЭВМ и ОЗУ машины записывается операционная система — совокупность программ, обеспечивающих взаимодействие оператора с машиной. Операционная система ориентирована на облегчение и автоматизацию процесса программирования, отладки и выполнения программ. Пользуясь этим набором программ, оператор может ввести в память машины текст программы, составленный на языке высокого уровня, как например Бейсик, Фортран, Алгол, и при необходимости исправить программу. Запись программы на таких языках приближается к инженерной записи алгоритма решения задач и не связана с особенностью функционирования ЭВМ. Для того чтобы машина выполнила заданные программы действия, записанная программа преобразуется — транслируется в машинные коды с помощью специальных программ — трансляторов, а после этого выполняется.

Вопросы и задания

1. Какое напряжение (ток) называют импульсным? 2. Какую величину называют амплитудой импульса? длительностью? периодом повторения? частотой повторения? скважностью? 3. Начертите график напряжения на конденсаторе при его зарядке от источников постоянного напряжения через резистор. Как зависит вид графика от емкости конденсатора и сопротивления резистора? 4. Начертите график напряжения на конденсаторе при его разрядке через резистор. Как зависит вид графика от емкости конденсатора? сопротивления резистора? 5. От каких величин зависит длительность импульсов мультивибратора? 6. По схеме транзисторного триггера объясните принцип его работы. 7. Какие операции выполняют логические элементы ИЛИ, И, НЕ, ИЛИ — НЕ, И — НЕ? 8. Объясните принцип работы простейших цепей, в которых реализуются операции ИЛИ, И, НЕ. 9. Какие триггеры называют RS-триггерами? 10. Объясните принцип работы синхронного RS-триггера на элементах И — НЕ. 11. В чем заключаются особенности работы D- и JK-триггеров? 12. Назовите известные вам комбинационные устройства и укажите их назначение. 13. Какие функции выполняет регистр, счетчик? 14. Какие узлы включает ЭВМ? Каково их назначение?

Литература

- Никулин Н. В., Назаров А. С. Радиоматериалы и радиокомпоненты. М., 1987. 208 с.
Поляков В. Т. Посвящение в радиоэлектронику. М., 1988. 352 с.
Толкачев Г. Б., Ковалев В. Н. Радиоэлектроника. М., 1983. 288 с.

Оглавление

Предисловие	3
Глава I. Общие сведения об информации, радиоэлектронике и радиотехническом производстве	4
1. Информация и сигналы	—
2. Радиоэлектроника и ее применение	6
3. Радиотехническое производство	8
Глава II. Радиотехнические материалы	10
4. Классификация и характеристики радиоматериалов	—
5. Основные проводящие и электроизоляционные материалы	11
6. Магнитные материалы	13
7. Обмоточные и монтажные провода	15
8. Радиочастотные кабели	16
Глава III. Элементы радиоэлектронной аппаратуры	18
9. Общие сведения об элементах радиоэлектронных цепей	—
10. Резисторы	—
11. Конденсаторы	21
12. Катушки индуктивности, дроссели, трансформаторы	25
13. Механические переключатели, реле и соединители	27
Глава IV. Техническая документация. Стандарты	29
14. Конструкторские документы	—
15. Государственная система стандартизации и ее значение	31
Глава V. Электро- и радиоизмерения	34
16. Электрические измерения. Погрешности измерений	—
17. Электроизмерительные приборы непосредственной оценки	36
18. Расширение пределов измерения приборов. Измерение сопротивлений	41
19. Особенности и классификация радиоизмерительных приборов	43
20. Измерительные генераторы	44
21. Электронные вольтметры	45
22. Электронные осциллографы	46
Глава VI. Полупроводниковые приборы	50
23. Полупроводники и их свойства	—
24. Электронно-дырочный переход	53
25. Беспереходные полупроводниковые приборы	56
26. Полупроводниковые диоды	58
27. Полевые транзисторы	62
28. Биполярные транзисторы	66
29. Тиристоры	71
30. Оптоэлектронные полупроводниковые приборы	73
Глава VII. Усилители электрических сигналов	75
31. Принцип работы транзисторного усилителя	—
32. Классификация усилителей и показатели их работы	79
33. Резисторный усилитель напряжения с общим эмиттером и общим истоком	80
34. Обратная связь в усилителях. Эмиттерный повторитель	84
35. Усилители постоянного тока	85
36. Многокаскадные усилители	87
37. Усилители мощности	89
Глава VIII. Интегральные микросхемы	95
38. Понятие об интегральных микросхемах и технологии их изготовления	—

39.	Особенности образования электрических цепей в интегральных микросхемах	98
40.	Система обозначений интегральных микросхем. Характеристики и параметры	99
41.	Применение интегральных микросхем	101
Глава IX.	Выпрямители	102
42.	Источники электропитания	—
43.	Схемы выпрямителей	103
44.	Сглаживающие фильтры выпрямителей	105
45.	Простейшие стабилизаторы напряжения	107
Глава X.	Колебательные системы	109
46.	Колебательный контур. Свободные колебания в контуре	—
47.	Вынужденные колебания в последовательном контуре. Резонанс напряжения	111
48.	Параллельный контур. Резонанс токов	114
49.	Понятие о связанных контурах	116
Глава XI.	Радиопередающие и радиоприемные устройства	119
50.	Принцип осуществления радиосвязи. Структурная схема радиопередающего устройства	—
51.	Избирательные усилители	120
52.	Генератор незатухающих колебаний	121
53.	Модуляция. Устройства амплитудной модуляции	122
54.	Преобразование частоты	125
55.	Детектирование	—
56.	Приемник прямого усиления. Основные параметры приемника. Супергетеродинный приемник	127
Глава XII.	Элементы импульсной и цифровой техники	130
57.	Импульсные сигналы	—
58.	Электронные ключи	131
59.	Переходные процессы в цепи с конденсатором и резистором	133
60.	Мультивибратор	135
61.	Транзисторный триггер	138
62.	Представление информации в устройствах цифровой техники	139
63.	Выполнение арифметических действий над числами в двоичном коде	141
64.	Логические основы действия цифровых устройств	143
65.	Простейшие функции алгебры логики	145
66.	Логические элементы НЕ, И, ИЛИ	146
67.	Логические элементы И — НЕ, ИЛИ — НЕ	148
68.	Комбинационные устройства	151
69.	Сумматоры	155
70.	Триггеры	157
71.	Генераторы прямоугольных импульсов напряжения на логических элементах	160
72.	Регистры	163
73.	Счетчики	164
74.	Запоминающие устройства	166
75.	Понятие об устройстве и принципе действия ЭВМ	168
	<i>Литература</i>	<i>173</i>

Учебное издание

ЛЯШКО Михаил Николаевич
МАРКЕВИЧ Константин Михайлович

ОСНОВЫ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

Заведующий редакцией *Б. А. Кимбар*

Редактор *Н. Г. Левчук*

Художник *В. С. Жаркевич*

Художественный редактор *Г. И. Красинский*

Технический редактор *С. И. Лицкевич*

Корректоры *М. Г. Виноградова, Р. С. Ахремчик*

ИБ № 2845

Сдано в набор 08.08.90. Подписано в печать 04.07.91. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная № 1. Гарнитура литературная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 11 + 0,25 форз. Усл. кр.-отт. 23. Уч.-изд. л. 11,06 + 0,42 форз. Тираж 25 000 экз.

Заказ 650. Цена 3 р. 30 к.

Издательство «Народная асвета» Государственного комитета БССР по печати. 220600, Минск, проспект Машерова, 11.

Минский ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинат МППО им. Я. Коласа. 220005, Минск, Красная, 23.