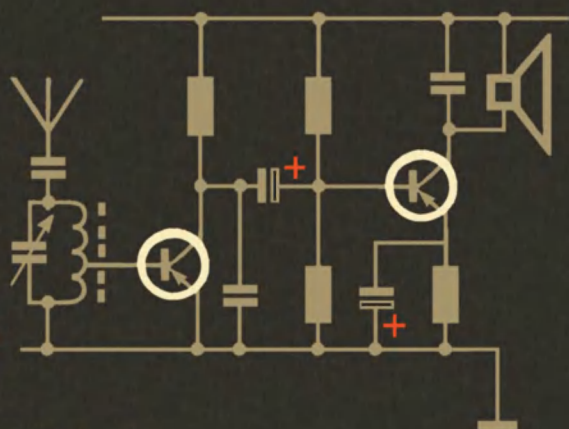


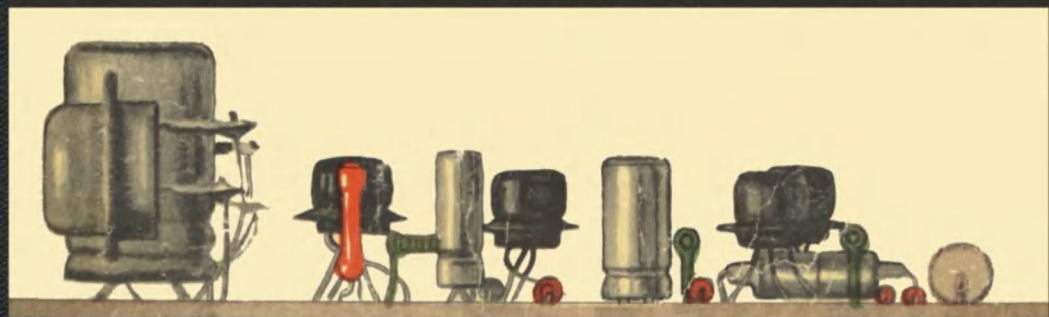
Р. СВОРЕНЬ ШАГ ЗА ШАГОМ

Р. СВОРЕНЬ



ТРАНЗИСТОРЫ

ШАГ ЗА ШАГОМ

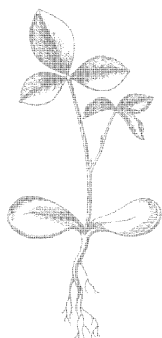


ИЗДАТЕЛЬСТВО «ДЕТСКАЯ ЛИТЕРАТУРА»

Р. Своренъ

ШАГ ЗА ШАГОМ

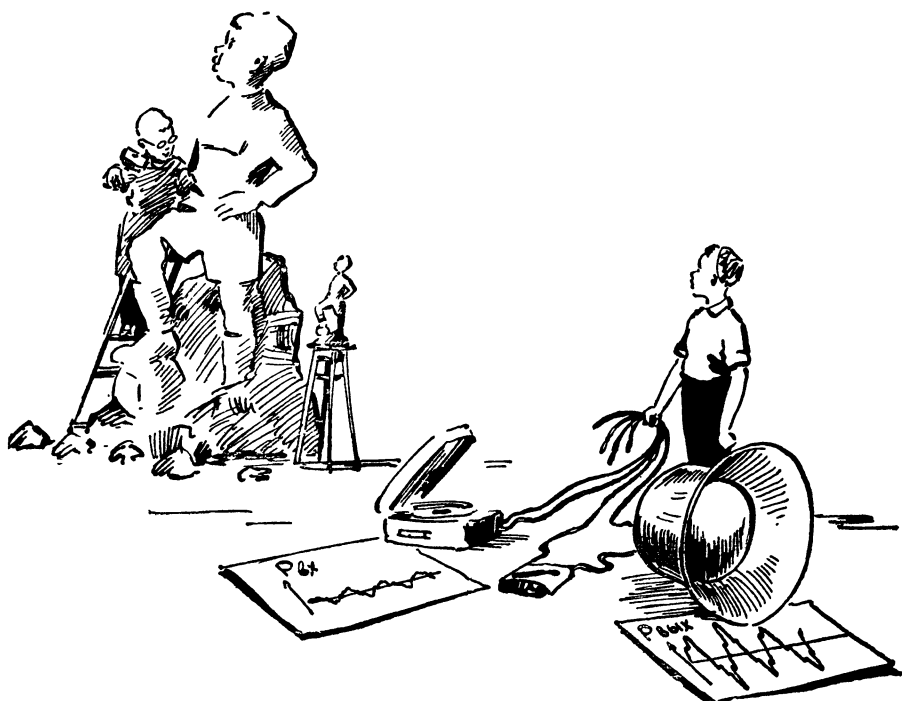
ТРАНЗИСТОРЫ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ДЕТСКАЯ ЛИТЕРАТУРА»
МОСКВА 1971

6Ф0.32
С25

Рисунки Н. Ф р о л о в а
Оформление Г. О р д ы н с к о г о



Глава I

ТРЕБУЮТСЯ СКУЛЬПТОРЫ

Есть два способа научить человека управлять автомобилем. Первый способ такой. Нужно посадить будущего водителя за руль и дать ему конкретную инструкцию: «Хочешь ехать вперед — опусти эту ручку вниз, хочешь ехать назад — подними ее вверх, прежде чем переставлять ручку — нажми на эту педаль, а когда переставишь — отпусти педаль, хочешь ехать быстрее — нажимай на ту длинную педаль, хочешь остановиться — нажми на эту квадратную педаль. Вот и все. Поехали...»

А вот другой способ. Человеку, который хочет водить автомобиль, сначала нужно рассказать, хотя бы коротко, хотя бы в самых общих чертах, о том, как этот автомобиль устроен. Рассказать, как работает двигатель, что значит «включить зажигание», как мы изменяем количество рабочей смеси, поступающей в цилиндры, а значит, и число оборотов двигателя.

Нужно рассказать, каким образом, через какие промежуточные механизмы двигатель вращает колеса автомобиля, что происходит при переключении скоростей, для чего нужно сцепление, и так далее. И уже только после такого рассказа можно показать, какие ручки и педали управляют теми или иными агрегатами, и пояснить, в каких случаях какую педаль нужно нажимать.

Вряд ли стоит тратить время на анализ и сравнение этих двух способов обучения. Совершенно ясно, что первый из них не покажется разумным ни учителям, ни ученикам. И все же есть такая область техники, которую часто начинают изучать не головой, а руками. О чем идет речь? Представьте себе, что о радиоэлектронике.

Разве мало людей, не зная основ электроники, пытаются построить какой-нибудь сложный электронный прибор — радиоуправляемую модель или телевизор? А сколько карманных приемников было построено любителями, не имеющими представления о принципах радиоприема, не знающими, зачем нужен тот или иной элемент в собранной ими схеме! И нужно сказать, что большинство этих приемников работало, а некоторые работали просто хорошо. (А вы думаете, водитель, которого учили лишь ручки переставлять да педали нажимать, не будет ездить на машине? Будет. Да еще как!)

Так, может быть, отправляясь на завоевание страны Электронии, в самом деле нужно прежде всего вооружиться паяльником? Может быть, в этой загадочной стране все двери открывает пароль «делай сам»?

На оба эти вопроса нужно ответить утвердительно. Но с оговоркой. Если вы не хотите понапрасну терять время на разгадывание известного или бросать работу, отчаявшись найти неисправность в схеме, когда обнаружить ее дело одной минуты, если вы не хотите повторять чужие ошибки и слепо копировать плохонькую схему, в то время как есть тысяча простых способов улучшить ее, одним словом, если вы не хотите блуждать впотьмах по путаным дорогам Электронии, запомните: пароль «делай сам» обязательно нужно дополнить словами «знай» и «думай».

Эта книжка по возможности построена так, что описания конкретных электронных приборов, которые можно построить своими силами, переплетаются с рассказом об «архитектуре» и налаживании схем, об электрических цепях, их отдельных элементах. Однако все, что хотелось рассказать об основах радиоэлектроники, не удалось равномерно «перемешать» с описаниями приборов-самоделок. Потому что о некоторых вещах нужно знать еще до того, как вы возьмете в руки паяль-

ник. Так появились в этой книге большие «блоки» основ электротехники и радиоэлектроники, в том числе и эта первая глава. А если кому-нибудь особенно не терпится «сесть за руль», если кто захочет сразу же пустить в ход паяльник, то пусть он, этот нетерпеливый человек, сразу берется за описания конкретных схем — а их в книге немало — и пропускает те разделы, которые покажутся слишком общими. Только заранее предупреждаем: выиграть на этом ничего не удастся!

С Л О В А, С Л О В А, С Л О В А...

Прежде чем начинать рассказ о транзисторных усилителях, приемниках и генераторах, прежде чем чертить планы монтажа простых и сложных транзисторных аппаратов и писать формулы для расчета их узлов, одним словом, прежде чем знакомиться, как это обещано, со схемами на транзисторах, мы несколько отклонимся от своей цели. Мы совершим короткую, буквально на пять — десять минут, экскурсию совсем в другое государство — в языкознание. Цель этой экскурсии — познакомиться с несколькими необычными применениями нескольких обычных слов.

По-видимому, в каждом языке существуют одинаково звучащие, но имеющие разное значение слова. Официальное название таких слов — омонимы. За примерами русских омонимов не нужно далеко ходить: это *ключ* — родник, *ключ* от замка, телеграфный *ключ*, гаечный *ключ* и *ключ* для чтения шифрованного письма. А вот еще примеры: *три* — число и *три* — глагол; *нос* на лице и *нос* корабля; *совет* — рекомендация, указание, как поступать, и *Совет* — орган власти (например, городской Совет).

Омонимы, может быть, и полезны в каких-то случаях, например при сочинении шуточных стихов, но, в общем-то, конечно, существование одного общего слова для двух совершенно разных понятий очень неудобно. И, к сожалению, такие неудобства мы часто создаем сами. Причем не то чтобы по ошибке, не то чтобы случайно, а в силу какой-то небрежности, какого-то неуважения к чистоте и четкости родного языка. Примером такой небрежности может служить и слово «транзистор», которое с чьей-то легкой руки, к сожалению, стало омонимом.

Слово «транзистор» родилось около двадцати лет назад. Именно так был назван новый усилительный прибор — полупроводниковый, или, как его еще тогда называли, кристаллический, триод. Само слово *транзистор* является своеобразным

гибридом двух радиотехнических терминов — *трансфер* и *резистор*. Первое из этих слов (оно очень похоже на трансформатор) означает «преобразователь», «переносчик», «передатчик». Второе слово относится к электрическому сопротивлению, тому самому, на котором электрический ток выделяет мощность и которое входит в закон Ома, определяет ток в цепи и т. д. В общем же, слово «транзистор» можно расшифровать как «преобразователь сопротивлений», прибор, который передает, переносит сопротивление из одной цепи в другую.

С чем связано такое название, мы увидим несколько позже, а пока лишь заметим, что оно, это название, характеризует главную «профессию» транзистора — его умение усиливать слабый электрический сигнал. Со способностью транзистора проделывать ряд «фокусов» и как бы изменять сопротивление цепи, по которой проходит электрический ток, как раз и связано то, что транзистор увеличивает мощность слабого сигнала, то есть усиливает его. По своему устройству транзистор — это миниатюрный полупроводниковый кристаллик (помещенный в пластмассовый или мегаллический корпус) с подпаянными или приваренными к нему тремя тонкими проводочками. Именно с их помощью транзистор включается в ту или иную электрическую цепь.

Существует множество людей, которые возмущаются, познакомившись с нашим описанием транзистора. И совсем не из-за краткости или поверхностности этого описания. Существует множество людей, которые уверенно скажут, что наше описание в принципе неверно, что транзистор — просто маленький, переносный приемник, который можно слушать на пляже, на прогулке, в лесу, на рыбалке.

Откуда взялось это второе значение слова «транзистор»? Скорее всего его автором был небрежный, малограмотный и, конечно уж, нелюбознательный человек. Увидел он впервые маленький приемник, услышал, краем уха, что в нем есть какие-то транзисторы, и, даже не узнав, что это такое, почему приемник так мал, чем он отличается от всех других, дал этому приемнику название «транзистор». И пошло оно гулять по свету. Невежество было закреплено печатным словом: транзистор-приемник появился в газетных и журнальных статьях. Авторы этих статей, по-видимому, не подозревали, что похитили имя «транзистор» у одного из самых замечательных изобретений нашего времени.

Конечно, спору нет — для маленьких приемников удобно иметь какое-нибудь специальное название, удобно пользоваться одним коротким словом вместо длинных и скучных

«приемник на транзисторах» или «миниатюрный переносный приемник». Но вряд ли стоит создавать это удобство за счет введения словесной путаницы. Пользуясь тем, что второе значение слова «транзистор» пока не встречается в словарях и не признано ни радистами, ни языковедами, мы будем считать это значение незаконным. И в дальнейшем, говоря о транзисторах, будем иметь в виду только полупроводниковый усилительный прибор, только полупроводниковый триод.

Несколько сложнее обстоит дело с другим словом — *схема*. Строго говоря, схема — это рисунок, чертеж. На схеме (точнее, на принципиальной схеме) электронной установки условными обозначениями показано, из каких элементов состоит эта установка, как эти элементы соединены, а часто и в каком режиме они работают. И в то же время схемой радисты называют и сам прибор, его электрические цепи. Так и говорят: «Схема работает неустойчиво...» или: «Попробую наладить схему...»

Эта книга посвящена схемам, в которых работают полупроводниковые триоды. Но здесь будет рассказано не только о схемах-чертежах, а о том, как их составлять, как читать, как по схемам оценивать возможности, достоинства и недостатки того или иного электронного прибора. Речь пойдет о транзисторных схемах в широком смысле слова, и о самих схемах, начерченных на бумаге, и о схемах, собранных, налаженных и работающих. Об этом как раз и хотелось предупредить, «придравшись» к двойственному значению самого слова «схема».

И, наконец, еще об одном слове — о слове «барьер». Прямое его значение, конечно, ни у кого не вызывает сомнений. Но очень часто мы говорим о барьере в переносном смысле. Например, говорим, что только реактивная авиация сумела преодолеть звуковой барьер, сумела превысить скорость звука. Или говорим, что при операциях по пересадке органов самое сложное — преодолеть барьер несовместимости: преодолеть сопротивление, которое организм оказывает всякой чужой ткани. Подобных примеров много. Вы наверняка слышали о барьерах тепловом, экономическом, технологическом и других.

С преодолением многих препятствий, многих барьеров связана судьба транзисторов. И об одном из них — о психологическом барьере — хочется сказать несколько слов.

Первые сообщения об изобретении транзистора появились летом 1948 года. Уже через два-три года стало ясно, что полупроводниковый триод — это не уникальный лабораторный прибор, что его можно выпускать в промышленных масштабах

и что транзистор наверняка заменит электронную лампу во многих областях электроники.

А нужно сказать, что электронная лампа в те времена находилась в зените своей славы. Мировая электронная промышленность ежегодно выпускала много миллионов самых различных ламп, от миниатюрных «пальчиков» до сверхмощных генераторных гигантов. Ламповые схемы были той основой, на которой строились автоматика, телевидение, локации — словом, вся радиоэлектроника. Радисты обучили лампу десяткам разнообразных профессий, создали для нее тысячи схем, разработали методы их расчета и налаживания. И все это создавалось десятилетиями, создавалось упорным трудом ученых и инженеров.

Но что поделаешь, преимущества транзистора перед лампой были бесспорны, по крайней мере в некоторых областях. В частности, в конструировании экономичной переносной аппаратуры за транзисторной электроникой было будущее. А значит, надо было создавать эту новую электронику, надо было привыкать к ней. Вот здесь-то и встал на пути радиоспециалистов трудный психологический барьер. Отказаться от привычного не так-то просто. Многим специалистам понадобились годы, чтобы убедиться в окончании ламповой монополии и обратиться на транзисторный путь.

Психологический барьер на пути транзисторов сказывался еще и в том, что молодое поколение радистов свое знакомство с транзисторами по инерции начинало с лампы. «Лампа работает так... а теперь посмотрим, чем похож на нее транзистор...» — такой была типичная последовательность при знакомстве с электронными схемами. В наши дни это знакомство сплошь и рядом выглядит совсем по-другому: «Транзистор работает так... А теперь посмотрим, чем на него похожа лампа...»

Наш рассказ — о транзисторах, и мы не будем поэтому вспоминать о лампах. Даже этого слова вы почти не встретите дальше. И совсем не потому, что во многих областях радиоэлектроники транзистор стал главным действующим лицом. (У лампы еще остается и, по-видимому, навсегда останется немало своих областей, куда транзисторам «вход воспрещен»). Мы начнем этот рассказ о транзисторах с самих транзисторов только потому, что к ним уже все привыкли и на пути транзисторной электроники давно нет никакого психологического барьера.

Вот и закончилось наше короткое лингвистическое путешествие. Начав с разговора о словах «транзистор», «схема», «барьер», мы поговорили и о своих будущих делах. А начав



Рис. 1. Тому, кто привык к ламповой электронике, переход к транзисторным схемам зачастую казался трудным делом.

деловой разговор, не будем от него отклоняться. Сейчас нам предстоит выяснить, для чего вообще нужен транзистор, какая роль ему отводится в электронной аппаратуре.

ГЛАВНАЯ РОЛЬ

Всякое электронное устройство — это своеобразный мир электрических сигналов. Здесь они зарождаются и умирают, сюда сигналы приходят, чтобы, пробежав по многочисленным электрическим цепям, претерпев множество самых удивительных превращений, обернуться прекрасной мелодией, картинкой на телевизионном экране или включением тормозного двигателя на космическом корабле.

Среди многих интересных преобразований электрического сигнала — с ними нам так или иначе предстоит познакомиться — одним из наиболее важных является усиление. Вот лишь один пример, один случай, когда без усиления обойтись просто невозможно.

Мощность радиосигнала, который, проделав долгий путь, попадает наконец в антенну приемника, довольно редко до-

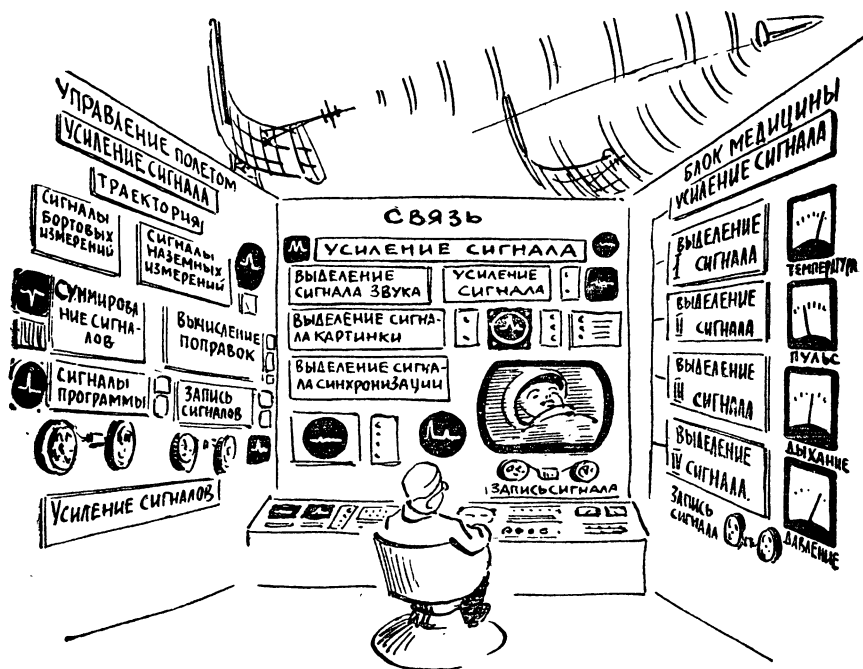


Рис. 2. Любой электронный прибор — это целый мир электрических сигналов.

стигает нескольких миллиардных долей ватта. Обычно же эта мощность еще в миллионы раз меньше. В то же время мощность, которую нужно подвести к динамику (так сокращенно называют динамические громкоговорители), чтобы он создавал достаточно громкий звук, должна составлять несколько ватт или по крайней мере несколько десятых долей ватта. Отсюда и следует, что во время путешествия с входа радиоприемника к его выходу, электрический сигнал должен увеличить свою мощность в миллиарды раз. А увеличение мощности как раз и называется усилением сигнала.

Похожие результаты мы получим, если сравним мощность, которую дает фотоэлемент, с мощностью, которая нужна, чтобы двинуть стальную руку контролера-автомата в метро. Или если сравним входную и выходную мощность электронного регулятора температуры, прибора для записи биотоков мозга, установки для регистрации землетрясений, электронных

блоков радиоуправляемой модели или, наконец, обычного магнитофона.

Итак, в электронной аппаратуре необходимо усиливать слабые электрические сигналы, увеличивать их мощность. Но как в принципе можно осуществить такое усиление? И что вообще нужно понимать под этим словом? Прежде чем отвечать на эти вопросы по существу, позвольте вспомнить рассказанную уже однажды историю из другой области.

Некоторое время назад известная футбольная команда «Шайба» неожиданно для всей спортивной общественности начала вписывать в турнирную таблицу один ноль за другим. И ее болельщики только о том и говорят — как усилить свою любимую команду, как улучшить ее игру.

Из всех высказанных предложений остановимся на двух.

Первое предложение. Ввести регулярные круглогодичные тренировки и занятия по тактике футбола, улучшить физическую подготовку, условия отдыха и питание игроков. Результат — усиление команды.

Второе предложение. Тренера сменить, команду расформировать, пригласить новых, более сильных игроков. Результат — усиление команды. Правда, в этом случае фактически произойдет не усиление, а замена команды. Но это уже деталь, которая в данном случае никого не интересует. Болельщикам важен только результат — футбольная команда «Шайба» стала играть лучше. А разве это не усиление команды «Шайба»?

Примерно в таком же смысле применяется слово «усиление» и в радиоэлектронике. Если у нас был слабый электрический сигнал, а затем был создан такой же, но более мощный сигнал, то мы говорим, что произошло усиление сигнала, хотя правильнее было бы говорить о замене. Самым сложным здесь, так же как и при усилении футбольной команды путем замены игроков, является сам процесс создания «мощной копии» усиливаемого сигнала. Об этом процессе мы сейчас и поговорим.

Итак, при усилении слабого электрического сигнала создается такой же, но только более мощный сигнал. Но что означает в данном случае понятие «такой же»? Какие черты слабого, усиливаемого сигнала должны сохраниться в мощном, в усиленном? Если эти сигналы — слабый и усиленный — различаются по мощности, то в чем же они тогда должны быть похожи?

При усилении нужно сохранить форму сигнала, характер его изменения. Дело в том, что электрический сигнал — это изменяющийся ток. И именно в характере его изменения —

в скорости, в «резкости» или «плавности» нарастания (или убывания) тока — и записана та информация, те сведения, которые этот сигнал переносит. Только характером изменения отличается ток, который возникает в микрофонной цепи, когда вы произносите «а», от тока, который возникает при произнесении звука «о». Только характером изменения отличается ток, создающий на экране телевизора изображение лошади, от тока, создающего на том же экране портрет осла. Отсюда вывод: при усилении нужно сохранить сам характер усиливаемого сигнала, характер изменения электрического тока.

Согласитесь, что «характер изменения» очень уж расплывчатое понятие. И если мы хотим не потерять при усилении этот самый «характер», то должны научиться описывать его конкретно и точно.

Описывать характер изменения тока словами не только неудобно, но просто невозможно. Представьте себе такое описание. «Достигнув двух миллиампер, ток в течение половины микросекунды оставался неизменным, затем начал равномерно нарастать и уже через пять тысячных микросекунды достиг трех с четвертью миллиампер. После этого ток плавно, но со все возрастающей скоростью в течение четырех микросекунд уменьшался, приближаясь, но так и не приблизившись к величине, от которой он начал возрастать, после чего...» и т. д. Много томов понадобилось бы, чтобы подобным способом рассказать, что происходит с каким-нибудь одним электрическим сигналом в течение нескольких секунд. Нет, описывать электрический сигнал словами, конечно, не стоит: для этого есть более простые и наглядные способы описания. И среди них прежде всего графики (рис. 3).

График — это особый деловой рисунок, такой же, скажем, как географическая карта или чертеж. График тока показывает, как меняется этот ток с течением времени, каких значений он достигает в тот или иной момент. Горизонтальная ось графика, подобно циферблату часов, размечена в единицах времени, а по вертикальной оси откладывается значение тока или напряжения. Разумеется, это относится лишь к графику, описывающему характер электрического сигнала. Существует множество других графиков, которые показывают совершенно другие зависимости и соответственно имеют другую разметку осей. Встреча с некоторыми из них у нас еще впереди.

Сама линия, показывающая, как изменяется ток с течением времени, называется кривой тока или графиком тока. Это, конечно, не очень строгие выражения, но они уже давно существуют в языке математиков и инженеров, и мы будем этими выражениями пользоваться без всяких оговорок.

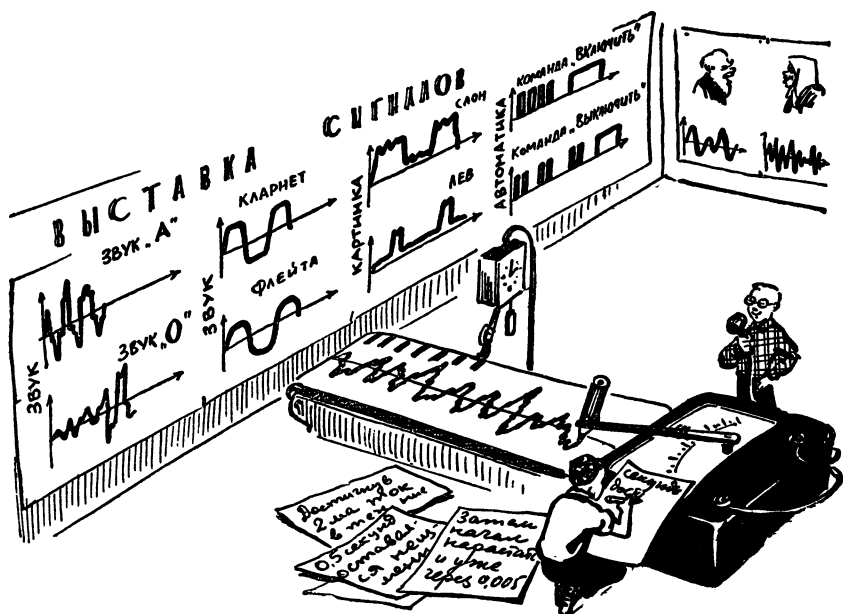


Рис. 3. Информация, которую несет электрический сигнал, записана в изменениях тока (напряжения) в форме графика этого сигнала.

Итак, сохранить характер сигнала при усилении — это значит создать более мощный сигнал, график которого по форме был бы таким же, как и график слабого, усиливаемого сигнала. Иными словами, график усиливаемого сигнала и построенный в ином масштабе график усиленного сигнала (деления на вертикальной шкале нужно сжать во столько же раз, во сколько усиливается сигнал) должны быть одинаковыми (рис. 4).

Теперь уже, пожалуй, можно определить, из каких основных узлов должен состоять любой электронный усилитель сигналов. Во-первых, в нем должен быть источник энергии, которая и пойдет на создание мощного, усиленного сигнала. Во-вторых, в усилителе должен быть своего рода копировальный аппарат — устройство, которое, используя энергию имеющегося источника и взяв за образец слабый усиливаемый сигнал, создаст по его подобию новый, мощный сигнал.

Здесь уместно такое сравнение. Представьте, что у вас есть маленькая скульптурка и вам хочется сделать такую же точно скульптуру больших размеров. Что для этого нужно? Во-первых, нужен большой кусок глины или другого материала

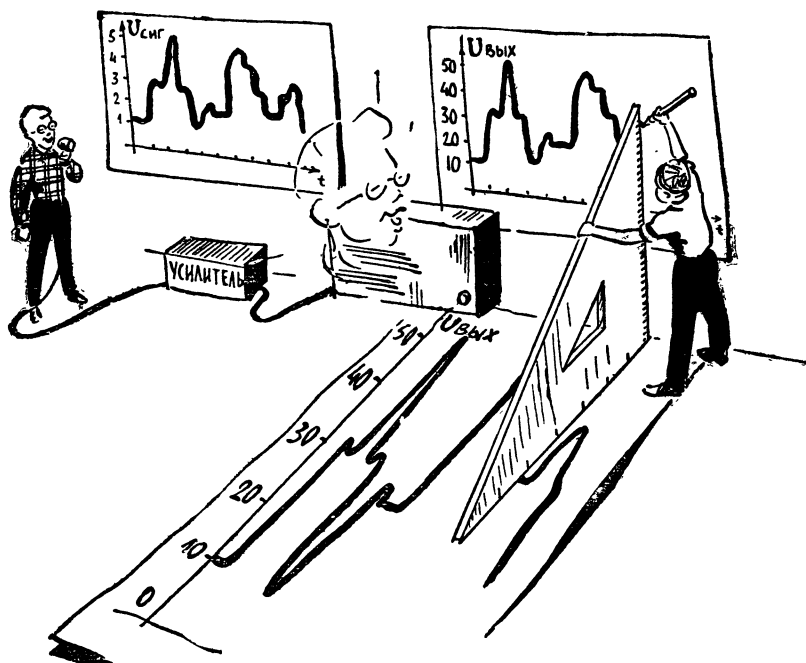


Рис. 4. Усилить сигнал — это значит создать более мощный сигнал, но с неизменной формой графика.

ла, из которого можно было бы слепить большую скульптуру. Ну, а во-вторых, нужен скульптор, который сумеет, глядя на маленький образец, создать его большую копию из бесформенного куска. В электронном усилителе энергию, которую дает мощный источник, можно сравнить с большим куском глины, а «копировальный аппарат» должен делать примерно то же, что и скульптор в нашем примере.

Что касается источника энергии, то здесь дело обстоит просто: его роль прекрасно выполняет батарея или выпрямитель, дающий постоянный ток. Из постоянного тока сравнительно просто можно «лепить» самые сложные по форме сигналы. Был бы только «скульптор». А вот с ним-то дело обстоит намного сложнее.

Сейчас мы начнем поиски скульптора, начнем поиски устройства, которое может слепить из постоянного тока мощную копию слабого сигнала. Поиски в итоге приведут к транзистору: усиление сигнала, точнее, лепка мощного сигнала по

образцу слабого,— это и есть главная роль, которую играет транзистор в электронной аппаратуре.

Конечная цель наших поисков недалека. Но не будем торопиться. Давайте пройдем свой путь, как подобает настоящим следопытам. Давайте внимательно присматриваться к дороге, при любой остановке задумываться, куда идти дальше, и, конечно, отмечать на карте все интересное, что встретится в пути.

Прежде чем отправляться в дорогу, попытаемся как-то изобразить на путевой карте свои исходные позиции.

Начнем с того, что нарисуем источник энергии для создания усиленного сигнала — батарею B (рис. 5). Подключим к батарее резистор $R_{\text{вых}}$ (почему мы назвали этот резистор «выходным» — сокращенно «вых», — будет объяснено немного позже) и создадим таким образом замкнутую цепь. Теперь батарея B не бездействует, а гонит по этой цепи постоянный ток. Из него-то мы и будем лепить мощную копию слабого сигнала.

Источником слабого сигнала, который нам предстоит усилить, может быть антенна приемника или телевизора, звуко-сниматель, движущийся по пластинке, микрофон, фотоэлемент и масса других устройств. Но мы не будем вдаваться в подробности — сейчас они несущественны — и договоримся, что



Рис. 5. Источником энергии для создания усиленного сигнала может служить батарея.

слабый сигнал поступает из какого-то условного генератора, из закрытой «коробочки» с надписью «Слабый сигнал». Мы видим лишь две клеммы этого условного генератора, между которыми и действует непрерывно меняющееся напряжение $U_{\text{сиг}}$. Если подключить к клеммам генератора электрическую цепь, в простейшем случае одиночный резистор $R_{\text{вх}}$ (почему это сопротивление названо входным, мы скажем позже), то в этой цепи пойдет меняющийся ток $I_{\text{сиг}}$.

Итак, источник слабого сигнала дает напряжение $U_{\text{сиг}}$, а по резистору $R_{\text{вх}}$ проходит ток $I_{\text{сиг}}$. А что является тем самым сигналом, который нужно усилить, — ток или напряжение? И что в результате усиления должно возрасти — $U_{\text{сиг}}$ или $I_{\text{сиг}}$?

Какой-либо физический процесс может характеризоваться несколькими связанными между собой показателями. Движение автомобиля, например, характеризуется скоростью, пройденным расстоянием и временем, в течение которого машина находится в пути. А то, что происходит на каком-нибудь участке электрической цепи, характеризуется напряжением U на этом участке, его сопротивлением R и током I . Все три величины связаны между собой: величина тока I зависит от U и от R . Описание этой зависимости (словами или в алгебраическом виде, то есть в виде формул) называется законом Ома. Этот закон всем вам наверняка известен, но мы все же уделим ему несколько строк. Как-никак это главный закон электрических цепей, и не зря радисты шутят: «Не знаешь закон Ома — сиди дома!»

Электрическое напряжение, грубо говоря, создается неравновесием электрических зарядов на каком-нибудь участке цепи, например на концах наших резисторов $R_{\text{вх}}$ или $R_{\text{вых}}$. Если в самом резисторе имеется одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов и если распределены они равномерно, то никакого напряжения на этом резисторе не будет. А вот если на одном конце резистора отрицательных зарядов — электронов — больше, чем на другом конце, то между этими концами как раз и будет действовать напряжение. Чем больше неравенство, неравновесие зарядов, тем больше и напряжение.

Разумеется, электрическое напряжение само по себе не является. Его создают, затрачивая на это определенную энергию. Напряжение на выходе батареи, например, создается за счет химической энергии. Напряжение на выходе звукоусилителя появляется за счет работы, которую совершает игла, двигаясь по извилистой звуковой дорожке. Напряжение на выходе микрофона создается энергией звуковых колебаний. На-

пряжение в цепи антенны приемника или телевизора возникает от воздействия на эту антенну электромагнитных волн.

Напряжение, действующее на каком-либо участке цепи, создает на этом участке ток — упорядоченное движение свободных электрических зарядов. Довольно часто током называют движение свободных электронов. И действительно, во многих случаях в электрической цепи движутся только одни электроны. Но если в каком-либо элементе цепи имеются и другие положительные либо отрицательные свободные (то есть не привязанные к определенному месту) заряды, то под действием напряжения и они начнут двигаться. Заряды всегда двигаются оттуда, где их слишком много, туда, где их не хватает. Образно говоря, электрический заряд всегда ищет, где посвободнее, где меньше таких же, как и он сам, зарядов-конкурентов. Так, положительные заряды двигаются от «плюса» к «минусу», а отрицательные — от «минуса» к «плюсу» (см. стр. 142. Воспоминание № 2).

Чем больше напряжение, тем больше ток, тем интенсивнее движение свободных зарядов. Об этом и говорит первая часть закона Ома: «Ток I прямо пропорционален напряжению U ...» На второй части закона — «ток I обратно пропорционален сопротивлению R » — мы остановимся более подробно. Хотя бы потому, что само слово «сопротивление» — «резистор» — входит (и не случайно!) в имя нашего главного героя.

Сопротивление, а точнее, электрическое сопротивление представляет собой характеристику какого-либо элемента или участка электрической цепи, подобно тому как диаметр труб является характеристикой нефтепровода, угол наклона — характеристикой шоссе, концентрация молекул — характеристикой газа. О каких же свойствах участка электрической цепи (или всей цепи в целом) говорит величина сопротивления? Сопротивление говорит о том, насколько большой ток может возникать на участке цепи под действием напряжения.

Если в двух разных участках электрической цепи под действием одного и того же напряжения возникают разные токи, то это может быть только потому, что сопротивление участков различно.

Существует еще одна характеристика цепи, которая называется проводимостью и представляет собой величину, обратную сопротивлению. О каком-либо участке цепи можно сказать, что у него малая проводимость, или, что то же самое, большое сопротивление. Проводимостью иногда пользуются при описании или расчете электрических цепей.

Упростив картину, можно сказать, что сопротивление какого-либо элемента цепи зависит от того, сколько в нем свободных зарядов. Если в участке цепи нет свободных зарядов, то по ней ток не пойдет. Да и какой может быть ток, если некому двигаться! Цепь разорвана, в нее включен изолятор, сопротивление которого бесконечно велико. Чем больше свободных зарядов в проводящем участке цепи, тем большим будет ток при одном и том же напряжении, тем, иными словами, меньше сопротивление этого участка цепи. Именно в этом смысле и нужно понимать вторую часть закона Ома: «...ток обратно пропорционален сопротивлению». А если вам понадобится определить сопротивление участка цепи, то для этого можно воспользоваться простой расчетной формулой, вытекающей из закона Ома (Воспоминание № 3).

Закон Ома говорит о том, что при неизменном сопротивлении $R_{вх}$ величина тока $I_{вх}$ зависит только от напряжения $U_{сиг}$. Увеличивается напряжение — растет и ток, уменьшается напряжение — и в такой же степени падает ток. А это значит, что график тока $I_{сиг}$ будет точной копией графика $U_{сиг}$. Поэтому понятие «электрический сигнал» в данном случае относится в равной степени и к напряжению, и к току, к этим спаренным характеристикам единого процесса.

Мы постепенно приближаемся к тому, чтобы выяснить, как работает транзисторный усилитель, как он усиливает слабый электрический сигнал. Но еще до этого нам предстоит задуматься над тем, что должно возрасти в результате усиления сигнала — ток или напряжение? Ответить на этот вопрос пс существу не просто, и в поисках ответа нам придется еще раз оглянуться назад.

Кроме закона Ома, есть еще одно очень важное соотношение, без понимания которого нечего и думать о знакомстве с электрическими цепями и тем более с электронными усилителями. Это соотношение касается мощности: электрическая мощность P равна произведению напряжения U на ток I (Воспоминание № 4). Строго доказать справедливость этого равенства не составляет труда, но для экономии времени мы докажем его с помощью нескольких упрощенных рассуждений.

Мощность — это работа, выполняемая за единицу времени. Единица мощности ватт ($вт$) соответствует работе в 1 джоуль ($дж$), которая выполнена за 1 секунду ($сек$).

Теперь о напряжении и токе.

Электрическое напряжение — например, напряжение на каком-либо резисторе — говорит о том, какую работу выполнит электрический заряд, пройдя по этому резистору. Если

заряд в 1 кулон (κ) (для того чтобы получить такой единственный заряд, достаточно собрать вместе $6,3 \cdot 10^{18}$ электронов) пройдет по участку цепи, на котором действует напряжение в 1 вольт (в), то этот заряд совершит работу 1 джоуль (дж). Приложите к тому же участку цепи напряжение 5 в, и работа, которую совершит каждый движущийся заряд, также увеличится в пять раз.

Что же касается тока, то его величина показывает, насколько интенсивно, насколько быстро и «густо» заряды двигаются по цепи. Чем больше зарядов проходит через какое-либо условное сечение цепи за единицу времени, тем больше ток. Единица тока — ампер (а) — соответствует одному кулону ($6,3 \cdot 10^{18}$ электронов), проходящему через это условное сечение за одну секунду.

Итак, напряжение — это работа, совершаемая одним кулоном, а ток — число кулонов в секунду. Для того чтобы подсчитать мощность P — полную работу, выполненную за секунду, — нужно работу одного кулона умножить на число работавших кулонов, то есть нужно напряжение U умножить на ток I .

Кстати, если увеличить напряжение на участке цепи в два раза, то выделяемая на этом участке мощность возрастет в четыре раза. И это вполне понятно: увеличение напряжения в два раза само по себе увеличит мощность в два раза да еще (согласно закону Ома!) вдвое увеличит ток в цепи. А увеличение тока приведет к тому, что мощность возрастет еще в два раза. Поэтому мы и получим увеличение мощности в четыре раза, и попробуйте против этого возразить!

Мощность, выделяемая на каком-нибудь резисторе, зависит и от его сопротивления. Но это, если можно так сказать, уже вторичная зависимость, поскольку от сопротивления зависят ток и напряжение, определяющие мощность. Зависимость мощности P от сопротивления R может оказаться довольно сложной. Придет время, и мы вынуждены будем поговорить об этой сложности. А пока, закончив экскурс в прошлое, в область основ электротехники, вернемся к поискам скульптора, к поискам копирующего устройства, которое позволит из постоянного тока, идущего от батареи B , создать мощную копию слабого сигнала.

Мы остановились на вопросе: «Что должно возрасти при усилении слабого сигнала — ток или напряжение?» Ответ прост: должна возрасти мощность.

Именно об этом и говорил приведенный ранее (стр. 9) пример с приемником. Именно об этом говорит и простая логика. Нам нужен сигнал-работник, способный с достаточной

силой раскачивать диффузор громкоговорителя или поворачивать антенну прилунившейся космической лаборатории. Нам нужен сигнал-работник, и в принципе безразлично, чем будет обеспечиваться его работоспособность — большой работоспособностью каждого движущегося заряда (то есть большим напряжением) или большим числом работающих зарядов (то есть большим током). А поэтому нам в принципе безразлично, что произойдет при усилении сигнала — увеличится ли ток $I_{\text{сиг}}$ при неизменном напряжении $U_{\text{сиг}}$, увеличится ли $U_{\text{сиг}}$ при неизменном $I_{\text{сиг}}$, возрастут ли обе эти величины, произойдет ли увеличение одной из них и уменьшение другой. Для нас важен результат: при усилении должна возрасти мощность сигнала.

Обратите внимание, что, говоря о своем безразличии к соотношению между током и напряжением, мы всегда оговариваемся — «в принципе». Эта оговорка нужна потому, что в каждом конкретном случае нам все-таки желательно получать мощность в «удобном виде». Например, при большом напряжении или при большом токе. Но прежде всего нам, конечно, необходимо получить мощность. А если потребителю сигнала понадобится изменить соотношение между током и напряжением, то это можно будет сделать, например, с помощью обычного трансформатора.

Заговорив о трансформаторе, хочется попутно сделать небольшое замечание, которое должно пролить свет на одну из заманчивых и, конечно, обманчивых возможностей совершить переворот в электронике.

Если бы можно было довольствоваться усилением только одной из составляющих мощности — только током или только напряжением, — то нечего было бы городить весь этот огород с батареей B и не с найденным нами пока еще скульптором. Роль усилителя мог бы выполнять трансформатор — повышающий, если нужно увеличить напряжение, или понижающий, если нужно увеличить ток. Однако трансформатор в принципе не может повысить мощность подведенного к нему сигнала — закон сохранения энергии не позволено нарушать никому. Повышая напряжение, трансформатор во столько же раз уменьшает ток, и наоборот: увеличивая ток, он понижает напряжение. А поэтому мощность на выходе трансформатора такая же (практически даже немного меньше из-за разного рода потерь), как и на его входе. Иными словами, трансформатор не может быть усилителем.

Следующий этап наших поисков можно было бы назвать «приручением» батареи. Не думая пока ни о каком усилении, нам нужно научиться отбирать от батареи B энергию не в виде

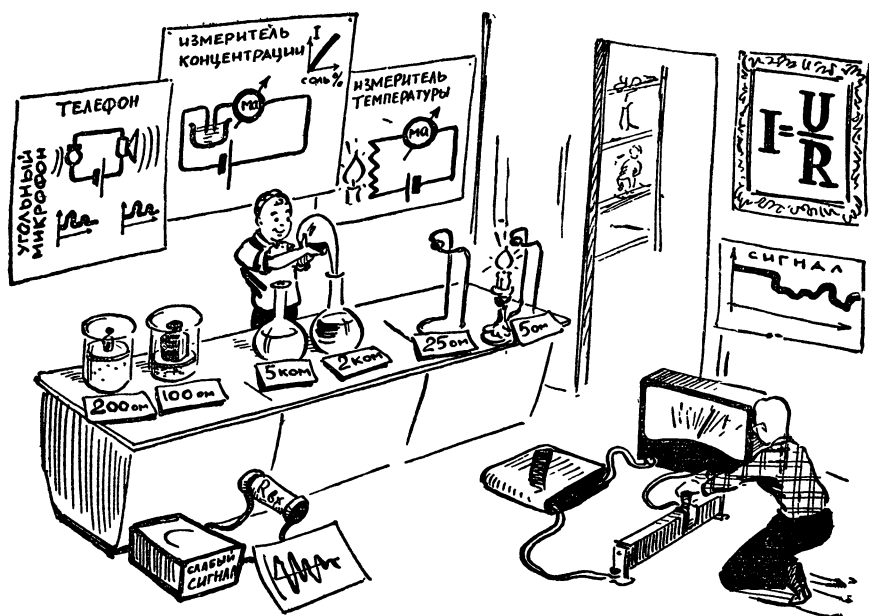


Рис. 6. Изменяя сопротивление в цепи батареи, можно отбирать от нее энергию не в виде постоянного, а в виде меняющегося тока, «рисую» таким образом сигнал нужной формы.

постоянного, а в виде меняющегося тока. Образно говоря, нужно научиться сминать наш кусок глины, научиться менять его форму, чтобы в дальнейшем можно было создать из него большую скульптуру.

Каким образом можно менять идущий от батареи B постоянный электрический ток? Мы не зря повторяли закон Ома — именно он и подсказывает ответ на этот вопрос. Поскольку ток зависит от напряжения и сопротивления и поскольку напряжение, которое дает батарея, практически не меняется, то нам остается только одно — менять сопротивление $R_{\text{вых}}$.

Менять это сопротивление можно разными способами (рис. 6). Проще всего, конечно, включить в качестве $R_{\text{вых}}$ обычный реостат и, двигая его ручку, «рисовать» ток с нужной формой графика. Можно вместо резистора ввести в цепь сосуд с каким-нибудь жидким проводником и управлять сопротивлением, а значит, и током, меняя химический состав жидкости. Можно включить в цепь устройства, которые меняют

свое сопротивление под действием тепла, света, радиоактивных излучений, растяжения или сжатия.

Представителем этого последнего типа устройств является хорошо всем знакомый угольный микрофон. В упрощенном варианте — это коробочка с угольным порошком, который под действием звуковых волн сжимается то сильнее, то слабее. Чем сильнее сжат порошок в коробочке, тем лучше контакт между отдельными его крупинками, тем меньше общее электрическое сопротивление порошка. Вот почему под действием звуковых волн сопротивление угольного микрофона меняется, послушно следуя за всеми изменениями звукового давления. В результате график изменения сопротивления, а значит, и график изменения тока (все тот же закон Ома!) полностью повторяет, копирует график звука. Батарея, в цепь которой включен микрофон, отдает энергию уже не в виде постоянного, а в виде меняющегося тока, в виде сложного электрического сигнала.

Итак, нам кое-что уже известно о загадочном скульпторе. По крайней мере, мы знаем, как работают его руки, как они меняют форму глиняной глыбы. Мы знаем — для того чтобы создать из постоянного тока сложный электрический сигнал, нужно менять сопротивление цепи. Но как сделать, чтобы сопротивление $R_{\text{вых}}$ менялось по команде слабого, усиливаемого сигнала, подобно тому как сопротивление микрофона меняется по команде звуковых колебаний? Решение этой задачи осложняется тем, что на изменение сопротивления $R_{\text{вых}}$ мы можем расходовать ничтожную мощность. Затрачивая доли ватта, усиливаемый сигнал должен менять сопротивление в такой степени, чтобы электрическая мощность, выделяемая на $R_{\text{вых}}$, менялась на единицы, а то и на десятки ватт. Возможно ли это в принципе? Не противоречит ли законам природы?

Внимательно посмотрев вокруг, вы увидите, как в некоторых случаях небольшие затраты энергии приводят к огромным энергетическим всплескам. Вы увидите, как в результате сложившейся обстановки, сложной взаимосвязи явлений или, наконец, благодаря искусственно созданным условиям «слабый» может управлять «сильным». Вот несколько примеров (рис. 7).

Давайте столкнем с горы лежащую на самом краю массивную каменную глыбу. Разогнавшись во время падения, она совершит работу (разумеется, не в житейском, а в физическом смысле слова), которая во много раз превысит затраты труда на сталкивание этой глыбы. Другой пример. Представьте себе взрывника, который легким нажатием на кнопку сносит огром-

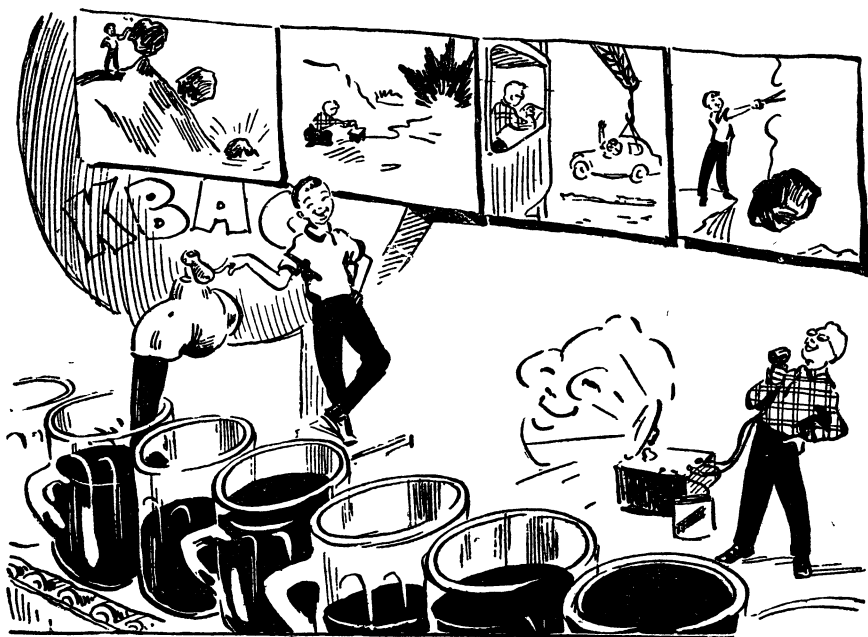


Рис. 7. Существует много различных процессов, в которых, затрачивая небольшую энергию, можно управлять большими энергетическими потоками.

ную, весом в тысячи тонн, гору, вставшую на пути строителей дороги. И еще пример. С легкостью вращая водопроводный кран, вы управляете довольно сильным потоком воды и создаете своего рода мощную копию слабого механического сигнала, исходящего от вашей руки.

Мы не будем сейчас говорить об общих свойствах и закономерностях систем, в которых какое-либо слабое воздействие управляет большой энергией. Нам предстоит решить более важную для дела задачу: самим создать такую систему, создать управляющее устройство, которое позволит менять сопротивления $R_{\text{вых}}$ с помощью слабого сигнала, протекающего в цепи $R_{\text{вх}}$.

В качестве первого шага сделаем некое формальное, не раскрывающее существа дела изображение такого управляющего устройства (рис. 8). Пока еще это «черный ящик» — неизвестный прибор, в котором встречаются друг с другом резисторы $R_{\text{вх}}$ и $R_{\text{вых}}$.

Электрическую цепь нашего «черного ящика», куда включен $R_{\text{вх}}$, назовем входной цепью, а цепь, куда включен $R_{\text{вых}}$, —

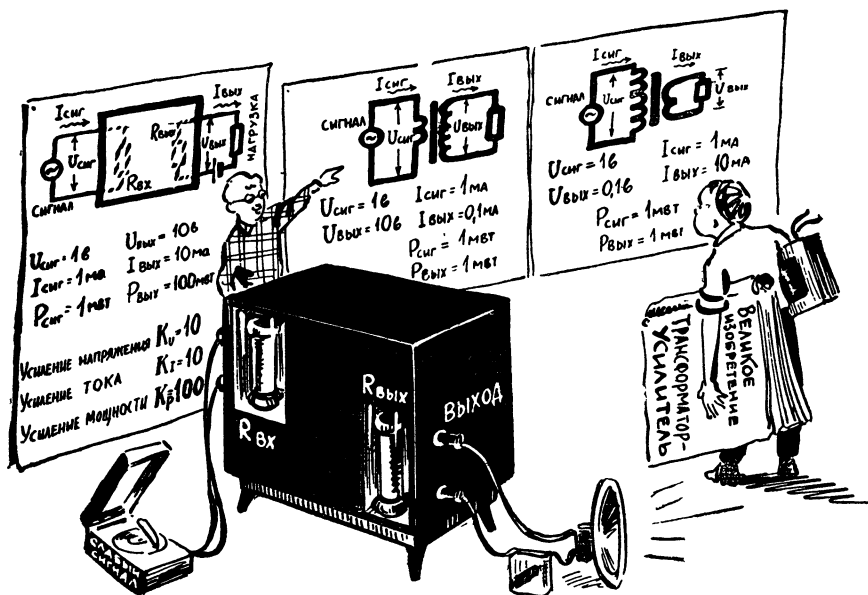


Рис. 8. В отличие от трансформатора, усилитель должен повышать мощность сигнала, а не только один ток или одно напряжение.

выходной цепью. Такие названия вполне оправданы. В «черный ящик» со стороны условного генератора «Слабый сигнал» должен войти этот слабый сигнал, а со стороны мощного источника энергии — батареи B — должен выйти мощный, усиленный сигнал. Отсюда и ясно, где нужно вешать табличку «Вход», а где «Выход».

Давайте представим себе, что наш управляющий прибор, наш «черный ящик» уже работает. Что мы знаем о нем и что должны узнать?

Мы знаем, что в цепи $R_{\text{вх}}$ действует слабый сигнал, что он каким-то образом меняет величину $R_{\text{вых}}$ и в результате в цепи этого сопротивления появляется усиленный сигнал. Теперь нужно выяснить, что скрывается за словами «каким-то образом». Нужно найти такой физический процесс, который позволил бы слабому входному сигналу в нужной степени менять величину выходного сопротивления.

Итак, дальнейший маршрут ясен. Путешествие продолжается. Сейчас нам предстоит «по пути» заглянуть в мир молекул и атомов.

ВЕЛИКОЛЕПНАЯ ЧЕТВЕРКА

Мы часто представляем себе атом как некую, разумеется, чрезвычайно маленькую, планетарную систему. В центре ее находится ядро — сравнительно тяжелый шар с положительными электрическими зарядами. Вокруг ядра, как планеты вокруг Солнца, вращаются шарики-электроны. Картина эта наглядна, ее легко себе представить, но, конечно же, такая планетарная модель весьма примитивна. Она, по-видимому, не больше похожа на настоящий атом, чем вылепленная из пластилина фигурка на настоящего, живого человека.

Электроны — это вовсе не шарики, а скорее какие-то во многом еще загадочные сгустки материи, которые иногда ведут себя как частицы, а иногда — как волны. Кроме того, движутся электроны совсем не по спокойным круговым или эллиптическим орбитам — они как бы размазаны по сферам, распределены в пространстве вокруг ядра в виде своего рода электронных оболочек. Ну, а само ядро — это непрерывно бурлящий котел, где происходят самые непонятные превращения материи и энергии, рождаются и умирают известные и неизвестные пока частицы. Да что там говорить! Планетарная модель — это примитивная игрушка, которую можно признать за атом, только находясь в крайне тяжелом положении. И именно в таком положении мы сейчас находимся.

Наш путь к транзистору проходит через многие области науки. В каждой из них, как в самостоятельной стране, есть свой язык, свои обычаи и законы, свои достопримечательности. И если мы хотим с минимальными потерями времени и сил прийти к своей конечной цели, то не должны, как это ни печально, подробно знакомиться с каждой встречной страной. Вот почему, отказавшись от знакомства с современными представлениями о строении атома, мы будем пользоваться его упрощенной планетарной моделью. Она нужна нам для того, чтобы показать, как атомы соединяются друг с другом.

Прежде всего отметим, что электронные орбиты располагаются не где угодно, а лишь на определенных расстояниях от ядра. И количество электронов на той или иной орбите тоже строго ограничено — таковы непоколебимые законы атомной архитектуры. На первой орбите — счет идет от ядра — может находиться не больше двух электронов. (Фактически следовало бы говорить о первом слое орбит, о двух очень близких орбитах. Но раз уж мы пошли на упрощения, то представим себе, что оба электрона вращаются по одному и тому же кругу.) На второй орбите не может быть больше восьми электронов, на третьей — не больше восемнадцати, и так далее.

Нас сейчас будет интересовать только последняя, внешняя орбита. Во-первых, потому, что именно внешние электроны участвуют в соединении атомов. Во-вторых, именно внешние электроны, сорвавшись со своих орбит, включаются в электрический ток. И, как вы увидите чуть дальше, именно события, происходящие на внешних орбитах некоторых атомов, используются в транзисторах при усилении слабых сигналов.

Число электронов на внешней орбите тоже ограничено: ни в одном атоме их не может быть больше восьми. Причем атом всегда стремится, чтобы его внешняя орбита была полностью заселена, чтобы число электронов на ней было доведено до максимума, то есть до восьми. Либо — пусть лучше будет так — чтобы этих электронов не было вообще. Вот почему, если у какого-нибудь атома на внешней орбите мало электронов, то он стремится их отдать. А если электронов много и нужно лишь чуть-чуть потрудиться, чтобы довести их количество до восьми, то атом стремится притянуть к себе чужой электрон, причем желательно вместе с его атомом.

Но зачем же, спросите вы, тащить к себе электроны вместе с атомами (это все равно, что принести домой пирожное вместе с прилавком магазина), если вокруг довольно часто бегают свободные, сорвавшиеся со своих орбит электроны? А дело в том, что для атома нет смысла сажать к себе на орбиту свободный электрон. Во-первых, он не сядет, а если даже сядет, то все равно долго не усидит. Ведь атом в целом электрически нейтральная система — общий отрицательный заряд его электронов уравнивается суммарным положительным зарядом ядра. Поэтому электрические силы, несмотря на желание атома иметь заполненную внешнюю орбиту, вытолкнут попавший туда свободный электрон с его лишним отрицательным зарядом.

Другое дело, если пустующее место на внешней орбите займет электрон, вращающийся одновременно по своей собственной орбите в своем собственном атоме. В этом случае возникает некая объединенная орбита, охватывающая оба атома. И они будут прочно соединены этим теперь уже общим, бегающим по объединенной орбите электроном. Причем такое объединение не встретит противодействия электрических сил ни одного из атомов, потому что число электронов в каждом из них осталось без изменений и электрическое равновесие атомов не нарушилось.

ПРИМЕЧАНИЕ. Здесь, пожалуй, чаще, чем в других местах книги, рассказывая об атомах, электронах и других физических объектах, мы применяем такие, например, выражения, как «электрон стремится», «для атома нет смысла», «ядро

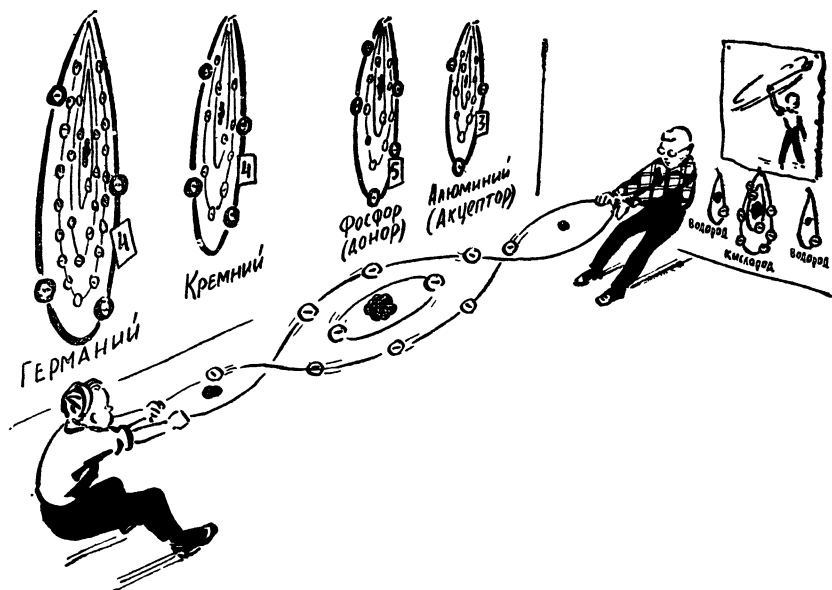


Рис. 9. Создавая объединенные орбиты, внешние электроны связывают атомы друг с другом.

не хочет», «заряды бегают». Разумеется, все, в том числе и автор, понимают, что ни о каком беге электронов или желаниях атомного ядра в действительности не может быть и речи. Автор позволяет себе столь свободное обращение с житейскими, бытовыми понятиями только лишь из боязни выпустить на эти страницы огромное количество слов и символов, которое необходимо для достаточно аккуратного, достаточно строгого изложения сути дела.

Итак, объединенные орбиты — это своего рода нити, сшивающие атомы между собой (рис. 9). И именно со способностью создавать разнообразные и устойчивые объединенные орбиты связано исключительное многообразие, например, углеродистых соединений. Дело в том, что на внешней орбите атома углерода — четыре электрона и четыре свободных места. А это является хорошей предпосылкой для прочного соединения атомов углерода друг с другом и с такими распространенными элементами, как водород и кислород. При этом возникают симметричные и, главное, устойчивые пространственные конструкции.

Один из таких архитектурных шедевров — кристаллическая решетка алмаза, в которой каждый атом углерода отдает свои четыре внешних электрона четырем соседям и четыре электрона получает от них — по одному от каждого соседнего атома. И тот электрон, который отдается, и тот, который берется, становятся общими для того, кто дает, и для того, кто берет. Поэтому на внешней орбите атома оказывается восемь электронов (полностью заселенная орбита), и все они прочно связывают этот атом с его четырьмя соседями. Так и возникает красивая и исключительно прочная кристаллическая решетка алмаза — решетка алмазного типа.

Кроме углерода, есть еще несколько элементов с четырьмя электронами, а значит, и с четырьмя вакантными местами на внешней орбите. Два таких элемента — германий и кремний — интересуют нас больше всего. Оба они образуют кристаллическую решетку алмазного типа, оба по своим электрическим свойствам являются полупроводниками.

Как это ни странно, но, продвинувшись уже довольно далеко на пути к полупроводниковому триоду, мы только сейчас получили возможность выяснить, что же такое полупроводник.

Уже говорилось, что электрическое сопротивление того или иного элемента электрической цепи, а значит, и вещества, из которого этот элемент сделан, зависит от количества свободных электрических зарядов в нем. Еще очень давно все вещества по их электрическим свойствам разделили на две группы: проводники (металлы, целый ряд растворов, газы в определенном состоянии) и изоляторы, или диэлектрики (стекло, резина, дерево и масса других веществ). Такое деление, разумеется, не отражает многих сложных процессов, с которыми связано появление свободных электрических зарядов. И все же, рассматривая атом в упрощенном виде, попытаемся выяснить, чем проводники отличаются от изоляторов.

Главная особенность всякого твердого проводника состоит в том, что у огромного числа его атомов электроны убежали (см. примечание на стр. 26) с внешних орбит и гуляют в межатомном пространстве. Обычно электроны легче всего срываются с внешней орбиты в том случае, когда их на этой орбите мало. У атомов таких прекрасных проводников, как медь и серебро, на внешней орбите всего по одному электрону, у цинка и ртути — по два, у атомов алюминия — три электрона.

Атомы изолятора, напротив, очень устойчивы. Электроны в них прочно связаны с ядром и своих орбит не покидают. Конечно, нет правил без исключения. Бывает, что и в изоляторе какой-нибудь электрон нарушит дисциплину и сорвется со своей орбиты. В разных изоляторах среднее число таких на-

рушений неодинаково — изоляторы бывают хорошими и плохими, а идеальных изоляторов вообще нет.

Выскакивание электронов из атома — это результат его тепловых колебаний. Чем выше температура, тем энергичнее колеблется атом на своем месте в кристаллической решетке, тем больше вероятность выскакивания его электронов с внешней орбиты. Лишь при температуре абсолютного нуля ($-273,2^{\circ}\text{C}$) тепловые колебания атомов полностью прекращаются, и в любом изоляторе, даже в самом плохом, вообще не оказывается свободных зарядов.

Для того чтобы не пользоваться такими расплывчатыми понятиями, как «хороший» и «плохой», можно организовать точный учет электронов, которые, срываясь со своих орбит, блуждают в межатомном пространстве изолятора.

Вырежем из проверяемого изоляционного материала кубик со стороной 1 см , подведем к нему напряжение в 1 в и будем измерять ток в созданной нами электрической цепи (рис. 10). Если кубик сделан из идеального изолятора, в котором ни один электрон не покидает своей орбиты, то свободных зарядов в кубике не будет, а значит, не будет и тока в цепи. В цепи, куда включен реальный изолятор, ток обязательно появится, и чем хуже изоляционные свойства кубика, чем больше в нем электронов-нарушителей, тем больше этот ток.

Для начала включим в нашу испытательную цепь кубик из чистого каучука. Прибор покажет ток 1 пикоампер , то есть $0,000\,000\,000\,001\text{ ампера}$. Легко подсчитать (нужно лишь вспомнить, что $1\text{ а} = 1\text{ к}/1\text{ сек}$ и $1\text{ к} = 6,3 \cdot 10^{18}$ зарядов электрона), что при таком токе через поперечное сечение каучукового кубика каждую секунду проходит около $6\,300\,000$ свободных электронов. Пусть вас не пугает эта цифра — она не так уж велика. Если бы мы испытывали кубик из проводника, например, из серебра, то ток в цепи достиг бы $1\,000\,000$ ампер, и каждую секунду через поперечное сечение серебряного кубика проходило бы $6\,300\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000$ свободных электронов. В сравнении с этой астрономической цифрой число свободных электронов в каучуковом кубике, конечно, очень мало, и его смело можно считать изолятором.

Согласитесь, что не очень удобно каждый раз подсчитывать число свободных электронов,двигающихся в кубике проверяемого материала. Во всяком случае, это не принято — вместо того чтобы считать заряды, обычно вычисляют электрическое сопротивление кубика. Сделать это довольно просто. Мы знаем напряжение U , подведенное к кубику (1 в), знаем ток I , который по нему проходит, а значит, можем по одной из формул закона Ома (рис. 10) подсчитать и сопротивление

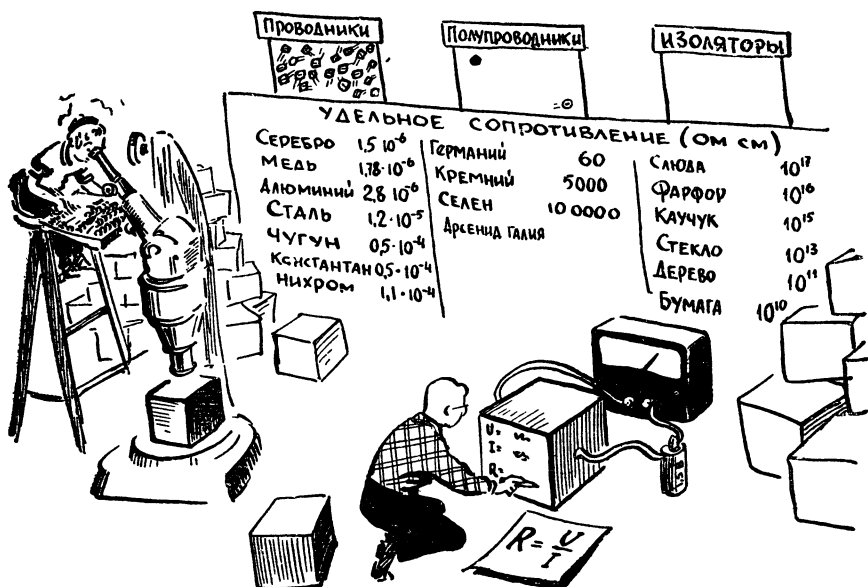


Рис. 10. Проводники, полупроводники и изоляторы в основном различаются количеством и подвижностью свободных электрических зарядов.

ние R . Полученную величину называют удельным сопротивлением, подобно тому как удельным весом называют вес одного кубического сантиметра вещества. Величина удельного сопротивления — она измеряется в омах на сантиметр ($ом \cdot см$) — показывает, какое сопротивление имеет сделанный из того или иного материала кубик с ребром в 1 см.

Удельное сопротивление четко характеризует изоляционные свойства материала, дает представление о наличии в нем свободных зарядов и, в частности, о «свободолюбии» (см. примечание на стр. 26) входящих в атомы электронов. Чем меньше свободных зарядов в том или ином веществе, тем хуже оно проводит электрический ток, или, если говорить об этом другими словами, тем больше удельное сопротивление вещества.

В арсенале природы имеются вещества с самым различным значением удельного сопротивления — от миллиарда миллиардов ом до миллиардных долей ома.

Еще недавно их делили на две группы, и условная граница между ними проходила где-то в районе удельного сопротивления $0,01—100 \text{ ом} \cdot \text{см}$. Все вещества с большим сопротивлением относили к изоляторам, а с меньшим — к проводникам.

В дальнейшем оказалось удобным выделить в имеющемся «наборе» некоторую промежуточную группу веществ с удельным сопротивлением от $0,0001 \text{ ом}\cdot\text{см}$ до $10\,000\,000 \text{ ом}\cdot\text{см}$. Эти вещества и получили название полупроводников, хотя с таким же успехом их можно было назвать полуизоляторами.

Удельное сопротивление германия составляет примерно $50 \text{ ом}\cdot\text{см}$, кремния — $1\,000\,000 \text{ ом}\cdot\text{см}$. Обе эти цифры относятся лишь к химически чистым веществам: даже небольшие доли примесей могут менять удельное сопротивление германия и кремния во много тысяч раз. Чтобы понять, как происходит такое резкое изменение электрических свойств полупроводника, нам придется несколько дополнить свои представления о возникновении и передвижении свободных электрических зарядов. Для этого мы сейчас мысленно нарисуем две очень упрощенные картинки, которые хотя и несколько искажают действительность, но зато позволяют в простом виде представить себе очень сложный процесс.

Для начала попробуем представить себе электрический ток в полупроводнике как упорядоченное движение одних только свободных электронов. Выглядит оно примерно так. Под действием электрического напряжения электроны сравнительно медленно движутся в межатомном пространстве, не переставая при этом совершать свои (см. примечание на стр. 26) беспорядочные рывки в разные стороны. Сами же атомы неподвижны, так как они прочно связаны друг с другом в кристаллической решетке. Дав свободу некоторым своим электронам, пустив их путешествовать в межатомное пространство, атомы утратили тем самым былые электрическое равновесие и превратились в положительные ионы.

Кроме длинных, безостановочных путешествий, свободные электроны, создающие ток, могут совершать и короткие перебежки. Выскочит такой слабенький (с небольшим запасом энергии) электрон из своего атома и тут же попадет на пустующее место в соседнем атоме. В результате свой собственный атом превратится в положительный ион, а положительный ион, давший приют электрону-беглецу, станет нейтральным атомом.

Представьте себе, что электрон перебежал из атома в атом очень быстро и вы даже не успели заметить, когда все это произошло. Как в этом случае воспримете вы происшедшее событие? Вы увидите, как в твердом полупроводнике сдвинулся с места положительный ион (рис. 11).

Положительный заряд,двигающийся в полупроводнике в результате коротких перебежек электронов, называют дыркой. Это весьма образное название. В результате коротких

перебежек электронов действительно двигаются пустующие на внешней орбите места, двигаются дырки в электронных оболочках атомов. И несмотря на то что первопричиной всего, что происходит, является движение электронов, несмотря на то что при этом сами атомы в твердом теле своих мест не меняют (движение положительных и отрицательных ионов наблюдается лишь в жидких и газообразных веществах, где атомы и молекулы слабо связаны друг с другом и сравнительно легко передвигаются с места на место), мы все же будем считать, что в твердом полупроводнике имеются свободные положительные заряды — подвижные дырки.

Атомы-то ведь все одинаковые — не поймешь, кто кем был и кто кем стал, не поймешь, у кого чей электрон вращается на орбите. (Еще раз просим прочесть примечание на стр. 26, хотя читатель уже, по-видимому, сам знает, в каких случаях нужно обращаться к этому примечанию, и будет это делать без лишних напоминаний.) И поэтому, не пытаясь разобраться в поведении отдельных электронов-перебежчиков, мы будем оценивать лишь конечный результат их деятельности. А таким результатом как раз и является движение положительных зарядов, движение дырок.

Совершенно ясно, что под действием приложенного напряжения в полупроводнике будут упорядоченно двигаться не только электроны-путешественники, но и электроны-перебежчики. Бросаясь из стороны в сторону, они все чаще будут сдвигаться в сторону «плюса» батареи. А это значит, что в хаотическом движении дырок появится некоторая упорядоченность — они медленно и планомерно будут смещаться в сторону «минуса».

Здесь нельзя не вспомнить хорошо известную аналогию. В театре во время спектакля освободилось место в первом ряду. На него сейчас же пересел зритель со второго ряда. На место, освободившееся во втором ряду, пересел зритель из третьего ряда. На его место пересел кто-то из четвертого ряда, и так продолжалось до тех пор, пока свободное место не оказалось в самом последнем ряду. С места на место перебежали люди (электроны-перебежчики), а в результате по залу от первого ряда до последнего переместилось свободное место (дырка).

Теперь, чтобы окончательно не запутаться, давайте вообще забудем о существовании наших электронов-перебежчиков и будем считать, что в полупроводнике электрический ток представляет собой движение двух сортов зарядов — свободных электронов и дырок, что полупроводник обладает электронной и «дырочной» проводимостью.

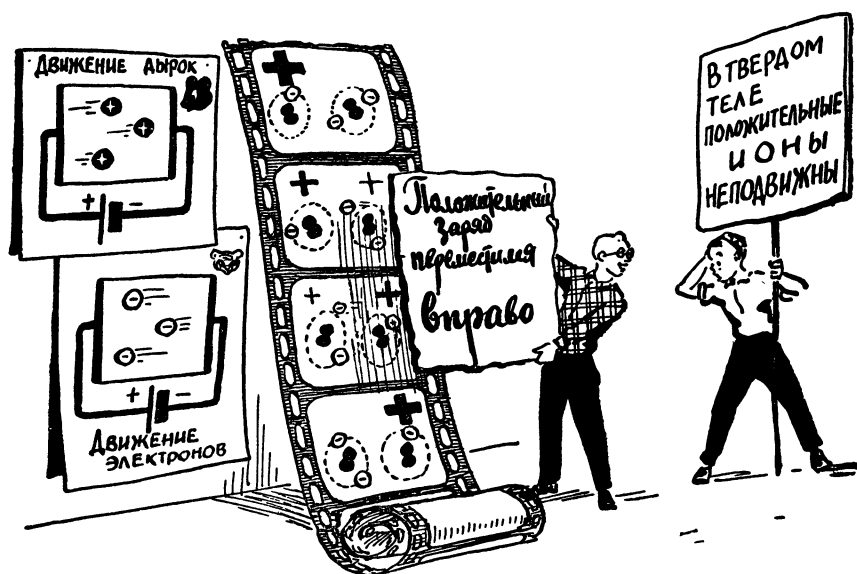


Рис. 11. Переход электрона из одного атома в другой можно рассматривать как движение положительного заряда в противоположную сторону — движение дырки.

Подобный прием — исключение из игры электронов-переходчиков — можно считать вполне оправданным: нельзя же всякий раз начинать свои рассуждения «от печки». Изучая автомобиль, например, вы только один раз подробно познакомитесь с двигателем. А потом, разбираясь в устройстве коробки скоростей или в передаче вращения от двигателя к задним колесам, вы уже не будете начинать с того, как в карбюраторе образуется горючая смесь.

Вас ни в какой мере не должно смущать, что участвующие в электрическом токе свободные электроны и дырки движутся в разные стороны. В твердом теле настолько просторно, что эти движения друг другу не мешают.

При этом каждый из движущихся зарядов, независимо от своих коллег (вы не забываете о примечании на стр. 26?), выполняет свою работу. Поэтому, определяя ток в цепи или мощность на каком-либо ее участке, необходимо учитывать движение и отрицательных, и положительных зарядов. Так, например, если через поперечное сечение проводника (или полупроводника) в каком-либо определенном направлении за одну секунду прошел кулон электронов, а в другую сторону одновременно прошел кулон дырок, то ток в цепи равен 2 а .

В чистом, беспримесном полупроводнике число свободных электронов и число дырок одинаково.

Однако для создания транзисторов нужны полупроводниковые материалы с разными типами проводимости — только с электронной или только с дырочной. Это значит, что у одних материалов число свободных электронов должно во много раз превышать число дырок, чтобы в этих полупроводниках возникал в основном электронный ток. А у других материалов, наоборот, дырок должно быть намного больше, чем свободных электронов, и ток в них должен создаваться в основном только дырками. При этом общий заряд куска германия или кремния должен быть равен нулю — в целом в нем не должно быть никаких лишних зарядов.

Вот так задача! Это уже почти то же самое, что залезть в шар и стать там в угол. Как можно, например, добавить в полупроводник свободные положительные заряды, не меняя общего числа зарядов в этом полупроводнике? Каким образом, не нарушая электрического равновесия полупроводника, можно получить в нем избыток тех или иных свободных зарядов? Это можно сделать, добавляя в чистый полупроводник определенные примеси.

Дело в том, что в кристаллах углеродного семейства — в германии и кремнии — действует неписанный закон: «Структура важнее всего». Это значит, что если ради сохранения своей прекрасной алмазоподобной кристаллической решетки атомы должны принести какие-либо жертвы, то эти жертвы будут принесены: «Структура важнее всего».

Вот что произойдет, например, если в чистый германий во время его плавки добавить атом мышьяка. Такой большой предмет, как атом мышьяка, не может находиться где-то в межатомном пространстве, и поэтому при затвердевании расплава он займет место в кристаллической решетке наравне с атомами самого германия.

Но у мышьяка на внешней орбите не четыре электрона, а пять. И этот пятый электрон никак не сможет найти себе места в четкой системе межатомных связей — ведь каждый атом, который входит в решетку алмазного типа, может отдать соседям только четыре электрона. И, подчиняясь закону «Структура важнее всего», пятый электрон уйдет с орбиты в дальние странствия, а сам атом мышьяка превратится в положительный ион (рис. 12).

Обратите внимание — мы не называем этот ион дыркой. Вцепившись своими четырьмя электронами в соседей, атом мышьяка не сможет ни взять электрон со стороны, ни отдать его. Этот положительный ион — атом мышьяка — будет не-

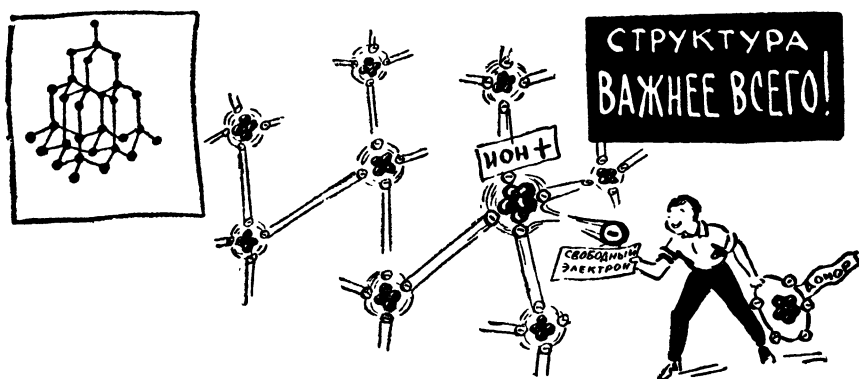


Рис. 12. При введении донорной примеси в полупроводниковом кристалле появляются свободные электроны и неподвижные положительные ионы.

подвижно стоять на месте, не участвуя в создании электрического тока. Вот почему, добавляя в германий или кремний атомы с пятью электронами на внешней орбите, мы создаем в этих полупроводниках дополнительную электронную проводимость, не увеличивая дырочной проводимости и не нарушая общего электрического равновесия кристалла.

Примеси, которые увеличивают электронную проводимость полупроводника, называются донорными примесями. Слово «донор» означает «отдающий» и говорит о том, что примесь как бы добавляет в полупроводник свободные электроны.

Обратный результат можно получить, если добавить в чистый германий (или кремний) атомы с тремя электронами на внешней орбите; например, атомы лития. Для того чтобы не показаться чужаком и не испортить структуры — «Структура важнее всего!» — такой атом поместит к себе на орбиту чужой электрон, естественно, украденный у нейтрального атома германия. А поскольку этот чужой, четвертый электрон будет для лития лишним, то атом лития превратится в неподвижный отрицательный ион. Сам же атом германия, отдавший электрон пришельцу, станет дыркой — этот атом всегда с радостью примет на свободное место в своей внешней орбите любой электрон-перебежчик.

Вывод прост: добавляя в германий или кремний атомы с тремя электронами на внешней орбите, мы создаем в этих полупроводниках дополнительную дырочную проводимость, не увеличивая электронной проводимости. И опять-таки не нарушая общего электрического равновесия (рис. 13).

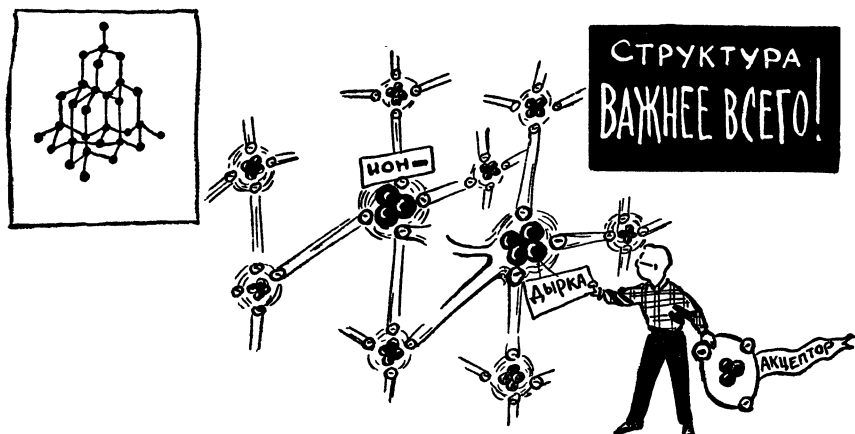
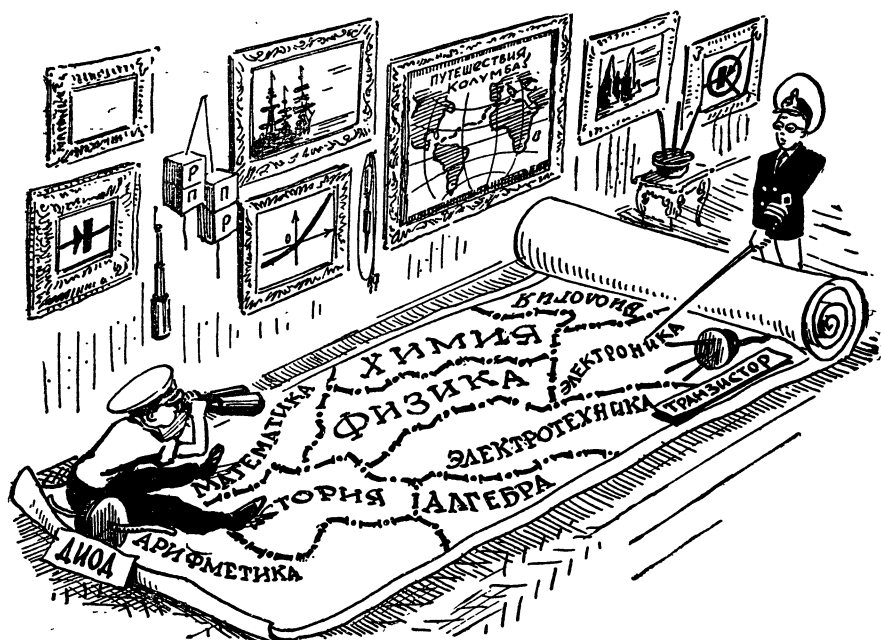


Рис. 13. При введении акцепторной примеси в полупроводниковом кристалле появляются свободные положительные заряды (дырки) и неподвижные отрицательные ионы.

Примеси, которые увеличивают дырочную проводимость полупроводника, называются акцепторными примесями. Слово «акцептор» означает «отбирающий» и говорит о том, что примесь как бы отбирает у полупроводника свободные электроны и основным типом свободных зарядов становятся дырки.

После долгих блужданий по трудным дорогам физики и химии мы получили наконец те самые бесценные материалы, которые нужны для изготовления нашего управляющего прибора, нашего скульптора. Именно эти материалы — полупроводники с электронной или дырочной проводимостью — позволят нам искусственно создать процесс для управления мощными потоками энергии с помощью слабого электрического сигнала. Прибор, в котором будет осуществляться такое управление, как вы уже, конечно, догадались, и есть полупроводниковый триод — транзистор. Но, получив наконец возможность непосредственно познакомиться с главным героем нашей книги — с полупроводниковым триодом, мы в интересах дела ненадолго отложим это знакомство и сначала выясним, как устроен и как работает полупроводниковый диод.



Глава II

ОТ ДИОДА ДО ТРИОДА

Не подумайте, пожалуйста, что знакомство с полупроводниковым диодом — это отклонение от главного пути. Диод — своего рода составная часть транзистора, и транзистор можно рассматривать как два объединенных в одно целое полупроводниковых диода. Вот почему знакомиться с диодом мы будем достаточно подробно, считая, что при этом мы одновременно знакомимся и с транзистором. Кроме того, диод как самостоятельный элемент весьма часто встречается в электронной аппаратуре, в том числе и в схемах, которые будут описаны в этой книге. Познакомившись с принципом работы и устройством диода, мы рассмотрим несколько практических схем с его участием и тем самым положим начало той части нашего путешествия, для которой нужен уже не только карандаш, но и паяльник.

МАНЕВРЫ НА ГРАНИЦЕ

Имеющихся у нас знаний вполне достаточно, чтобы построить некий условный полупроводниковый диод (рис. 14).

Возьмем кусок чистого германия (с равным успехом можно взять и кремний, но мы для определенности ограничимся пока одним из этих полупроводников) и с одной стороны введем в него донорную примесь, с другой — акцепторную. Это значит, что в половине кристалла будет преобладать электронная проводимость, в другой — дырочная. По количеству зон с разной проводимостью построенный нами прибор как раз и получил свое название «диод»: приставка «ди» означает «два». Название это появилось намного раньше самого полупроводникового диода и относилось к некоторым другим приборам с двумя электродами и двумя выводами от них.

Влияние примесей на электрические свойства полупроводниковых материалов огромно. Так, например, если в германий добавить по весу лишь одну миллионную часть мышьяка, то число свободных электронов в германии увеличится в тысячи раз! Подобным же образом миллионные весовые доли акцеп-

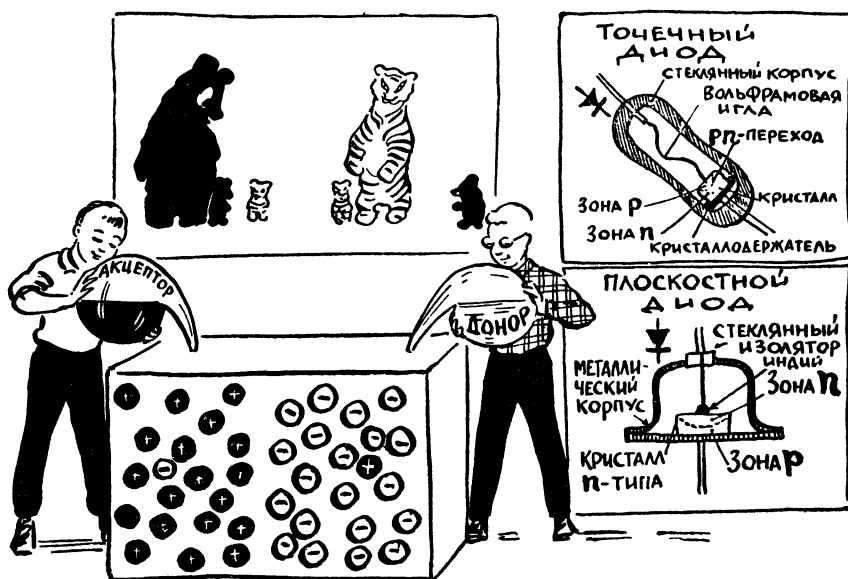


Рис. 14. Полупроводниковый диод — это прибор, в котором созданы две зоны с разным типом примесной проводимости: зона p и n .

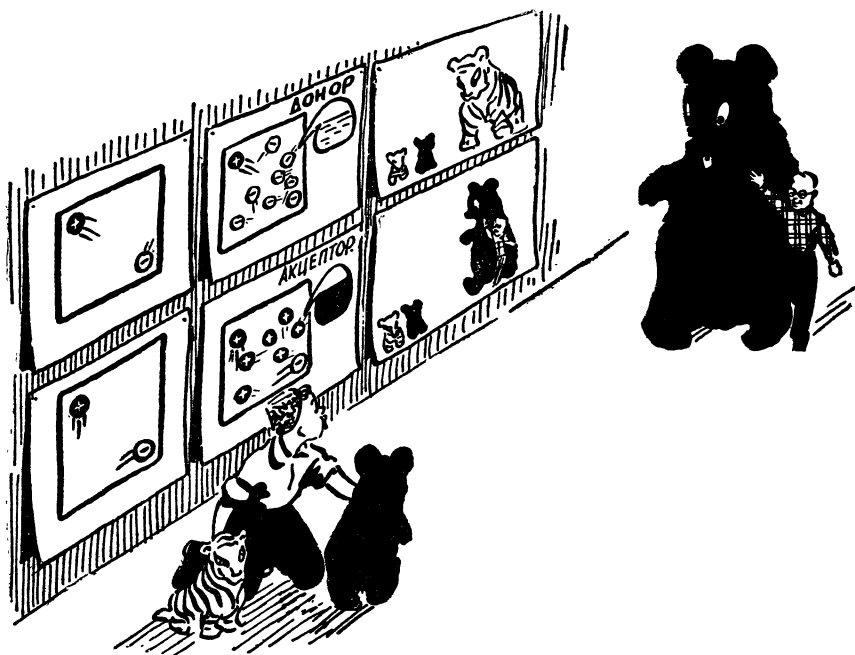


Рис. 15. После введения примеси в полупроводнике оказывается два вида зарядов — примесные (основные) и очень небольшое количество собственных (неосновных) зарядов.

торной примеси — например, лития — в тысячи раз повышают дырочную проводимость полупроводника.

Объясняется столь сильное влияние примесей довольно просто. Дело в том, что своих собственных электронов и дырок в чистом германии немного. Далеко не каждый его атом выпускает на свободу свой электрон — в противном случае этих электронов было бы очень много и вместо полупроводника мы имели бы обычный проводник. В среднем при комнатной температуре на каждый миллиард атомов германия приходится лишь один свободный электрон.

В то же время каждый атом донорной примеси, занявший место в кристаллической решетке, обязательно один из пяти своих внешних электронов выбрасывает в межатомное пространство. Ведь для связи с соседями нужны лишь четыре электрона: как известно, «структура прежде всего».

Теперь посчитаем. Если вес примеси составляет миллионную часть веса германия (мы считаем вес атомов германия и примеси одинаковым и миримся с ошибкой на несколько процентов), то на каждый миллиард атомов германия приходится тысяча атомов примеси, потому что миллионная часть

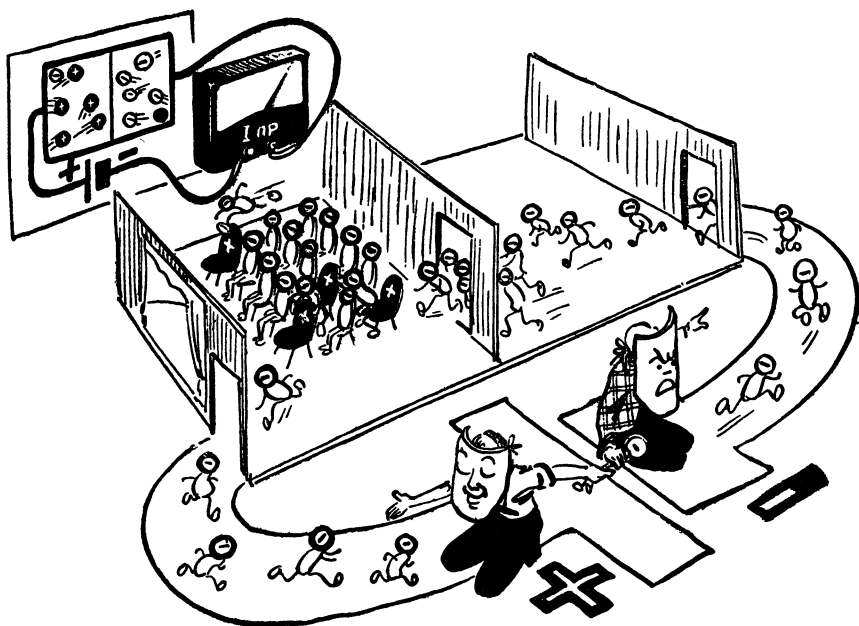


Рис. 16. Прямое включение диода; электроны и дырки движутся к границе *pn*-перехода, в цепи протекает довольно большой прямой ток — ток основных зарядов.

миллиарда и есть тысяча. А это значит, что на каждый миллиард атомов германия теперь приходится один собственный свободный электрон и тысяча свободных электронов, принесенных примесью.

Отсюда следует очень важный вывод: поскольку число собственных свободных электронов равно числу собственных дырок, то благодаря введению примеси электронная проводимость германия окажется примерно в тысячу раз больше дырочной. В таких случаях говорят, что в полупроводнике имеются основные (это те, которых много) и неосновные (те, которых мало) носители электрического заряда. В нашем примере основные носители заряда — это, конечно, электроны, а неосновные — дырки. Если же ввести в германий акцепторную примесь, то свободных электронов окажется несравненно меньше, чем дырок, и именно дырки будут основными носителями электрического заряда, то есть основными свободными зарядами, способными создавать ток (рис. 15).

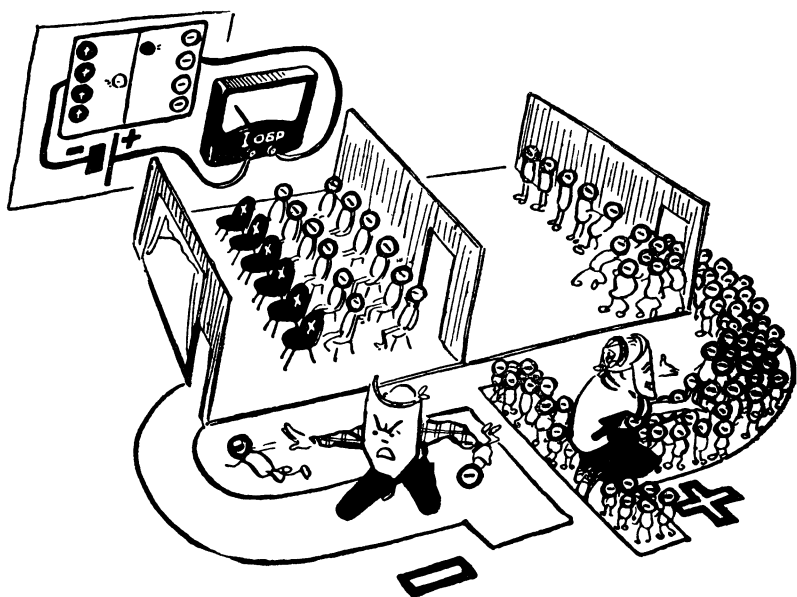


Рис. 17. Обратное включение диода; электроны и дырки оттягиваются от границы pn -перехода, в цепи протекает очень небольшой обратный ток — ток неосновных зарядов.

С неосновными носителями, неосновными свободными зарядами мы сейчас поступим так же, как в свое время поступили с электронами-перебежчиками. Для упрощения общей картины мы временно вычеркнем их из своего списка.

Теперь наш полупроводниковый диод выглядит так. В одной его половине имеются только свободные электроны. Эта часть диода называется зоной — n , от слова *negativus*, то есть отрицательный. В другой части диода есть только носители положительного заряда — дырки. Это зона p — ее название происходит от слова *positivus*, то есть положительный. Довольно часто буквы n и p вводят в характеристику самого полупроводникового материала и говорят: «германий n -типа», «германий p -типа» или «кремний n -типа», «кремний p -типа». Эти названия указывают, какая примесь — донорная или акцепторная — была введена в кристалл и, таким образом, какая проводимость — электронная или дырочная — является основной в данном кристалле.

В любом полупроводниковом приборе, где есть зоны с разным типом проводимости, граница между этими зонами носит название «*pn*-переход» (по-русски это звучит так: «пэ-эн-переход»). Такое же название, разумеется, носит пограничная область между зоной *p* и зоной *n* в нашем полупроводниковом диоде.

Мы с вами построили полупроводниковый диод. Посмотрим теперь, что он умеет делать.

Включим диод в электрическую цепь, для начала в цепь постоянного тока. Обратите внимание, у нас есть две возможности включения: можно подключить диод зоной *p* к «плюсу» батареи и зоной *n* — к «минусу»; а можно наоборот: к «плюсу» подключить зону *n* и к «минусу» — зону *p*.

Для лампочки карманного фонаря, например, или для электроплитки совершенно безразлично, в какую сторону через них пойдет ток, был бы лишь ток. Эти приборы одинаково хорошо светят и греют при любом направлении тока. А вот поведение полупроводникового диода прежде всего зависит от направления тока, от того, какая зона диода подключена к «плюсу», а какая к «минусу» батареи. Поэтому мы рассмотрим оба варианта включения.

Начнем с первого.

Итак, «плюс» батареи подключен к зоне *p* нашего диода, а «минус» — к зоне *n*. Избыточные электроны с «минуса» батареи хлынули в зону *n*, и ее собственные электроны под этим могучим натиском двинулись к границе между зонами, двинулись к *pn*-переходу. С другой стороны, к *pn*-переходу подошли дырки зоны *p*, испытывающие электрическое давление «плюса» батареи. (Вы не забываете в подобные минуты обращаться к примечанию на стр. 26?)

А что же происходит на самой границе? Встречаясь, электроны и дырки нейтрализуют друг друга — электроны-путешественники зоны *n* занимают свободные места на внешних орбитах атомов зоны *p*.

Тот, кто хочет более детально разобраться в происходящих событиях, должен будет вспомнить о вычеркнутом нами в свое время электроперебегчике. В результате все дело сведется к перемещению одних только электронов, и это в действительности имеет место: сами атомы в твердом теле не двигаются. Но для простоты нам все же удобнее рассматривать движение положительных зарядов — дырок, что, как мы уже не раз подчеркивали, совершенно не противоречит истине. При желании можно еще раз привлечь на помощь аналогию со зрительным залом, дополнив его запасным выходом, куда убегают из первого ряда разочарованные зрители, фойе, где

толпятся ожидающие свободного места безбилетники, и еще загадочной комнатой (в нашей аналогии она отображает батарею), в которой сбежавшим со спектакля зрителям сообщают кое-что такое, что заставляет их вновь устремиться в зал (рис. 16).

При выбранном нами первом варианте включения диода в обеих его зонах происходит непрерывное упорядоченное движение зарядов к границе, а значит, во всей цепи идет ток. Можно сказать об этом и по-другому: при выбранном направлении включения диода он обладает сравнительно небольшим сопротивлением.

А теперь давайте повернем диод (или батарею) на сто семьдесят градусов и подключим зону p к «минусу» батареи, а зону n — к «плюсу» (рис. 17).

При таком включении электроны отходят от границы, уходя в глубь зоны n под влиянием «плюса» батареи (ничего не подделаешь — разноименные заряды притягиваются, и «плюс» тянет к себе отрицательно заряженные электроны), и одновременно под влиянием «минуса» от границы отходят дырки в глубь зоны p . В итоге из области pn -перехода почти полностью исчезают свободные заряды, сопротивление этой области резко возрастает, и она практически становится изолятором. А появление изолятора в электрической цепи приводит к прекращению тока. Правда, ток полностью не прекращается (идеальных изоляторов нет!), но он становится очень малым, и мы говорим, что при втором варианте включения полупроводниковый диод тока не проводит.

Теперь нам остается лишь ввести общепринятые наименования — первое направление включения диода назвать прямым, а второе — обратным — и сделать окончательный вывод: полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью, он пропускает ток только в одном направлении. Или иначе: сопротивление полупроводникового диода в прямом направлении мало, в обратном — велико.

За свое главное качество — одностороннюю проводимость — диод получил звание электрического вентиля. По своему поведению в электрической цепи диод действительно похож на вентиль, на устройство, которое пропускает воздух из насоса, например в велосипедную камеру, и не выпускает его обратно.

На этом, пожалуй, можно закончить общее знакомство с полупроводниковым диодом и поговорить конкретно о его устройстве, характеристиках, параметрах и схемах, в которых диод работает.

ВСЕ О ДИОДЕ

По своему устройству полупроводниковые диоды можно разделить на две большие группы — на плоскостные диоды и точечные (рис. 14). Главные особенности этих групп отражены в самих их названиях. В плоскостном диоде граница между зонами p и n представляет собой довольно большую плоскость. Площадь этой пограничной плоскости в зависимости от типа диода может составлять от 0,1 до 100 квадратных миллиметров.

Один из способов изготовления кристалла с pn -переходом для плоскостного диода упрощенно выглядит так. Вытягивая полупроводниковый кристалл, например германий, из расплава, в него периодически добавляют то акцепторную, то донорную примесь (рис. 18). При этом вытянутый кристаллический стержень получается как бы полосатым — в нем равномерно чередуются зоны p и зоны n . В дальнейшем такой кристалл точнейшим образом разрезают алмазными пилами и получают из него огромное количество кристалликов, в каждом из которых имеется лишь один pn -переход. Такой кристаллик как раз и служит основой для изготовления одного полупроводникового диода.

Выводы диода подпаивают непосредственно к кристаллу, а сам этот кристалл помещен в герметический корпус. Корпус диода металлический, и, как правило, он же и является выводом зоны n (рис. 14). Вывод зоны p выходит из металлического корпуса сквозь стеклянный изолятор.

В точечном диоде один из выводов также припаивают непосредственно к кристаллу. Другой вывод представляет собой тончайшую стальную проволочку, которая упирается в кристалл. При изготовлении диода конец проволочки покрывают металлом-донором, или акцептором, например алюминием или индием. В результате в том месте кристалла, куда упирается проволочка, образуется миниатюрный точечный pn -переход.

Плоскостные и точечные диоды — это не просто разные конструкции, возникшие по прихоти двух изобретателей. Это разные приборы с разными характеристиками и параметрами, по-разному ведущие себя во многих электрических цепях.

О поведении диода в электрической цепи многое может рассказать его вольтамперная характеристика (рис. 19). На этом графике видно, как меняется ток I через диод при изменении приложенного к нему напряжения (отсюда и название характеристики, оно как бы говорит: «изменение вольтов приводит к изменению амперов»).

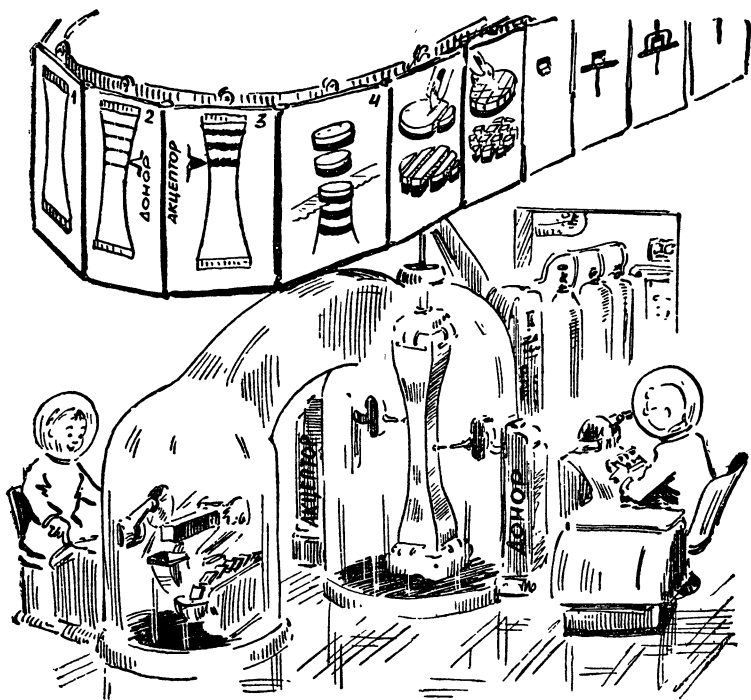


Рис. 18. Один из способов изготовления *p*-*n*-перехода основан на введении примесей в кристалл по мере его вытягивания из расплава.

После всего, что было рассказано, вольтамперная характеристика диода, по-видимому, ясна вам с первого взгляда. Прежде всего мы можем разделить всю эту характеристику на две части, на две области — положительных и отрицательных напряжений.

Область положительных напряжений (сперва от нулевого напряжения, то есть от $U=0$) соответствует прямому включению диода. Здесь ток — его называют прямым током — сравнительно велик и резко возрастает при увеличении U . Это значит, что само понятие «положительное напряжение» в данном случае нужно понимать только так: диод включен в прямом направлении, «плюс» батареи подключен к зоне *p*.

Слева от $U=0$, то есть в области отрицательных напряжений, диод включен в обратном направлении: к зоне *p* подключен «минус» батареи. Ток в отрицательной области, конечно, очень мал и при увеличении напряжения (разумеется, отрицательного!) растет незначительно. Вообще же само появле-

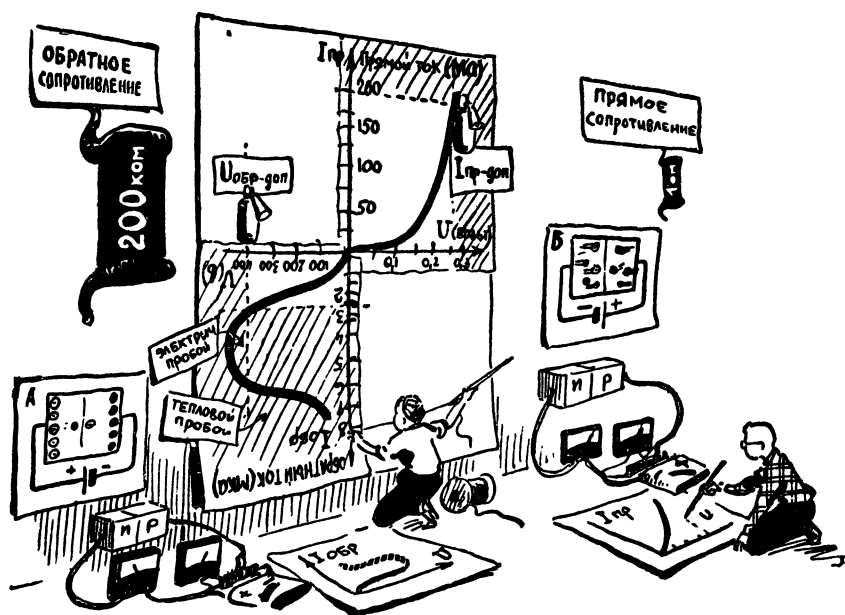


Рис. 19. Вольтамперная характеристика диода как бы состоит из двух характеристик — для прямого и обратного включения диода, для прямого и обратного тока.

ние обратного тока и его рост связаны с существованием неосновных носителей, которые умеют двигаться так же, как и основные, но только в противоположную сторону и при обратном напряжении (рис. 16 и 17).

Внимательно присмотревшись к вольтамперной характеристике, можно обнаружить на ней несколько непонятных участков. Почему, например, при очень маленьких положительных напряжениях ток почти не растет и лишь постепенно набирает силу? Почему при малых отрицательных напряжениях ток возрастает довольно быстро и лишь потом рост его прекращается? Почему, наконец, ток бурно возрастает после того, как напряжение превысит величину $U_{\text{обр-доп}}$?

Резкое увеличение тока при высоких обратных напряжениях объясняется просто: разрушением pn -перехода. Разрушение происходит из-за слишком большой мощности, которая выделяется на pn -переходе и превращается в тепло. Полупроводниковые материалы перегреваются, резко возрастает их собственная проводимость, и pn -переход вообще исчезает.

Происходит так называемый тепловой пробой, и диод становится обычным резистором.

При обратном включении диода чрезмерная, разрушающая *pn*-переход мощность получается при весьма больших напряжениях. И вот почему: обратный ток очень мал, а мощность, если вы не забыли,— это произведение напряжения на ток.

Обратите внимание, что при обратном включении диода тепловой пробой наступает не сразу. Увеличивая напряжение, мы сначала попадаем в область электрического пробоя. В этой области обратный ток резко возрастает, а значит, обратное сопротивление диода падает. Однако, если опять уменьшить напряжение, уменьшится и ток. Иными словами, электрический пробой, возникновение которого связано с тонкими молекулярными механизмами, процесс обратимый. Он резко, лавинообразно увеличивает обратный ток, но стоит уменьшить напряжение, диод возвращается в исходный режим и вновь становится электрическим вентиляем.

В то же время тепловой пробой выводит полупроводниковый прибор из строя навсегда. И если когда-нибудь к вам в руки попадет диод, который потерял способность быть вентиляем, потому что у него обратное сопротивление такое же, как и прямое, то знайте: диод побывал в области теплового пробоя.

Таблица 1

Плоскостные германиевые диоды серии Д7

Название диода	Д7А	Д7Б	Д7В	Д7Г	Д7Д	Д7Е	Д7Ж
$I_{\text{вып}}^1$ (<i>ма</i>)	300	300	300	300	300	300	300
$U_{\text{обр-доп}}$ (<i>в</i>)	50	100	150	200	300	350	400

Обратный ток — 300 *мка* (при $U_{\text{обр-доп}}$); прямое напряжение 0,3—0,5 *в* (при $I_{\text{вып}}$).

¹ В наших таблицах ток $I_{\text{пр-ср}}$ обозначен $I_{\text{вып}}$, как и в большинстве официальных справочников.

Таблица 2

Влияние температуры на предельный режим диодов серии Д7

Температура окружающего воздуха	$I_{\text{вып}}$ (для Д7А — Д7Г), (мА)	$U_{\text{обр—доп}}$, (в)				$I_{\text{вып}}$ (для Д7Д — Д7Ж), (мА)	$U_{\text{обр—доп}}$, (в)		
		Д7А	Д7Б	Д7В	Д7Г		Д7Д	Д7Е	Д7Ж
20°C	300	50	100	150	200	100	300	350	400
50°C	300	35	60	90	125	100	190	220	250
70°C	210	25	35	50	65	70	90	110	130

Для того чтобы не погубить полупроводниковый диод (а часто вместе с ним могут погибнуть и другие элементы схемы, например, силовой трансформатор), чтобы не довести диод до теплового пробоя, не нужно превышать некоторую предельно допустимую для данного типа диодов мощность. Об этом как раз и говорят основные параметры диодов, приведенные в таблицах 1—5. Правда, в этих таблицах самой мощности вы не найдете, вместо нее указан средний прямой ток $I_{\text{вып}}$, который можно пропустить через диод (подчеркиваем — это именно средний прямой ток; на короткий срок эту величину иногда можно превысить), и предельное обратное напряжение $U_{\text{обр—доп}}$. То, что вместо максимально допустимой мощности указаны именно эти параметры, объясняется довольно просто.

Мощность, выделяемая на диоде при его прямом включении, равна произведению прямого тока на приложенное

Таблица 3

Плоскостные кремниевые диоды

Название диода	Д217	Д218	Д226	Д226А	Д229А	Д229Б	Д230А	Д230Б
$I_{\text{вып}}$ (мА)	100	100	300	300	400	400	300	300
$U_{\text{обр—доп}}$ (в)	800	1000	300	300	200	400	200	400

Обратный ток 30—50 мкА (при $U_{\text{обр—доп}}$), прямое напряжение 0,5—1 в (при $I_{\text{вып}}$).

Таблица 4

Плоскостные диоды для больших токов

Название диода	Германиевые				Кремниевые						
	Д302	Д303	Д304	Д305	Д242	Д243	Д244	Д245	Д246	Д247	Д248
$I_{\text{вып}} (a)$	1	3	5	10	10	10	10	10	10	10	5
$U_{\text{обр-доп}} (в)$	200	150	100	50	100	200	50	300	400	500	600

Обратный ток 3 ма (при $U_{\text{обр-доп}}$); прямое напряжение (при $I_{\text{вып}}$) у германиевых диодов 0,2—0,5 в, у кремниевых диодов 1—1,5 в.

Внимание! Допустимые токи указаны в расчете на применение радиаторов. Если через диод проходит полный прямой ток ($I_{\text{вып}}$), то при использовании алюминиевого радиатора толщиной 3 мм его диаметр должен быть для диодов Д303 не менее 60 мм, для Д304—80 мм и для Д305—150 мм. Кремниевые диоды рассчитаны на радиаторы площадью 50 см² при полном токе и 25 см² при половинном токе (если температура окружающей среды 25°C).

Примечание. Если в обозначении кремниевого диода после цифры стоит буква Б (например, Д242Б), то допустимый ток $I_{\text{вып}}$ не более 5 а. Буква А в названии (например, Д242А) означает, что диод сохраняет свои параметры до температуры +130°C; во всех остальных случаях допустимый прямой ток $I_{\text{вып}}$ при температуре +130°C вдвое меньше нормального, то есть 5 а (для диодов с обозначением Б ток не более 2 а). Буква П (например, Д242П) в названии диода отмечает лишь некоторые его технологические особенности и при выборе диода на нее можно не обращать внимания.

Таблица 5

Точечные диоды

Название диода	Германиевые					Кремниевые			
	Д2А	Д2Е	Д24	Д9А	Д9Ж	Д101	Д101А	Д102	Д103
$I_{\text{вып}} (ма)$	50	16	16	25	15	30	30	30	30
$U_{\text{обр-доп}} (в)$	15	30	100	10	100	75	75	50	30

Обратный ток (при $U_{\text{обр-доп}}$) у германиевых диодов 250 мка, у кремниевых — 30 мка; проходная емкость у германиевых диодов 1—2 пф, у кремниевых—0,5 пф.

к диоду прямое напряжение. Но ведь ток и напряжение взаимно связаны. Например, в диоде Д7Ж прямой ток $0,3 \text{ а}$ будет при прямом напряжении $0,5 \text{ в}$, а мощность в этом случае составит $0,15 \text{ вт}$ ($P=U \cdot I$). Именно эта мощность для данного типа диода является предельно допустимой, и превышать ее нельзя. Но вместо того чтобы говорить «не превышайте мощность $0,15 \text{ вт}$ », мы можем сказать: «не превышайте ток $0,3 \text{ а}$ ». Ведь напряжение при этом токе для данного типа диодов почти всегда одинаково, а значит, ограничив ток, мы ограничиваем и мощность. Поскольку при включении диода в прямом направлении особенно важно знать, какой он может пропустить прямой ток, то именно эта величина входит в число основных параметров диода и включена в нашу таблицу рекомендованных режимов.

Рассуждая аналогичным образом, можно доказать, что, вместо того чтобы ограничивать мощность при обратном включении диода, достаточно ограничить его обратный ток или обратное напряжение. А поскольку при включении диода в какую-либо схему нам всегда легче определить, какое к нему будет приложено обратное напряжение, а не какой через него пойдет обратный ток, то именно поэтому допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр-доп}}$ входит в число основных параметров диода.

Вывод, который нужно сделать в результате всех этих пространственных рассуждений, достаточно краток: не допускайте превышения прямого тока $I_{\text{вып}}$ и обратного напряжения $U_{\text{обр-доп}}$.

Обогащенные этими новыми знаниями, мы уже можем критически взглянуть на таблицы 1—5. Первое, что бросается в глаза,— это довольно большое количество разных диодов. У некоторых прямой ток побольше, у других поменьше, некоторые диоды терпят обратное напряжение в сотни вольт, для других смертельным является напряжение в два-три десятка вольт. Видно также, что у точечных диодов допустимые токи и напряжения значительно меньше, чем у плоскостных.

Здесь вполне уместно задать вопрос: зачем вообще нужны точечные диоды, если любой из них по предельным параметрам уступает самому слабенькому плоскостному диоду? А дело в том, что плоскостные диоды проигрывают точечным по одному весьма важному параметру, который хотя и не входит в нашу таблицу, но о котором следует помнить. Этот параметр — собственная емкость диода (рис. 20).

Полупроводниковый диод очень напоминает плоский конденсатор. Его обкладки — зона p и зона n , а диэлектрик — область pn -перехода, лишенная свободных зарядов. Известно,

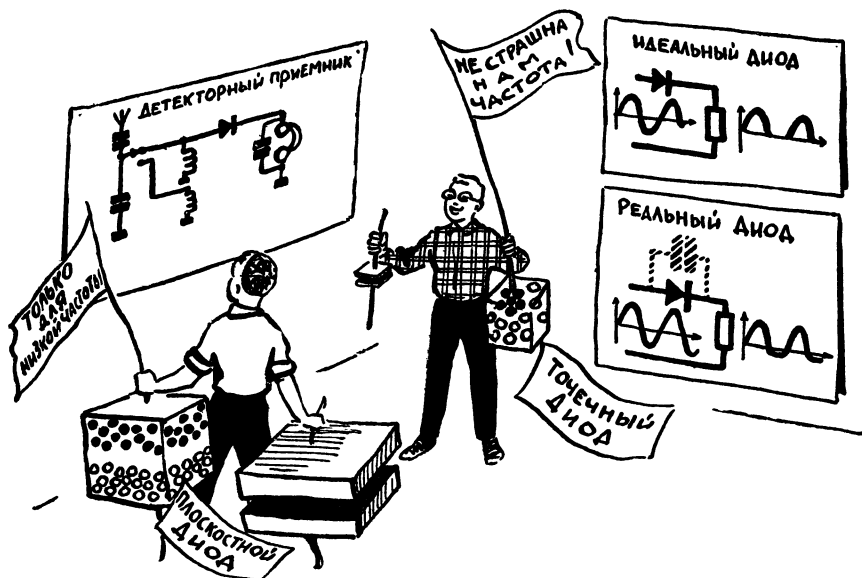


Рис. 20. Сравнительно большая емкость плоскостного диода не позволяет использовать его в высокочастотных цепях.

что емкость конденсатора тем больше, чем больше площадь его обкладок. Именно на этом, кстати, основано изменение емкости в переменном конденсаторе. Для того чтобы повысить допустимую величину прямого тока у плоскостных диодов, увеличивают площадь соприкосновения зоны p с зоной n , то есть, иными словами, увеличивают площадь pn -перехода. И, конечно же, при этом возрастает собственная емкость диода. У плоскостных диодов собственная емкость достигает нескольких сот пикофарад ($nф$). В то же время собственная емкость точечных диодов ввиду очень малой поверхности pn -перехода обычно составляет несколько десятых долей $nф$. И поэтому точечные диоды могут работать в цепях переменного тока высокой частоты, там, где применение плоскостных диодов невозможно из-за их большой емкости.

Постоянный ток, как известно, не проходит через конденсатор — между его обкладками находится слой изолятора. Но когда конденсатор заряжается и разряжается, в его цепи все-таки возникает кратковременный ток — заряды двигаются на обкладки (зарядный ток) или уходят с них (разрядный ток). Под действием переменного напряжения циклы заряд-разряд

происходят непрерывно, и в цепи конденсатора возникает переменный ток. Ток этот возрастает с увеличением частоты: чем выше частота, тем чаще двигаются заряды «туда-обратно», тем большее их количество проходит по цепи каждую секунду.

Есть еще один способ увеличить ток: нужно взять конденсатор большей емкости. Чем больше емкость C конденсатора, тем большее число зарядов накапливается на обкладках, тем интенсивнее их движение во время заряда и разряда. Учитывая все это, конденсатор можно представить в виде некоторого условного резистора, обладающего емкостным сопротивлением x_c , от которого зависит величина тока. Само же x_c зависит от частоты f и емкости C . (Воспоминание № 13; формулы действительны только для переменного тока синусоидальной формы). Сопротивление x_c называют реактивным — оно не потребляет мощности, а лишь влияет на величину тока.

Предположим, что в плоскостном диоде емкость p -перехода равна 100 $nф$. На частоте 100 кГц ($кГц$) конденсатор такой емкости ведет себя как сопротивление 16 килоом ($ком$). Это сопротивление намного меньше обратного сопротивления диода и сильно шунтирует его. Образно говоря, собственная емкость диода совершает «предательство» (не забывайте про стр. 26!) — создает обходной путь, который фактически делает диод ненужным, неработающим элементом цепи.

Как видите, большой прямой ток плоскостных диодов покупается довольно дорогой ценой: предельная рабочая частота этих диодов обычно не превышает 10—20 $кГц$. Точечные диоды хорошо работают на частотах в десятки, сотни и даже тысячи мегагерц ($МГц$). На высоких частотах емкостное сопротивление точечного диода оказывается весьма большим благодаря его небольшой собственной емкости (чем меньше емкость, тем больше емкостное сопротивление). И поэтому точечный диод практически не подвергается шунтирующему действию собственного конденсатора-«предателя».

Есть еще несколько параметров полупроводникового диода, с которыми нам необходимо познакомиться. Это обратный ток и прямое напряжение, а также предельная температура, которую терпит диод. Мы не стали включать эти параметры в таблицы, потому что для многих диодов они одинаковы и таблицы оказались бы заполненными множеством одинаковых цифр.

Так, например, все германиевые диоды работают при температуре не более $+60^{\circ}C$. Для кремниевых диодов верхняя температурная граница значительно выше — до $+100^{\circ}C$ (часто указывают иные величины, а именно: $+70^{\circ}C$ и $+150^{\circ}C$).

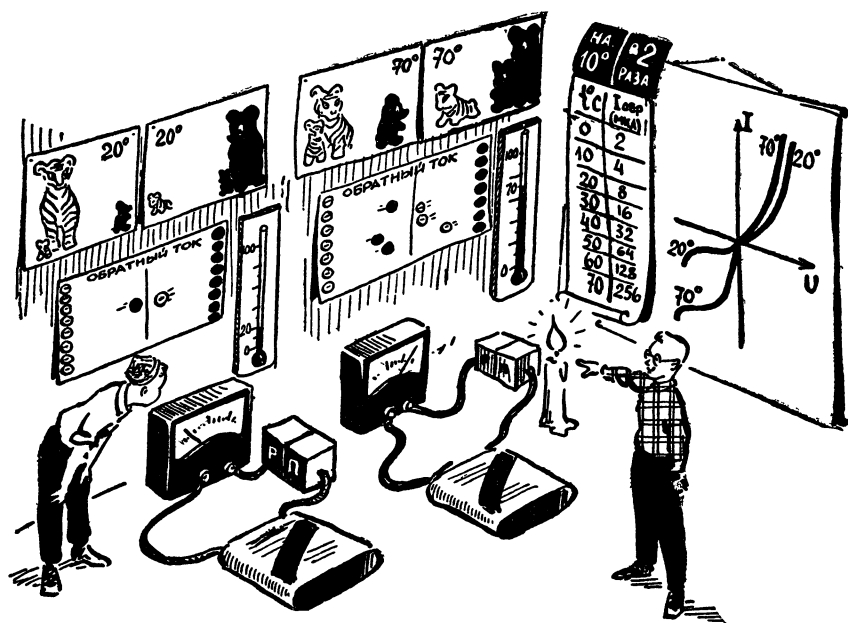


Рис. 21. При нагревании диода увеличивается число собственных (неосновных) зарядов в полупроводнике, увеличивается обратный ток через *pn*-переход.

Причиной гибели диодов при высокой температуре является уже знакомый тепловой пробой. Тепловая энергия увеличивает собственные колебания атомов, как бы расшатывает их, и в результате увеличивается число электронов, покидающих внешние орбиты. Поэтому с увеличением температуры в полупроводниковом диоде растет число неосновных (собственных) зарядов, а значит, уменьшается численное превосходство основных (примесных) зарядов, на котором, собственно говоря, и основана вся деятельность *pn*-перехода.

Посмотрите на рис. 21. Здесь показано, как меняется характеристика диода при его нагревании. Вы видите, что с ростом температуры резко увеличивается обратный ток — происходит это именно за счет увеличения собственной проводимости полупроводника. Постепенно дело доходит до того, что обратный ток становится равным прямому, *pn*-переход разрушается, наступает тепловой пробой.

То, что у кремниевых диодов это происходит при более высокой температуре, можно объяснить (опять-таки очень

упрощенно!) следующим образом. У кремния всего три орбиты, у германия — четыре. Поэтому в атоме кремния внешняя орбита находится ближе к ядру, электроны прочнее привязаны электрическими силами к ядру и нужна более высокая температура, более сильные тепловые колебания атома, чтобы вырвать электрон с его внешней орбиты.

Для того чтобы не перегреть полупроводниковый диод, не довести его до опасной граничной температуры, пользуются охлаждающими радиаторами, например медными, алюминиевыми или стальными пластинами. Роль радиатора может выполнять и металлическое шасси, на котором монтируется схема. Радиатор должен плотно прилегать к корпусу диода: лишь в этом случае диод хорошо передает ему свое тепло. Если же нужно, чтобы корпус диода (к нему подсоединена зона n , см. рис. 14) не имел электрического контакта с металлическим радиатором (чаще всего с шасси), то между диодом и радиатором помещают тонкую слюдяную прокладку.

Диоды большой и даже средней мощности без радиаторов вообще не используют, так как при этом у них очень резко, иногда в два-три раза, уменьшаются допустимый прямой ток $I_{пр-доп}$ и допустимое обратное напряжение $U_{обр-доп}$. А плоскостные диоды малой мощности, для которых не нужны радиаторы, при монтаже стараются располагать так, чтобы обеспечивалось их хорошее охлаждение. Более того, даже при пайке выводов полупроводникового прибора нужно остерегаться его перегрева. Паять нужно быстро, аккуратно, предварительно зажав вывод пинцетом или плоскогубцами, которые в данном случае играют роль теплоотвода (рис. 22).

Влияние температуры на работу полупроводникового диода, а в дальнейшем и триода доставит нам еще немало хлопот, и мы еще не раз будем возвращаться к этой неприятной теме.

Прямое напряжение $U_{пр}$, при котором через диод проходит допустимый прямой ток $I_{пр-доп}$, так же как и обратный ток $I_{обр}$, соответствующий допустимому обратному напряжению $U_{обр-доп}$, — параметры также довольно близкие для больших групп диодов. Так, для плоскостных диодов прямое напряжение, как правило, составляет 0,3—0,5 в. Как видите, прямое напряжение у плоскостных диодов весьма мало. Несколько больше, но тоже невелико прямое напряжение $U_{пр}$ у точечных диодов.

Обратный ток $I_{обр}$ при напряжении $U_{обр-доп}$ у плоскостных диодов обычно составляет 0,5—1,5 *ма* (то есть 500—1500 *мка*), а у точечных диодов 0,01—0,2 *ма* (10—200 *мка*). Во всех случаях обратный ток через диод даже при предельно допустимом

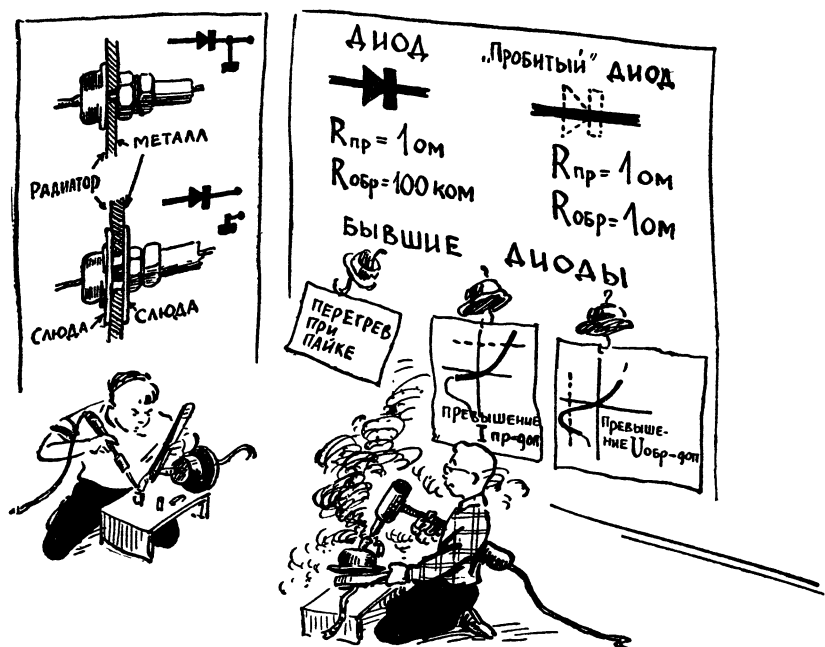


Рис. 22. Перегрев при пайке или превышение подводимой мощности может привести к гибели диода.

обратном напряжении весьма мал. Во всяком случае, обратный ток всегда во много раз меньше прямого.

Зная токи и напряжения, легко подсчитать прямое и обратное сопротивление диода ($R = U : I$). Для плоскостных диодов прямое сопротивление обычно очень мало — оно составляет всего 0,1—3 ом (!), а обратное 50—500 ком или даже несколько Мом. Прямое сопротивление точечных диодов чаще всего лежит в пределах от 10 до 100 ом, обратное — от 1 до 10 Мом. Цифры эти полезно запомнить: в дальнейшем они позволят понять, что именно почувствует та или иная электрическая цепь при включении в нее диода.

У нас остался еще один неоплаченный долг — еще один вопрос, который возник при знакомстве с вольтамперной характеристикой диода (стр. 46): с чем связано появление двух изогнутых участков, двух загибов характеристики в районе нулевого напряжения? В поисках ответа нам придется еще раз внимательно посмотреть, что происходит в *pn*-переходе, причем не при прямом его включении и не при обратном,

а в том случае, когда диод вообще никуда не включен, когда он предоставлен самому себе.

А действительно, как ведет себя *pn*-переход, когда к нему не приложено никакого напряжения? Начнем с того, что такого случая почти никогда не бывает. Даже если к *pn*-переходу не подключать батареи, то и в этом случае на нем будет действовать небольшое, если можно так сказать, «самоделльное» напряжение. Чтобы пояснить, откуда оно берется, нам придется упомянуть еще об одном физическом явлении — о диффузии. С этим явлением, так же, скажем, как с возникновением примесной проводимости или с влиянием температуры на свойства полупроводника, мы будем довольно часто сталкиваться при знакомстве с полупроводниковыми триодами.

Если в каком-нибудь углу комнаты поставить банку с легким испаряющимся бензином, то его запах через некоторое время заполнит все помещение. Если в стакан чистой воды попадет капля туши, то пройдет несколько минут, и вся вода в стакане почернеет. Если в полупроводниковый кристалл насильно ввести некоторое количество свободных электронов, то вскоре они равномерно распределятся во всем объеме кристалла. Все три примера иллюстрируют хорошо известное физическое явление — диффузию.

Сущность ее состоит в том, что частицы — молекулы, атомы, электроны, — совершая свои обычные хаотические движения, постепенно передвигаются из районов с большой концентрацией в те районы, где этих частиц мало. Диффузия в том и состоит, что вещество старается распределиться равномерно в занимаемом объеме. Можно найти ей немало житейских аналогий, вспомнив, например, как люди равномерно размещаются на огромном пляже.

Диффузия наблюдается и в районе *pn*-перехода. Свободные электроны, сконцентрированные в зоне *n*, стремятся перейти в зону *p*, а дырки, наоборот, из зоны *p* направляются в зону *n*. Такое движение, казалось бы, должно продолжаться до тех пор, пока во всем кристалле концентрация дырок и электронов не станет одинаковой, пока не исчезнут зоны *p* и *n*. Однако этого не происходит. На борьбу с диффузией, которая хотела бы превратить диод в однородный кристалл, вступают могучие силы. Это электрические силы неподвижных зарядов — ионизированных атомов примеси (рис. 23).

Вы, конечно, не забыли, что дырки в зоне *p*, а свободные электроны в зоне *n* в нужных нам количествах появляются лишь после введения в полупроводник донорных или акцепторных примесей (рис. 14). Но атомы примеси, отдав свой электрон или, наоборот, забрав электрон у соседа, сами превра-

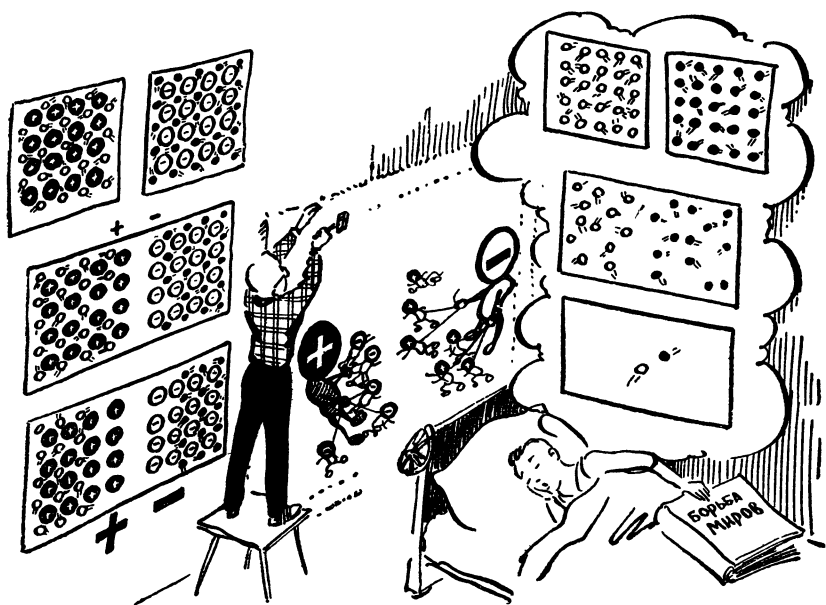


Рис. 23. Силы диффузии стремятся ликвидировать pn -переход, равномерно «перемешать» свободные заряды в кристалле, однако этому препятствуют электрические силы неподвижных ионов.

щаются в неподвижные ионы. Атом донора (отдающий электрон) становится положительным ионом, атом акцептора (забирающий электрон)—отрицательным. Неподвижные ионы равномерно распределены по всему полупроводниковому кристаллу: положительные ионы в зоне n , отрицательные — в зоне p (рис. 12, 13).

Если бы каждая из этих зон существовала сама по себе, то неподвижных ионов никто бы и не заметил: их суммарный заряд компенсировался бы суммарным зарядом свободных зарядов, и в целом зона была бы нейтральной. Но в действительности в полупроводниковом диоде зоны с разной проводимостью примыкают друг к другу. И, как мы только что сказали, из пограничных районов происходит диффузия свободных зарядов в соседнюю зону. Это значит, что в пограничной зоне в районах, непосредственно примыкающих к pn -переходу, заряды неподвижных ионов остаются нескомпенсированными. В зоне p остается нескомпенсированный неподвижный отрицательный заряд, в зоне n — положительный. Эти неподвижные заряды — заряды ионизированных атомов — как раз и не дают

возможность диффузии равномерно разбросать, размазать свободные электроны и дырки по всему кристаллу.

Некоторые свободные электроны еще успевают незамеченными уйти из зоны n . Но чем больше электронов уходит, тем сильнее начинают действовать электрические силы неподвижных положительных ионов, которые удерживают убегающих. Более того, в союзе с положительными ионами зоны n действуют и неподвижные отрицательные ионы зоны p . Они как бы отталкивают прибывающие к ним электроны, возвращают их в зону n . Аналогично действуют неподвижные ионизированные атомы и в отношении убегающих из зоны p дырок. Остающиеся в этой зоне отрицательные ионы тянут эти дырки обратно, а положительные ионы зоны n отталкивают дырки к pn -переходу.

Обо всем этом можно сказать и иначе: оставшиеся нескомпенсированными неподвижные ионы пограничной полосы создают некоторое напряжение, «плюс» и «минус» которого приложены непосредственно к pn -переходу. Это напряжение, появившееся в результате первоначальной небольшой диффузии свободных носителей, направлено так, что не дает диффузии развернуться во всю свою мощь и сохраняет необходимую концентрацию свободных носителей в обеих зонах полупроводникового диода.

Когда к диоду прикладывают внешнее напряжение, вся картина постепенно меняется: меняется количество носителей, переходящих границу в результате диффузии, меняется количество носителей, переходящих границу под действием электрических сил. Да и сами эти электрические силы меняются — ведь теперь они являются результатом совместного действия батареи и собственного «самодельного» напряжения на pn -переходе. Не стремясь разобраться в тонкостях этих событий, мы отметим лишь две их особенности.

Если увеличивать от нуля прямое напряжение, приложенное к диоду, то вначале это напряжение в какой-то степени будет компенсироваться собственным напряжением pn -перехода (эти напряжения действуют друг против друга). В результате ток через диод будет нарастать сравнительно медленно, и в начале правой (положительной) ветви вольтамперной характеристики появится небольшой загиб.

При обратном включении диода собственное напряжение pn -перехода содействует, помогает внешнему напряжению (оба напряжения действуют в одну сторону). Пока внешнее напряжение мало, помощь эта весьма ощутима, и ток растет сравнительно быстро. Так появляется загиб в начале левой (отрицательной) ветви вольтамперной характеристики.

Мы рассказали о полупроводниковом диоде все. Разумеется, не все, что можно было, и даже не все, что хотелось. Мы рассказали о проводниковом диоде то, что нужно для облегчения знакомства с транзистором. И хотя путь к транзистору уже открыт, мы еще раз отклонимся от своей главной цели. Нужно до конца выполнить свой долг перед диодом: уделив так много внимания его устройству, характеристикам, параметрам, мы должны хотя бы коротко сказать о профессиях полупроводникового диода, о схемах, в которых он работает.

ПРИБОР СКРОМНЫХ ПРОФЕССИИ

Мы назвали полупроводниковый диод прибором скромных профессий — именно таким он представляется начинающим и не только начинающим радиолюбителям. Это представление, по-видимому, связано с тем, что чаще всего диод работает в схемах выпрямителей. Благодаря своей односторонней проводимости диод позволяет превратить переменный ток в постоянный, а этот постоянный ток идет на всякие вспомогательные нужды: для питания радиоламп и транзисторов, для зарядки аккумуляторов, для создания постоянных магнитных полей и т. п.

Иногда, правда, диоду доверяют и более тонкую работу — детектирование радиосигналов. Но и здесь диод делает то же, что и в выпрямителе: пропускает ток только в одну сторону. Детектор — это тоже весьма скромная, не требующая особого образования профессия полупроводникового диода.

Однако если взглянуть на дело глубже, окажется, что диод всегда выполняет операцию исключительной важности: он меняет форму электрических сигналов, преобразует их спектр. Окажется, что диод является главным представителем нескольких важнейших для всей радиоэлектроники профессий, представителем огромной самостоятельной области — нелинейной радиоэлектроники.

Научившись описывать сигнал с помощью графика (рис. 3), мы сделали лишь полдела. Важно еще суметь точно (именно точно!) описать, чем один сигнал отличается от другого, в чем похожи, а в чем непохожи их графики. Один из способов такого точного описания был предложен больше ста лет назад, когда никакой радиоэлектроники не было и в помине. Французский математик Жан-Батист-Жозеф Фурье решил задачу в общем, так сказать, в абстрактном виде, и лишь через много лет предложенный им способ нашел применение во многих областях техники. В том числе и в радиоэлектронике.

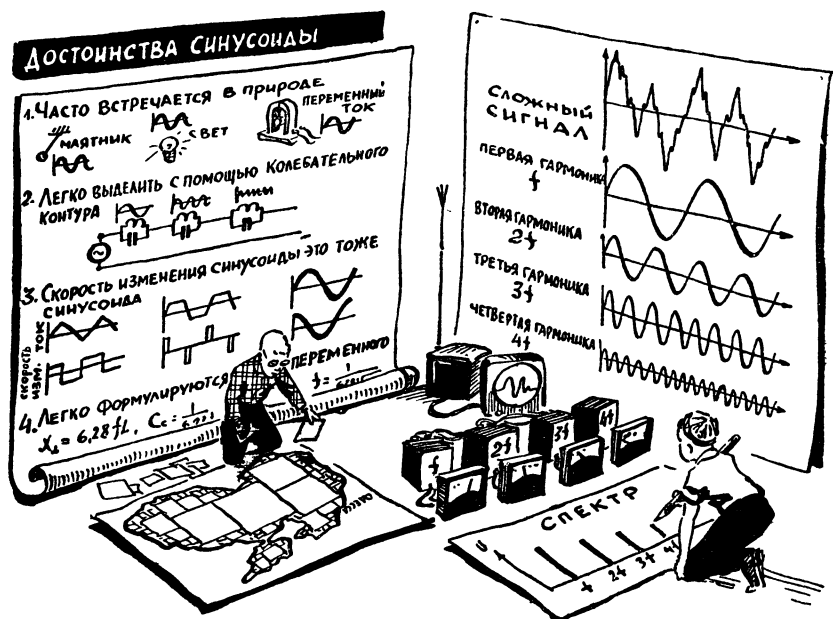


Рис. 24. Сигнал сложной формы можно представить как сумму синусоидальных составляющих с разными частотами; набор составляющих, эквивалентный сложному сигналу, называется его спектром.

Представьте себе, что вам нужно с помощью карты измерить площадь какого-либо водоема, например Черного моря. В этом случае можно поступить так: разбить всю поверхность моря на квадраты, подсчитать площадь каждого из них, а затем все полученные результаты сложить. При этом на карте разместятся два-три больших квадрата, несколько квадратов поменьше и, наконец, множество мелких и мельчайших квадратиков, которые точно воспроизведут сложные очертания морских берегов (рис. 24).

Подобным же образом для точного описания сложного сигнала можно представить его как сумму стандартных составляющих — сигналов с разными частотами и амплитудами, но обязательно с одинаковыми по форме графиками. Научившись разбивать сложный сигнал на простые стандартные составляющие (подобно тому как на карте мы разбили Черное море на составляющие стандартной формы — квадраты), можно будет довольно просто составить точное описание этого

сигнала. Нужно будет лишь назвать набор стандартных составляющих, которые в сумме дадут этот сложный сигнал.

В качестве стандартной составляющей для измерения поверхности моря мы выбрали квадрат, хотя могли выбрать прямоугольник, ромб, круг и множество других широкоизвестных и хорошо изученных фигур. Квадрат мы выбрали в основном потому, что измерить его площадь проще, чем площадь других фигур. Что касается стандартных составляющих, из которых лучше всего можно было бы составить сложный электрический сигнал, то выбирать эти составляющие нам не придется. Их уже давно выбрала и узаконила наука. Более того, эти составляющие выбраны самой природой. И эта честь оказана простейшим сигналам с синусоидальной формой графика.

Для того чтобы детально пояснить, почему именно синусоида была выбрана в качестве стандартной составляющей, нужно было бы написать отдельную и притом довольно большую книгу. Мы ограничимся лишь тем, что выскажем по этому поводу несколько «за».

Во-первых, синусоидальные колебания — это одна из простейших и наиболее естественных форм движения, подобно тому как квадрат или круг — простейшая геометрическая фигура. Графики многих природных процессов — световых и звуковых колебаний, колебаний маятника, движения волн и многих других — представляют собой синусоиды. Во-вторых, синусоида — это единственный график, скорость изменения которого представляет собой опять-таки синусоиду. Это значит, что если мы возьмем синусоидальный сигнал и посмотрим, как изменяется скорость его нарастания или убывания, а затем построим график изменения этой скорости, то опять получим синусоиду. Это очень важное качество, так как многие процессы в электрических цепях зависят не от самой величины тока или напряжения, а именно от скорости их изменения.

В качестве примера такой зависимости рассмотрим, разумеется упрощенно, как возникает ток в цепи слюдяного конденсатора под действием переменного напряжения.

Как известно, свободные заряды через диэлектрик, в данном случае через слюду, конденсатора пройти не могут. Но под действием приложенного напряжения несколько сдвигаются, деформируются электронные орбиты атомов слюды. Происходит некоторое небольшое движение электронов (оно называется током смещения), но без их выхода из атомов. В результате деформации орбит с одной стороны диэлектрика (именно с той стороны, куда сместились орбиты) появляется отрицательный заряд, а с другой стороны появляется положительный заряд. Эти заряды притягивают или отталкивают сво-

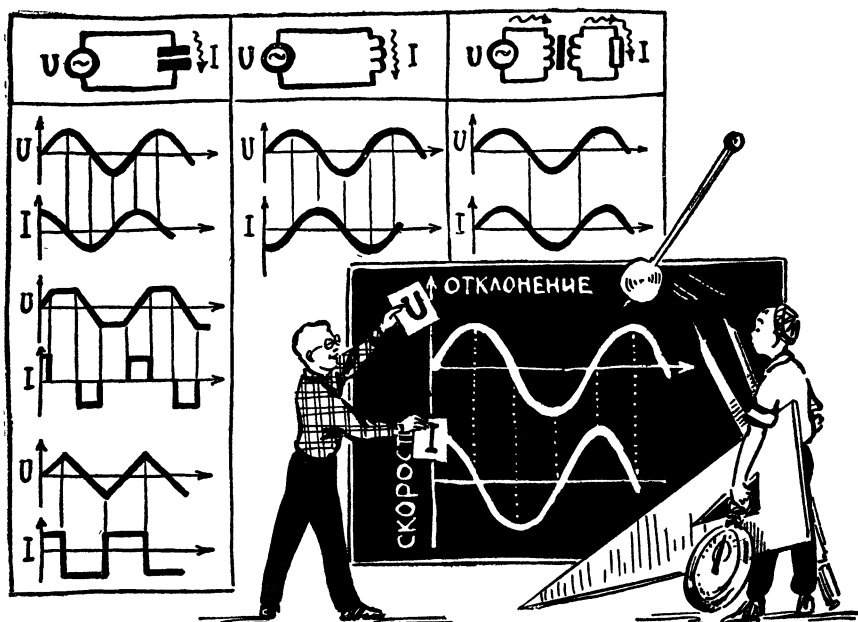


Рис. 25. Ток в цепи конденсатора протекает только при изменении напряжения на нем, и поэтому графики напряжения и тока (кроме синусоиды) различны.

бодные электроны в проводниках, подключенных к конденсатору, и в этих проводниках возникает ток проводимости. Однако все эти события — смещение орбит и движение электронов в проводниках — происходят лишь в тот момент, когда меняется напряжение, подведенное к конденсатору.

Если к конденсатору приложено постоянное напряжение, пусть даже очень большое, то смещенные некогда орбиты находятся в состоянии покоя и никакого движения зарядов, никакого тока в конденсаторе и во внешней цепи нет. Но стоит только напряжению измениться, как заряды совершат некоторый дополнительный сдвиг: при увеличении напряжения — в одну сторону, при уменьшении — в другую. Отсюда вывод: ток в цепи конденсатора протекает только в момент *изменения* напряжения. И еще один вывод: чем быстрее меняется напряжение, тем быстрее смещаются заряды, тем больше ток в цепи. Вот почему график тока через конденсатор по сути дела представляет собой график скорости изменения напряжения, приложенного к этому конденсатору. Графики эти всегда раз-

личны по форме (рис. 25), за исключением только одного случая — синусоидального напряжения. Только синусоидальное напряжение создает в цепи конденсатора ток такой же формы — синусоидальный переменный ток. Это замечательное и уникальное свойство синусоидального сигнала проявляется не только в конденсаторах, но еще и в катушках и трансформаторах, во всех так называемых реактивных элементах электрических цепей.

Наконец, третье «за». Выбрав квадрат в качестве стандартной составляющей при разметке поверхности моря на карте, мы можем довольно просто расчертить эту поверхность, а если нужно, даже разрезать ее на составляющие. Вырезать квадрат из бумаги не составляет никакого труда. Подобно этому любой сложный сигнал можно довольно просто разделить на синусоидальные (именно на синусоидальные!) составляющие. Делается это с помощью резонансных электрических фильтров, в частности с помощью колебательных контуров. Такой контур состоит из соединенных друг с другом конденсатора и катушки (Воспоминания № 18 и № 20).

Если ввести в контур порцию электрической энергии, зарядив конденсатор или создав магнитное поле в катушке, то в контуре начнутся свободные колебания, появится переменный ток. Этот процесс очень напоминает колебания гитарной струны, которой вы также передаете порцию энергии, тронув эту струну пальцами. И, подобно тому как частота колебаний струны зависит от ее массы и силы натяжения (чем тоньше струна и чем сильнее она натянута, тем выше частота колебаний), подобно этому частота электрических колебаний в контуре зависит от емкости C конденсатора и индуктивности L катушки. Чем меньше емкость C и индуктивность L , тем выше частота колебаний.

Переменный ток, который возникает в колебательном контуре, по форме очень близок к синусоиде (в идеальном контуре, без потерь энергии, график тока — это настоящая, идеальная синусоида). Определенным образом включив колебательный контур в цепь со сложным сигналом, мы увидим, что контур выделит из этого сигнала синусоидальную составляющую своей собственной частоты (если, конечно, такая составляющая есть в сигнале). Пропустив сложный сигнал через достаточное количество настроенных контуров, можно выделить из этого сложного сигнала все его синусоидальные составляющие.

Можно не сомневаться, что после трех высказанных «за» простейшие синусоидальные сигналы будут без возражений утверждены в должности стандартных составляющих сложного сигнала. Синусоидальные колебания часто называют гармо-

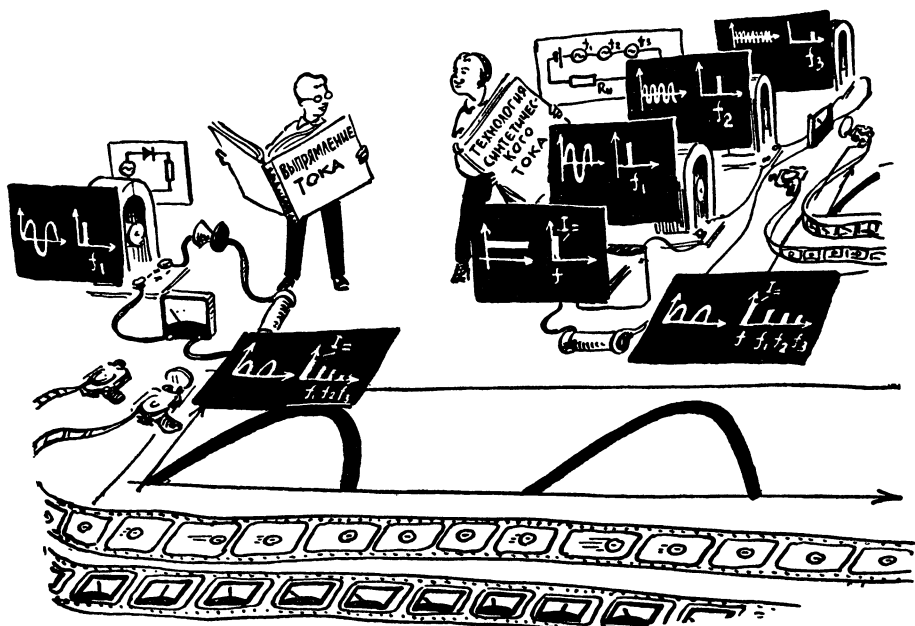


Рис. 26. Под действием переменного напряжения в цепи диода протекает пульсирующий ток, который состоит из постоянной и переменной составляющих.

ническими, а синусоидальные составляющие сложного сигнала — гармониками. Любой сложный сигнал принято официально характеризовать его спектром — набором гармоник с указанием их амплитуды. А результат прохождения сигнала по какой-либо цепи можно оценивать по тому, как изменился его спектр, какие новые гармоники появились в этом сигнале, какие усилились, какие ослабились. Именно с этих позиций мы и рассмотрим сейчас работу полупроводникового диода.

Включим диод в схему простейшего выпрямителя (рис. 26) и подведем к нему синусоидальное переменное напряжение. Для простоты будем считать, что диод имеет идеальную характеристику, что его обратный ток равен нулю, то есть обратное сопротивление бесконечно велико. Обычно разница между прямым и обратным током диода настолько велика, что подобное допущение вполне справедливо.

Под действием переменного напряжения в цепи диода пойдет пульсирующий ток — импульсы тока будут появляться только тогда, когда переменное напряжение приложено

к диоду в прямом направлении. Иными словами, ток будет протекать лишь в течение одной половины периода переменного напряжения. Отсюда и название схемы — однополупериодный выпрямитель.

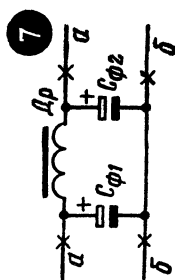
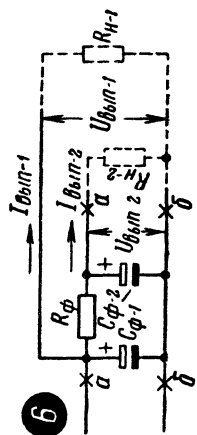
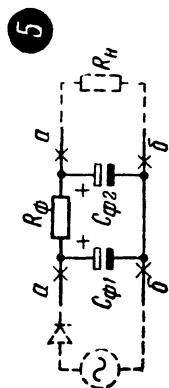
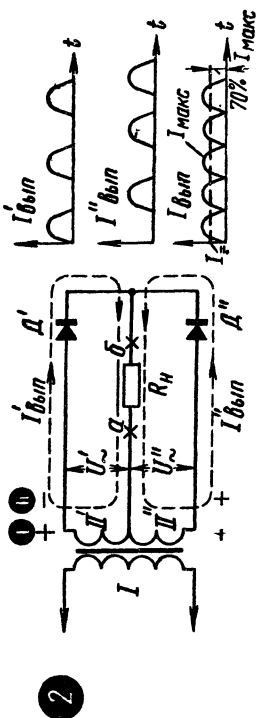
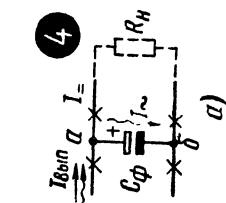
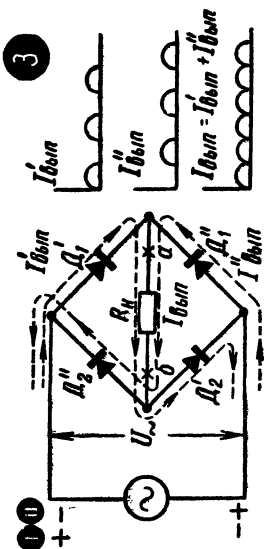
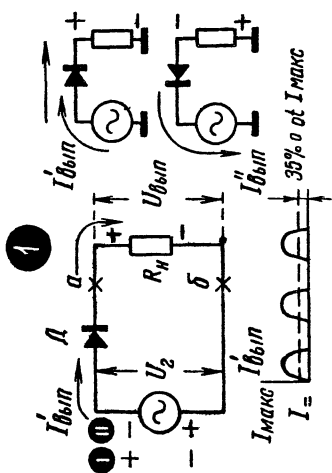
Спектр получившегося пульсирующего тока содержит гармоники с частотами, кратными частоте повторения импульсов f_1 . Первая гармоника имеет частоту f_1 , вторая в два раза более высокую частоту $f_2=2f_1$, третья частоту $f_3=3f_1$ и так далее. Амплитуды гармоник постепенно убывают — вторая оказывается слабее первой, третья слабее второй, и т. д. С помощью резонансных фильтров все эти гармоники можно выделить из пульсирующего тока, точно так же, как, пустив весь набор гармоник в общую цепь, в итоге можно получить сигнал сложной формы.

Кроме гармоник, в получившемся пульсирующем токе $I_{\text{вып}}$ есть еще одна составляющая — постоянный ток $I_{\text{=}}$. Появление этой постоянной составляющей связано с тем, что, хотя ток в цепи диода все время меняется, заряды толчками, импульсами двигаются всегда в одну сторону. Это постоянное смещение зарядов как раз и отображается постоянной составляющей $I_{\text{=}}$. В то же время изменение тока, его пульсации отображаются всем набором гармоник.

Полупроводниковый диод в нашей схеме проводит огромную работу — он из простейшего синусоидального сигнала создает очень сложный сигнал с богатым спектром, с большим числом гармоник. В некоторых схемах такое преобразование спектра сигнала используется довольно широко. Однако в выпрямителях все получившиеся гармоники — это отходы. Здесь из всей продукции полупроводникового диода нужна только постоянная составляющая $I_{\text{=}}$.

В однополупериодной схеме постоянная составляющая $I_{\text{=}}$ сравнительно невелика — не более 35% амплитуды импульса тока $I_{\text{макс}}$ (рис. 27—1). В то же время есть схемы, в которых $I_{\text{=}}$ оказывается вдвое больше — почти 70% амплитуды импульса. В этих схемах для получения выпрямленного тока используются оба полупериода переменного напряжения, и называются такие схемы двухполупериодными. Никаких принципиальных отличий между одно- и двухполупериодными схемами нет. Можно сказать, что двухполупериодная схема — это своего рода остроумный фокус, гениальная шутка давно забытого конструктора.

Одна из двухполупериодных схем — она так и называется двухполупериодной — фактически представляет собой два однополупериодных выпрямителя, включенных так, что они работают поочередно и пропускают свои выпрямленные токи



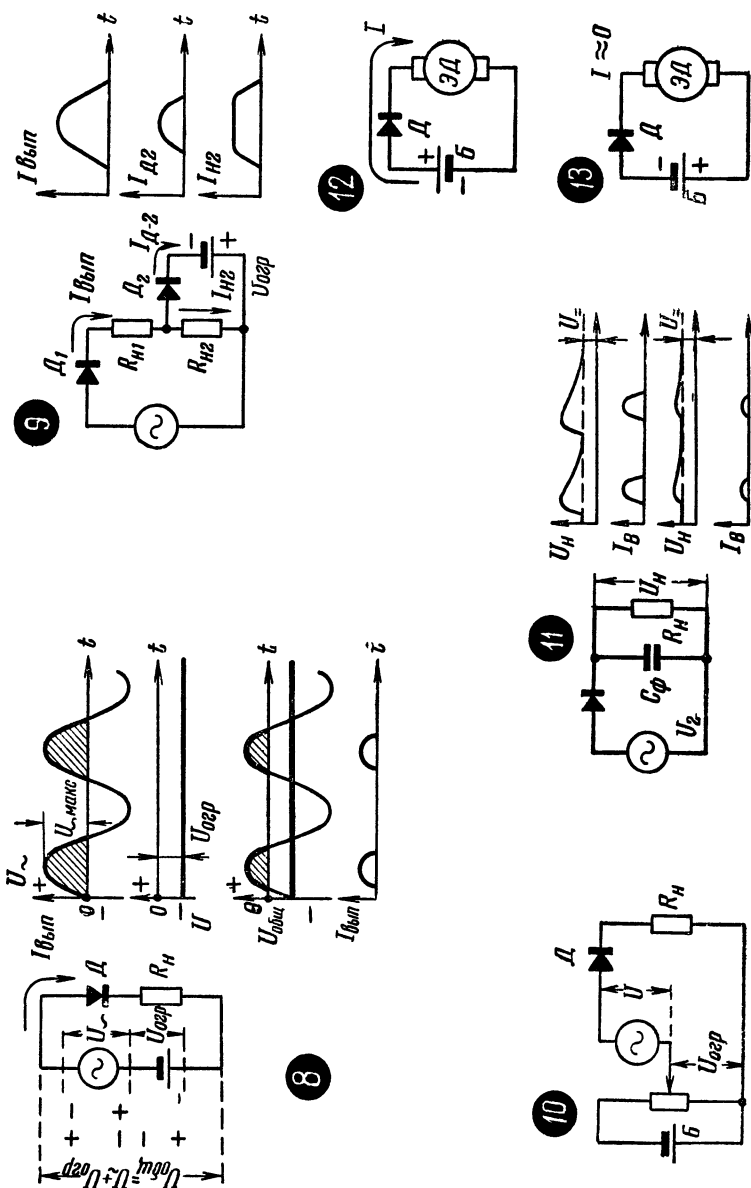


Рис. 27 Схемы с полупроводниковыми диодами.

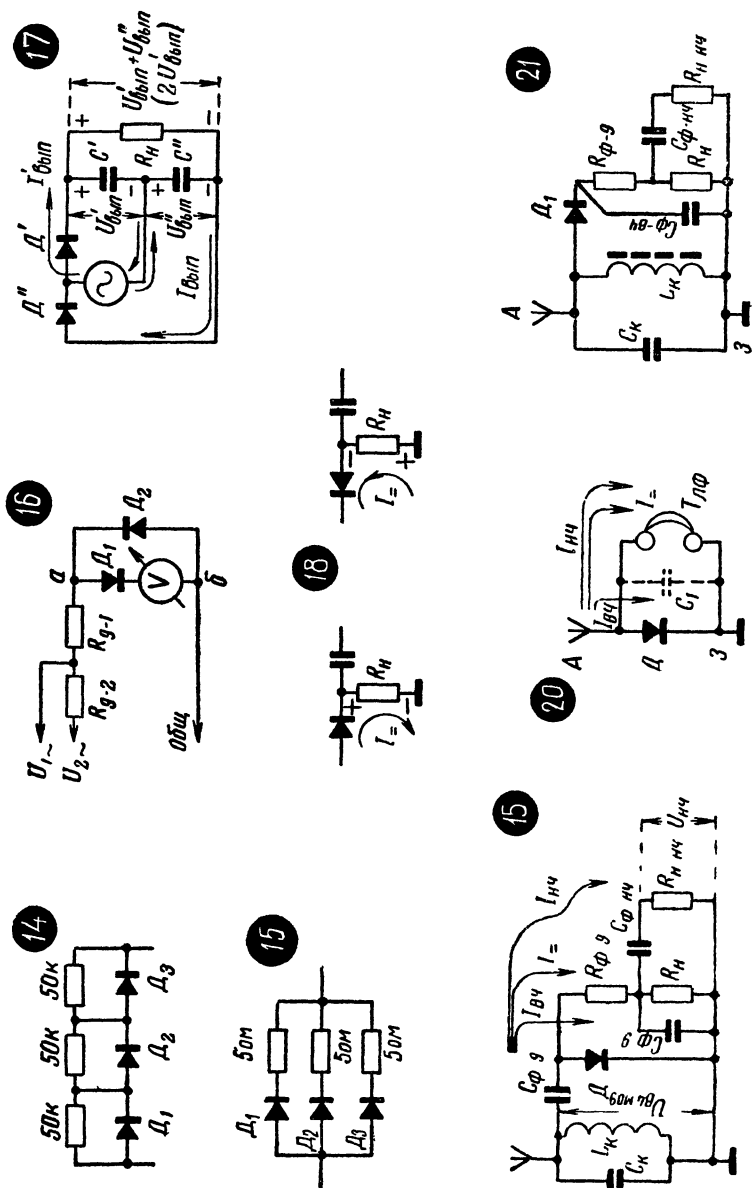


Рис. 27. Схемы с полупроводниковыми диодами (продолжение).

через общую нагрузку в одном и том же направлении (рис. 27—2). У каждого выпрямителя, у каждой половинки такой схемы свой собственный источник переменного напряжения, своя вторичная обмотка трансформатора — II' и II'' . Практически для удобства намотки это одна вторичная обмотка, дающая удвоенное напряжение, от середины которой сделан отвод.

В другом двухполупериодном выпрямителе — его схема (рис. 27—3) называется мостовой или мостиковой — только один источник переменного напряжения, но благодаря двум дополнительным диодам и здесь удастся использовать оба полупериода для создания тока I_{Σ} . В обеих этих двухполупериодных схемах постоянная составляющая выпрямленного тока достигает почти 70 % от $I_{\text{макс}}$.

Нагрузкой всех наших выпрямителей, как видно из схем, является некое условное сопротивление R_{Σ} . Практически же нагрузкой могут быть анодные или накальные цепи радиоламп, электродвигатель, транзисторный усилитель, обмотка электромагнита, заряжаемый аккумулятор, измерительный прибор и другие потребители.

До сих пор вместе с постоянной составляющей, которая нужна нагрузке, мы пропускали через нее и все переменные составляющие импульсного тока, все его гармоники. В некоторых случаях гармоники не вредят делу, но чаще их нельзя пускать в нагрузку — от выпрямителя, как правило, требуется «чистый» постоянный ток. Отделение переменных составляющих от постоянной осуществляется с помощью электрических фильтров.

Полностью избавиться от переменных составляющих выпрямленного тока практически нельзя, да это и не нужно. Нужно лишь ослабить их в определенное число раз, с тем чтобы эти переменные составляющие стали значительно слабее постоянной. А чтобы ослабить переменный ток, идущий в нагрузку, нужно создать для него более легкий обходный путь. Причем этот обходный путь должен быть легким только для переменных составляющих, иначе вместе с ними мы ослабим и постоянную составляющую I_{Σ} .

Простейшим фильтром выпрямителя может служить конденсатор C_{Φ} , подключенный параллельно нагрузке R_{Σ} (рис. 27—4). Постоянную составляющую этот конденсатор (как и всякий другой!) не пропускает, а для переменной он ведет себя как резистор, сопротивление которого x_C зависит от частоты f и емкости C_{Φ} (Воспоминание № 13).

Емкость конденсатора C_{Φ} выбирают с таким расчетом, чтобы его сопротивление x_C было значительно меньше, чем R_{Σ}

для первой гармоники выпрямленного тока, то есть для его самой низкочастотной синусоидальной составляющей. При этом исходят из того, что если конденсатор достаточно хорошо отводит от нагрузки, достаточно легко пропускает через себя первую гармонику, то он еще легче пропустит высшие гармоники, имеющие более высокие частоты, потому что емкостное сопротивление конденсатора уменьшается с частотой.

В тех случаях, когда нужна более тщательная фильтрация, более тонкая очистка выпрямленного тока от переменных составляющих, можно применить более сложные фильтры.

В П-образном фильтре с резистором (рис. 27—5) уже знакомый нам конденсатор (здесь он называется $C_{\Phi 2}$) выполняет свои обычные обязанности — накоротко замыкает переменные составляющие, отводит их от нагрузки. Но в этой схеме задача нашего конденсатора облегчается, так как еще до него фильтрацию осуществляет звено $C_{\Phi 1}R_{\Phi}$. Емкостное сопротивление конденсатора $C_{\Phi 1}$ значительно меньше, чем R_{Φ} , и переменные составляющие в значительной степени замыкаются уже через этот конденсатор. Недостаток фильтра в том, что и постоянная составляющая, прежде чем она доберется до нагрузки, должна преодолеть сопротивление R_{Φ} . На сопротивлении R_{Φ} теряется часть энергии постоянного тока, и из-за этого, как мы сейчас увидим, несколько снижается постоянное напряжение на нагрузке.

От такого недостатка свободен другой П-образный фильтр (рис. 27—7), в котором вместо R_{Φ} включен дроссель Dr . Индуктивное сопротивление x_L , в отличие от емкостного x_C , уменьшается не с ростом, а с уменьшением частоты (Воспоминание № 15), а для постоянного тока индуктивное сопротивление вообще равно нулю. Поэтому постоянная составляющая $I_{\text{н}}$ встречает лишь активное сопротивление проводов дросселя, а оно невелико. В то же время переменным составляющим дроссель оказывает большое сопротивление. Такой фильтр хотя и стоит сравнительно дорого (во всяком случае, дроссель Dr более сложная и дорогая деталь, чем резистор R_{Φ}), зато почти не снижает выпрямленного напряжения.

И, наконец, еще одна схема фильтра, применяемая сравнительно часто (рис. 27—6). На выходе этого фильтра мы получаем два постоянных напряжения — $U_{\text{вып-1}}$ и $U_{\text{вып-2}}$. Первое из них отфильтровано хуже, второе — лучше. Но зато ток $I_{\text{вып-1}}$ не проходит через R_{Φ} , не теряет на нем энергии, и напряжение $U_{\text{вып-1}}$ оказывается больше, чем $U_{\text{вып-2}}$. Полезность такой схемы связана с тем, что в реальной аппаратуре не все узлы требуют выпрямленного напряжения, одинаково хорошо очищенного от гармоник. Так, например, при питании

некоторых мощных усилителей можно допустить, чтобы мощность гармоник составляла 1—2 % общей мощности питающего тока. В то же время для микрофонных усилителей мощность гармоник в питающем напряжении не должна превышать нескольких тысячных долей процента.

Как видите, электрические фильтры вместе с диодом участвуют в преобразовании формы сигнала, в нашем случае — в преобразовании переменного тока в постоянный. Диод усложняет спектр сигнала, создает в нем новые составляющие. Фильтры, наоборот, упрощают спектр, подавляя некоторые его составляющие. Электрические фильтры — это важнейшие и, пожалуй, самые распространенные элементы радиоэлектронных устройств. Мы будем с ними встречаться на протяжении всей книги и постепенно увидим, из каких соображений в тех или иных случаях выбираются элементы фильтра.

Так, например, уже сейчас нетрудно сообразить, что необходимая емкость конденсаторов фильтра выпрямителя зависит от того, насколько нужно очистить выпрямленный ток от гармоник, а также от величины сопротивления нагрузки R_n . Чем меньше R_n , тем меньшим должно быть и шунтирующее нагрузку емкостное сопротивление конденсаторов, тем, следовательно, большей должна быть их емкость.

Емкость этих конденсаторов зависит также и от выбранной схемы — в двухполупериодных схемах частота самой опасной (самой низкочастотной) первой гармоники в два раза выше, чем в однополупериодной схеме, так как импульсы тока следуют в два раза чаще. А это значит, что емкость фильтра конденсаторов в двухполупериодном выпрямителе может быть в два раза меньше, чем в однополупериодном.

(Проще всего, конечно, при выборе $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$ исходить из правила «чем больше емкость фильтра, тем лучше», но такой подход может привести вас к серьезным затруднениям, причем не только схемным, но и финансовым.)

Емкость первого конденсатора фильтра $C_{\phi 1}(C_{\phi})$ (в схеме рис. 27 — 4, 5, 6, 7) влияет не только на фильтрацию, но и на величину выпрямленного напряжения. Можно считать, что это напряжение создается на нагрузке постоянной составляющей тока $I_{\text{ср}}$ и, согласно закону Ома, численно равно $U_{\text{ср}} = I_{\text{ср}} R_n$. Прежде чем говорить о влиянии $C_{\phi 1}(C_{\phi})$ на напряжение $U_{\text{ср}}$, несколько слов еще об одной скромной профессии диода — о его работе в качестве ограничителя.

Давайте вместе с переменным напряжением подведем к диоду постоянное, причем так, чтобы это постоянное напряжение запирало диод, действовало на него не в прямом,

а в обратном направлении (рис. 27—8). В этом случае диод не будет пропускать ток не только во время отрицательного полупериода переменного напряжения U_{\sim} , но в течение некоторой части положительного полупериода. Только после того, как переменное напряжение, действующее во время положительного полупериода против постоянного $U_{огр}$, полностью скомпенсирует его, только после этого диод откроется — начнет пропускать ток.

Время существования тока зависит от соотношения постоянного и переменного напряжений. Чем больше $U_{огр}$, тем дольше диод остается закрытым, тем меньше времени существуют импульсы тока, или, как говорят иначе, тем сильнее они подрезаны снизу. Такое ограничение тока «снизу» обычно называют его отсечкой. Плавное изменение $U_{огр}$ можно регулировать степень отсечки (рис. 27—10). Если $U_{огр}$ будет больше, чем амплитуда переменного напряжения $U_{\sim \text{макс}}$, то диод не откроется никогда и тока в его цепи вообще не будет.

В другой схеме диод работает ограничителем по максимуму, срезает верхушку импульса тока (рис. 27—9). Здесь диод D_2 заперт, причем заперт лишь в некоторой части положительного полупериода, а в начале и в конце этого полупериода он оказывается открытым. Когда диод D_2 открывается, то сильно шунтирует своим небольшим прямым сопротивлением нагрузку $R_{н2}$. При этом весь ток идет через D_2 , и импульс тока $I_{н2}$ оказывается ограниченным сверху.

Теперь вернемся к выпрямителям.

Для того чтобы легче было понять, что происходит в схеме, когда в ней действует переменное напряжение, можно «остановить мгновенье» и рассматривать это напряжение как постоянное, действующее то в одну, то в другую сторону. Часто можно видеть, как радиолюбители пользуются таким упрощенным методом, и рассуждения их при этом выглядят примерно так: «...Если здесь «плюс», то здесь «минус»... Если этот «минус» меньше этого «плюса», то в итоге будет «плюс»... Этот «плюс» соединен с этим «минусом», значит, оба источника действуют в одну сторону...» и т. д. Причем обозначения «плюс» и «минус» относят и к переменным напряжениям, но при этом, естественно, учитывается, что «плюс» и «минус» у них непрерывно меняются местами. Подобное отношение к переменному напряжению является, конечно, упрощением, но нам такое упрощение и нужно.

На некоторых схемах возле генератора, где действует переменное напряжение U_{\sim} , вы увидите пары «плюсов» и «минусов», а над каждой такой парой на черной точке стоит штрих или два штриха. Они-то и показывают, какому полу-

периоду соответствует та или иная пара «плюс»-«минус», та или иная полярность (временная!) переменного напряжения.

В схеме рис. 27—11, так же как и в ограничителях (рис. 27—8, 10), на диод всегда действуют два напряжения — переменное с амплитудой $U \sim_{\text{макс}}$ и постоянная составляющая выпрямленного напряжения. Причем постоянное напряжение, как и в ограничителе, действует в обратном направлении, действует против переменного, когда оно отпирает диод. И поэтому диод в выпрямителе всегда работает с отсечкой тока.

От чего же зависит величина напряжения $U_{=}$, которое вполне можно назвать ограничивающим напряжением? Мы уже говорили (стр. 71), что $U_{=}$ прежде всего зависит от потребляемого выпрямленного тока, а значит, от сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$. Но кроме того, величина $U_{=}$ зависит еще и от емкости конденсатора $C_{\text{ф1}}$ ($C_{\text{ф}}$ на схеме рис. 27—4).

Дело в том, что во время положительных полупериодов, то есть когда диод пропускает ток, этот конденсатор заряжается до амплитудного напряжения $U \sim_{\text{макс}}$, а во время отрицательных полупериодов он разряжается через нагрузку $R_{\text{н}}$ ($C_{\text{ф1}}$ не может разрядиться через генератор — диод этого не допустит). Чем больше емкость конденсатора $C_{\text{ф1}}$ и чем меньше потребляемый от него ток (то есть чем больше сопротивление $R_{\text{н}}$), тем медленнее разряжается этот конденсатор, тем меньше пульсации выпрямленного напряжения и больше его постоянная составляющая $U_{=}$ (рис. 28). Отсюда можно сделать сразу два вывода — один приятный и один неприятный.

Приятный вывод такой. Увеличивая $C_{\text{ф1}}$, можно поднять постоянное напряжение $U_{=}$ вплоть до амплитуды переменного напряжения $U \sim_{\text{макс}}$. Это значит, например, что если подвести к выпрямителю напряжение 6,3 в с обмотки накала ламп силового трансформатора, то можно получить $U_{=}$ около 9 в (при эффективном напряжении 6,3 в амплитуда достигает $6,3 \cdot 1,4 = 8,8$ в; см. стр. 148). Аналогично прямо от сети с напряжением 127 в можно получить постоянное напряжение до 180 в, а от сети 220 в — до 310 в. Не забудьте, что это максимально возможные величины. В действительности постоянное напряжение меньше, причем тем меньше, чем больше потребляемый от выпрямителя ток.

Теперь второй вывод — диод должен иметь трехкратный запас по обратному напряжению. При достаточно большой емкости $C_{\text{ф1}}$ и небольшом токе $I_{=}$, а кроме того, во всех случаях жизни при обрыве цепи $R_{\text{н}}$ напряжение $U_{=}$ примерно равно амплитуде переменного $U \sim_{\text{макс}}$. А это значит, что во время отрицательного (обратного) полупериода, когда диод не пропускает тока, к нему приложено два согласованно дей-

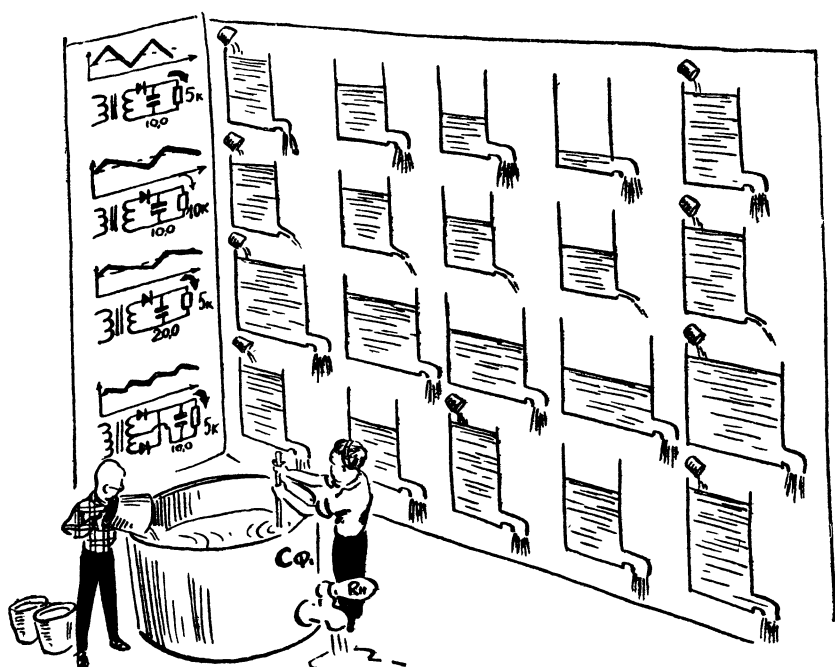


Рис. 28. Чем больше емкость фильтра и чем меньше потребляемый от выпрямителя ток, тем больше постоянное напряжение на нагрузке, тем меньше пульсации выпрямленного напряжения.

ствующих и равных напряжения U_- и $U_{\sim \text{макс}}$. А поскольку $U_{\sim \text{макс}} \approx 1,4 U_{\sim}$, то общее обратное напряжение на диоде достигает $2,8 U_{\sim}$ (для круглого счета примем $3 U_{\sim}$). Отсюда и сам вывод — подбирать диод для выпрямителя нужно с таким расчетом, чтобы допустимое обратное напряжение диода $U_{\text{обр}} - \text{доп}$ было в три раза больше, чем эффективное переменное напряжение U_{\sim} подводимое к выпрямителю.

Для мостовых схем, где в каждое плечо последовательно включено два диода, запас напряжения для каждого из них нужен лишь полуторный. Попутно заметим, что если запаса электрической прочности у диода не хватает, если допустимое обратное напряжение у него слишком мало, то во всех схемах можно включать несколько одинаковых диодов последовательно вместо одного. При этом диоды нужно зашунтировать одинаковыми и сопротивлениями по 30—100 ком (рис. 27—14), чтобы уравнивать обратные сопротивления диодов и чтобы

обратное напряжение распределялось между ними поровну. При последовательном соединении $U_{\text{обр-доп}}$ всех диодов суммируется.

При выборе диода по величине наибольшего прямого тока $I_{\text{пр-макс}}$ расчетов делать не нужно. В таблицах 1—5 указан допустимый средний выпрямленный ток $I_{\text{вып}}$ и уже учтено, что импульс тока может быть в два-три раза больше. Если нужно увеличить допустимую величину прямого тока, включают параллельно несколько одинаковых диодов. Так, например, при параллельном включении трех диодов общая величина $I_{\text{вып}}$ будет в три раза больше, чем для одного. Чтобы всем диодам досталась равная доля общего тока, включают выравнивающие резисторы с небольшим (1—5 ом) и обязательно одинаковым сопротивлением (рис. 27—15). (В некоторых выпрямителях ток в момент включения может в десять—двадцать раз превышать средний выпрямленный ток. Чтобы диод в этот трудный момент не вышел из строя, последовательно с ним включают резистор с небольшим сопротивлением 5—10 ом.)

В качестве «бесплатного приложения» познакомимся с одной остроумной схемой спасения диода от опасного обратного напряжения (рис. 27—16). Эта схема применяется почти во всех вольтметрах, где большое переменное напряжение нужно измерить с помощью стрелочного прибора постоянного тока. Для этого прежде всего используют простейший выпрямитель — диод D_1 , который под действием измеряемых напряжений создает в цепи прибора постоянный ток. При этом, естественно, по отклонению стрелки можно определять величину подводимого напряжения U_{\sim} .

Но обратное сопротивление может оказаться больше добавочных сопротивлений вольтметра, и тогда при измерении достаточно высокого U_{\sim} диод может выйти из строя. И именно в тот момент, когда на него действует обратное напряжение. Эту возможность как раз и исключает диод D_2 . Во время обратных для D_1 полупериодов диод D_2 пропускает ток и шунтирует участок ab . Поэтому сопротивление участка ab никогда не бывает большим и напряжение на D_1 даже в обратные для этого диода полупериоды не превышает долей вольта. Такая схема защиты выпрямляющего диода применяется в большинстве авометров.

Нам предстоит познакомиться еще с одной профессией диода — с детектированием. Собственно говоря, в детекторе диод работает так же, как выпрямитель. Главная особенность в том, что в подавляющем большинстве случаев — в частности, в приемниках и телевизорах — детектируется вы-

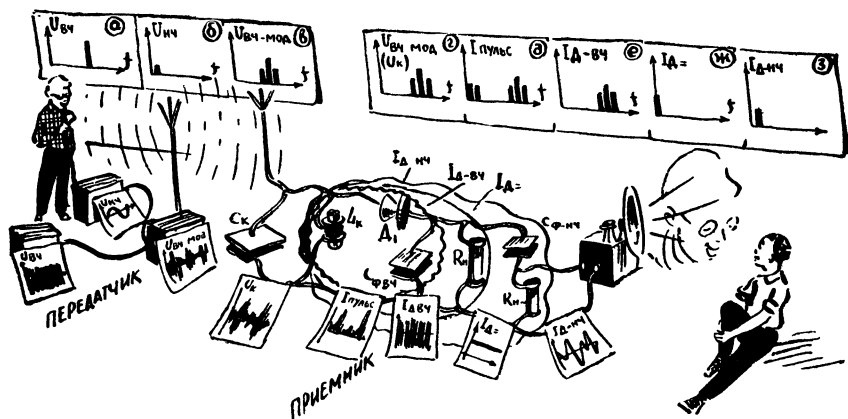


Рис. 29. Низкочастотная составляющая протектированного сигнала — это копия низкочастотного сигнала, который на передатчике осуществлял модуляцию.

сокочастотный сигнал и для этого пригодны лишь точечные диоды (рис. 20).

В типичной схеме детектора (рис. 27—21) переменное напряжение $U_{вч-мод}$ подводится к диоду с колебательного контура $L_k C_k$, который в свою очередь получает сигнал либо непосредственно из антенны, либо от предварительного усилителя высокой частоты (ВЧ). Переменное напряжение $U_{вч-мод}$, подводимое к детектору, модулировано по амплитуде (рис. 29). Именно в изменениях амплитуды сигнала записана та информация — речь, музыка, телеграфные знаки, — которую радиоволны принесли с передающей станции к приемнику. Выделить эту информацию — вот задача детектора.

Сам модулирующий сигнал, который на передатчике оставил свои «отпечатки» на высокочастотном сигнале, — это сигнал низкой частоты. Мы получили бы его график, если бы соединили амплитуды высокочастотного тока пунктирной линией (часто применяют выражение «низкочастотная огибающая»). Но то, что легко сделать карандашом, не так-то просто может повторить электрическая цепь. И не всякая цепь может «прочитать», что записано в радиосигнале, не всякая цепь может обнаружить, что амплитуда его модулирована.

В спектре модулированного сигнала нет низкочастотной составляющей (рис. 29, листки в, г). Это может показаться странным, но это факт. Выделив из модулированного тока все его составляющие, вы не обнаружите среди них тока низкой

частоты, который отображал бы принесенную информацию. Низкочастотная составляющая появляется лишь после того, как за дело берется диод. Именно он меняет форму модулированного высокочастотного тока таким образом, что в его спектре появляется нужный нам ток низкой частоты.

Происходит это довольно просто: благодаря диоду в цепи детектора появляется уже не переменный, а пульсирующий ток высокой частоты (листок *д*), который состоит из трех составляющих — высокочастотной $I_{д-вч}$, точнее, нескольких высокочастотных составляющих (листок *е*), низкочастотной $I_{д-нч}$ и постоянной $I_{д=}$. Дальше в дело вступают фильтры. Они-то и выделяют основную продукцию детектора — низкочастотный сигнал.

На всех наших схемах пути составляющих $I_{д-вч}$ и $I_{д-нч}$ для удобства показаны тонкими стрелками. Но это совсем не значит, что речь идет о постоянных токах — $I_{д-вч}$ и $I_{д-нч}$, это самые настоящие переменные токи, которые, лишь сложившись с $I_{д=}$, дают в сумме пульсирующий ток одного направления. Стрелки, которые относятся к переменным токам, сделаны «волнистыми», а нужны они лишь для того, чтобы легче проследить путь того или иного тока.

Несколько слов о выборе деталей фильтра. Емкость $C_{ф-нч}$ выбрана так, чтобы этот конденсатор легко пропускал низкочастотную составляющую. Высокочастотная составляющая через $C_{ф-нч}$ не пойдет, так как ей при этом придется преодолеть довольно большое сопротивление $R_{н\sim}$. Резистор $R_{н\sim}$ — это низкочастотная нагрузка, на которой получают выходной сигнал: напряжение низкой частоты $U_{нч}$. Сопротивление $R_{н\sim}$ во много раз больше, чем емкостное сопротивление конденсатора $C_{ф-вч}$ на высокой частоте. В то же время $C_{ф-вч}$ не «уведет» от нагрузки $R_{н\sim}$ основную продукцию детектора — низкочастотную составляющую $I_{д-нч}$, так как на низкой частоте емкостное сопротивление этого конденсатора очень велико за счет его небольшой емкости. С конкретными значениями деталей фильтра вы можете познакомиться на рис. 45, а также на других практических схемах ламповых и транзисторных приемников.

Схема рис. 27—21 называется последовательной, так как контур, диод и нагрузка (основной нагрузкой детектора считается $R_{н}$, а от нее уже идут ответвления для $I_{д-нч}$ и $I_{д-вч}$) соединены последовательно. Во второй схеме (рис. 27—19) эти элементы соединены параллельно, и она так и называется параллельной. В обеих схемах направление включения диода не имеет никакого значения: при любом из двух возможных направлений низкочастотный сигнал будет одинаковым. Од-

нако в некоторых случаях в детекторе используются и отходы производства — постоянная составляющая $I_{\text{=}}$ (в выпрямителе она была основной продукцией!). А в этом случае уже нужно думать, как включать диод: при разных включениях направление тока $I_{\text{=}}$ через нагрузку, а значит, и полярность постоянного напряжения $U_{\text{=}}$ на нагрузке будет разной (рис. 27—18).

Для того чтобы оценить достоинства и недостатки детекторного приемника, а больше для того, чтобы почувствовать, что дадут нам в дальнейшем усилители слабого сигнала, рекомендуется изготовить детекторный приемник по простой (рис. 27—19, 21) или по самой простой (рис. 27—20) схеме. Данные его деталей вы найдете на стр. 115. А те, для кого детекторный приемник будет первым шагом в практическую электронику, могут воспользоваться его более подробным описанием (стр. 111) и монтажной схемой, помещенной на цветной вкладке (рис. 43).

Кроме выпрямления переменного тока и детектирования, диод выполняет в электронной аппаратуре еще множество других работ. Вот лишь один из многих примеров — схема, где диод работает в должности автоматического выключателя, в роли «дуракоупорного» прибора, который не позволяет рассеянному или неграмотному работнику довести дело до аварии. В данном случае (рис. 27—12, 13) диод следит, чтобы какой-либо «ответственный» двигатель, например привод насоса, не пошел в обратную сторону из-за неправильного подключения батареи B . При таком неправильном включении диод своим большим обратным сопротивлением просто разрывает цепь. Подобных примеров можно привести немало — полупроводниковые диоды широко применяются в автоматике.

На этом мы, пожалуй, и закончим знакомство с полупроводниковым диодом. Мы увидели, что у диода есть много интересных профессий, что он умеет делать много важных и полезных дел. Но не только поэтому мы уделили ему столько внимания. Сделали мы это еще и потому, что почти все рассказанное о полупроводниковом диоде необходимо знать для знакомства с полупроводниковым триодом: от диода до главной нашей цели, до транзистора, остается буквально один шаг. И сейчас этот шаг будет сделан.

«З Е М Л Я!»

Десять лет вынашивал Христофор Колумб планы дальнего плавания через Атлантический океан. Десять лет великий путешественник агитировал купцов, вельмож, королей,

правительственных чиновников, добывал деньги на снаряжение кораблей. Наконец 3 августа 1492 года три небольших, по нашему времени, корабля (два из них, «Пинта» и «Нинья», имели длину около двадцати метров, а самый крупный из парусников, «Санта Мария», имел водоизмещение около ста тонн, чуть побольше, чем у нынешнего речного трамвайчика) вышли из небольшого испанского порта Палис и взяли курс на запад.

Семьдесят дней болтало упрямые парусники по океану. Семьдесят длинных, бесконечно длинных дней. Семьдесят страшных черных ночей. Семьдесят шагов в неизвестность...

Уже бродит среди бывалых матросов безумный огонек бунта: «Куда мы плывем?.. Зачем?.. Надо возвращаться назад, пока не поздно...» Уже сам капитан, хотя внешне, как всегда, спокоен и решителен, все чаще устремляет свой взгляд в бесконечность: «Куда мы плывем? Где же Индия?.. Где же земля?»... Сомнения, сомнения, тревога.

Но вот ночью 12 октября матрос Педро Триана с верхушки мачты увидел в свете луны полоску берега. «Земля! — закричал матрос хриплым от нервного напряжения голосом. — Земля!!!» Парусники капитана Христофора Колумба, оставив позади пять тысяч долгих километров Атлантики, достигли Багамских островов, достигли восточного побережья будущей Америки.

Сейчас настала и наша с вами очередь радостно крикнуть: «Земля!» После долгого и трудного путешествия, после того, как перед нашим взором прошли фантастические проекты создания мощной копии слабого сигнала и загадочные «черные ящики», в которых неведомый скульптор должен делать свое непонятное дело, после того, как мы прошли сквозь изумительные архитектурные шедевры — алмазоподобные кристаллические решетки германия и кремния и сумели увидеть, как дефекты этих решеток — свободные электроны и дырки создают проводимость полупроводникового кристалла, после того, наконец, как с помощью примесей мы научились резко увеличивать проводимость полупроводников, создавать из них *p*-переходы, научились строить и понимать характеристики полупроводниковых диодов, — после всего этого мы все же достигли своей цели. Мы наконец приплыли к транзистору, и перед нами открылась огромная, неведомая пока страна. Настал момент причалить и высадиться на берег. И сейчас мы это сделаем.

Для того чтобы получить полупроводниковый триод — транзистор, — нужно объединить два плоскостных полупроводниковых диода, одну из зон сделать у них общей. Нужно, на-

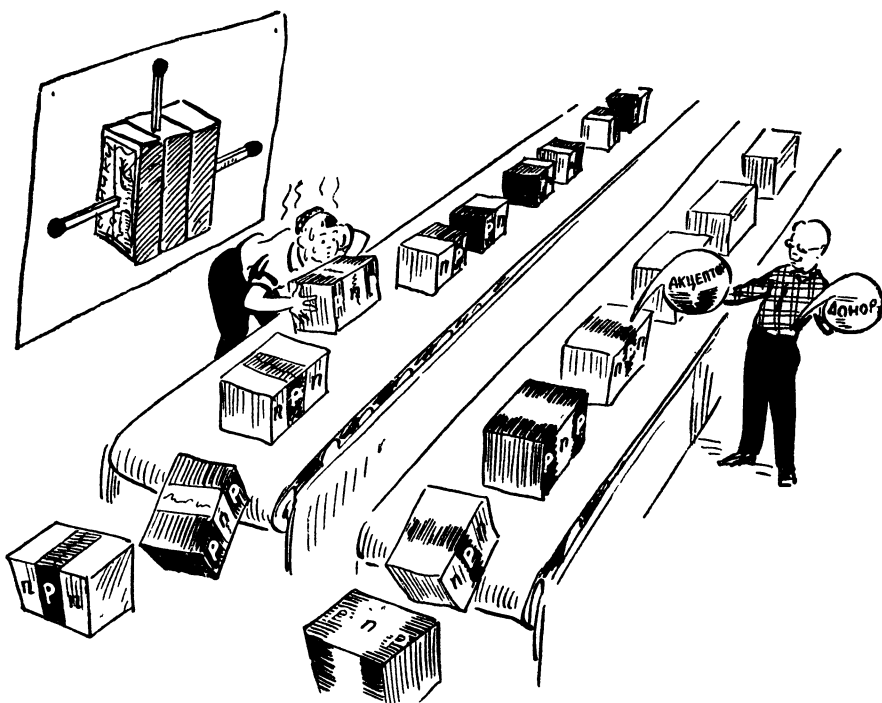


Рис. 30. Полупроводниковый триод, по сути дела, представляет собой два полупроводниковых диода с одной общей зоной.

пример, взять за основу полупроводник n -типа и с двух противоположных сторон с помощью акцепторных примесей создать в нем проводимость p -типа. В этом случае мы и получим два диода, а точнее, один сдвоенный диод — в центре останется зона n , а слева и справа от нее появятся зоны p . Таким образом в одном кристалле будет создано два самостоятельных pn -перехода (рис. 30).

Полученный нами прибор — не что иное, как транзистор. По типу имеющихся в нем зон — это транзистор со структурой $p-n-p$, или, короче, транзистор $p-n-p$. Точно так же, создав в центре кристалла зону p , общую для обоих диодов, а по краям две зоны n , мы получим транзистор $n-p-n$. Принципиальной разницы между этими транзисторами нет, работают они одинаково хорошо, однако в силу некоторых технологических соображений наиболее широко выпускаются транзисторы со структурой $p-n-p$.

Транзистор, который мы сделали из двух плоскостных диодов, тоже называется плоскостным. Первые образцы транзисторов были точечными — их получали, «приткнув» к полупроводниковому кристаллу две тонкие проволоочки. Но вот уже много лет точечные транзисторы не выпускаются, так как они оказались хуже плоскостных. Существуют разные способы производства плоскостных транзисторов (стр. 247), и все они в той или иной степени похожи на наш учебный способ производства — объединение двух полупроводниковых диодов в одном приборе.

Для того чтобы облегчить дальнейший рассказ, давайте сразу же введем названия получившихся у нас трех зон транзистора. Средняя зона получит название «база», одна крайняя зона — «эмиттер», вторая — «коллектор». В дальнейшем станет ясно, почему «детали» транзистора называются именно так, а не иначе. А пока ограничимся лишь переводом этих слов на русский язык.

Слово «эмиттер» означает «выбрасывающий, выпускающий». Все эти определения в данном случае относятся к электрическим зарядам. Эмиттер как бы выбрасывает, впрыскивает заряды в остальные слои транзистора, выпускает эти заряды в путешествие по электрическим цепям усилителя.

Коллектор — наоборот — собирает заряды на выходе из транзистора, и именно этим объясняется само его название. Слово «коллектор» означает «собирающий» и происходит от того же корня, что и «коллекционер» — «собиратель».

Название «база» — «основа» — имеет историческое происхождение, но применительно к нашей упрощенной модели транзистора оно вполне оправдано. Ведь, сооружая свой условный транзистор, мы взяли за основу именно базу — средний полупроводниковый кристалл, а затем уже создали *pn*-переходы, введя с двух сторон в кристалл необходимые примеси. Тот *pn*-переход, который возник между базой и эмиттером, мы для краткости будем называть эмиттерным переходом, а *pn*-переход между базой и коллектором будем называть коллекторным переходом.

Кстати, о конструкции транзистора. Пока будем считать, что все три его составные части — эмиттер, база и коллектор — устроены одинаково и чем-то напоминают три склеенные спичечные коробки.

Итак, мы построили транзистор. Что дальше? А дальше нужно заставить его усиливать слабые электрические сигналы. Нужно заставить транзистор выполнять роль скульптора — «лепить» из постоянного тока мощную копию слабого сигнала.

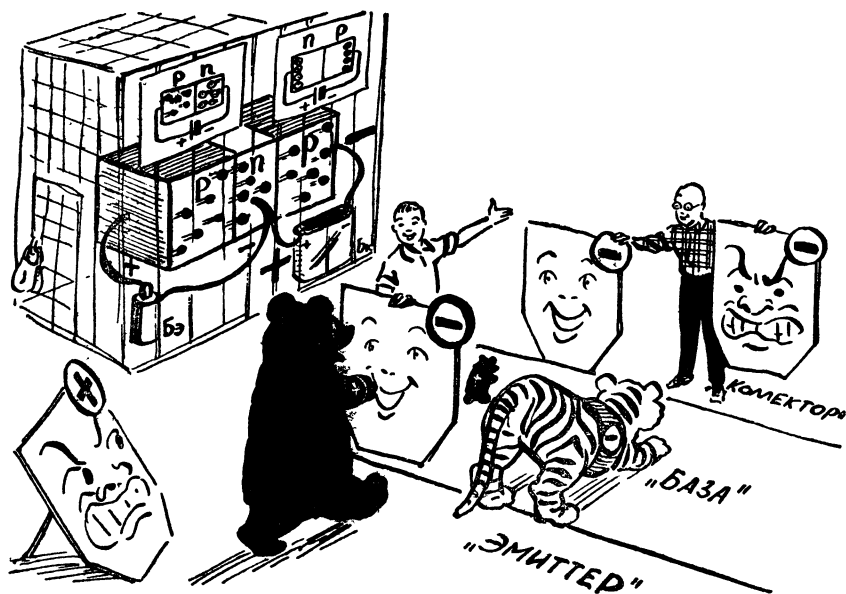


Рис. 31. Эмиттерный $p\text{-}n$ -переход транзистора всегда включен в прямом направлении, а коллекторный $p\text{-}n$ -переход — в обратном направлении.

Для начала подведем к транзистору необходимые питающие напряжения и посмотрим, что в нем при этом будет происходить. Все свои опыты мы будем проводить с транзистором $p\text{-}n\text{-}p$, так как именно эти транзисторы в дальнейшем будут нам встречаться чаще всего.

К нашему подопытному транзистору, как и к любому другому, необходимо подвести два питающих постоянных напряжения, и мы пока используем для этой цели две отдельные батареи (рис. 31).

Эмиттерная батарея B_3 подключена к эмиттерному переходу «плюсом» к эмиттеру и «минусом» к базе. Это значит, что напряжение E_{36} действует на эмиттерный переход в прямом направлении. Само обозначение E_{36} в данном случае говорит о том, что речь идет о напряжении («плюс») на эмиттере относительно базы. Или, что то же самое, о напряжении («минус») на базе относительно эмиттера. Под действием «минуса» на базе туда начнут двигаться дырки из эмиттера (поскольку у нас диод $p\text{-}n\text{-}p$, то в эмиттере основные носители — это дырки), то есть через диод эмиттер — база пойдет прямой ток (рис. 32).

В коллекторном переходе все наоборот. Чтобы транзистор работал, постоянное коллекторное напряжение E_K должно действовать на свой переход в обратном направлении, и поэтому батарею B_K мы подключим «плюсом» к базе и «минусом» — к самому коллектору, а для чистоты опыта на некоторое время отключим батарею B_3 . «Минус» коллектора, естественно, не будет притягивать электроны из базы (не забудьте, что в базе создана n -проводимость и основные носители там — электроны), и через диод база — коллектор, то есть через коллекторный переход, ток не пойдет.

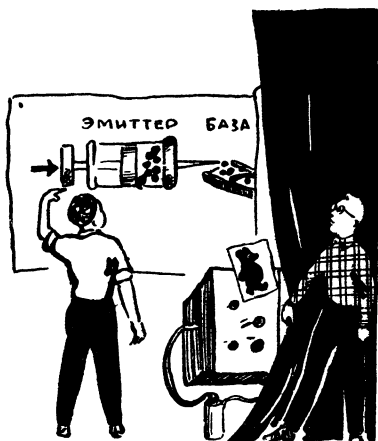


Рис. 32 В транзисторе p - n - p на базе действует «минус» относительно эмиттера, и в базу из эмиттера устремляются дырки

У нас есть два независимых полупроводниковых диода — эмиттерный и коллекторный переходы, и каждый из них включен в цепь своей собственной батареи. Один диод включен в прямом направлении (эмиттерный переход), и через него идет достаточно большой прямой ток. Другой диод включен в обратном направлении (коллекторный переход), и в его цепи тока нет. Что делать дальше? А дальше нам прежде всего нужно проверить, насколько уместно по отношению к этим диодам мы применили слово «независимые».

Действительно, оба диода, образующие транзистор, имеют одну общую зону n . Не окажется ли, что через эту зону один из диодов, один из pn -переходов транзистора, влияет на другой pn -переход? Не окажется ли, что эмиттер каким-то образом влияет на коллектор через базу? Ответ на эти вопросы может подсказать уже знакомое нам слово «диффузия». И в данном случае речь пойдет о диффузии электрических зарядов (в нашем конкретном случае — дырок) в самой базе.

Дырки, попадающие в базу из эмиттера, казалось бы, должны немедленно без каких-либо отклонений уйти к «минусу» батареи B_3 и через нее вернуться в эмиттер (рис. 32, 33, листок А). Ведь именно «минус» на базе привел в нее из эмиттера эти дырки, и именно к «минусу» дырки должны

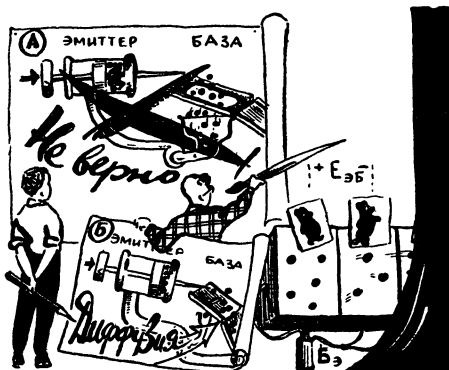


Рис. 33. В результате диффузии дырки проходят через базу в область коллекторного pn -перехода.

ского вывода, и происходит нейтрализация дырок, превращение их в нейтральные атомы. При этом освобождается место и для новых, идущих со стороны эмиттера дырок, и для новых, идущих со стороны «минуса» батареи свободных электронов. Движение дырок, то есть прямой ток через эмиттерный pn -переход, идет непрерывно.

У нас получилась хотя и очень упрощенная, но весьма правдоподобная картина. И именно так все происходило бы, если бы не диффузия дырок в базе.

Дырки движутся по базе не только под действием электрических сил, не только под действием «минуса», зовущего их в цепь эмиттерной батареи $B_э$. Наряду с таким упорядоченным движением дырки еще и расталкивают друг друга (напомним о примечании на стр. 26). Дырки стремятся разойтись из районов своего наибольшего скопления в те районы базы, где этих дырок сравнительно мало. В этом и состоит диффузия (стр. 56). Именно она приводит к тому, что некоторая часть дырок, пропутешествовав через всю базу, подходит к пограничным районам коллекторного pn -перехода (рис. 33, листок Б). И вот здесь-то все и начинается...

Коллекторный переход включен в цепь своей коллекторной батареи B_k в обратном направлении и поэтому ведет себя как большое сопротивление. Но что значит «большое сопротивление»? Это ведь совсем не означает, что между базой и коллектором стоят какие-то невидимые заборы, препятствующие движению зарядов. «Большое сопротивление» просто означает, что нет самих свободных зарядов, которые могли бы

стремиться в первую очередь. В самом упрощенном виде вся эта сцена могла бы выглядеть так: к базе в огромных количествах подходят свободные электроны с «минуса» батареи $B_э$ (на то он и «минус»!), а с другой стороны — от эмиттера (на то он и зона p !) к базе подходят дырки. Дырки движутся сквозь базу, устремляются к ее выводу, который соединен с «минусом» батареи — поставщиком свободных электронов. Здесь, в районе металличе-

двигаться и создавать ток. В области коллекторного *pn*-перехода зарядов нет, потому что они ушли оттуда. Этот переход включен именно так, что напряжение E_k оттягивает основные заряды от пограничной полосы, — дырки уходят из прилегающих к границе районов базы (рис. 17).

И вот теперь представьте себе, что в этот самый пограничный район базы диффузия загоняет пришедшую из эмиттера дырку. Разумеется, «минус» коллекторной батареи сейчас же потянет эту дырку к себе, и она немедленно перескочит в коллектор. Мы не будем пока говорить обо всех последствиях этого «прыжка», скажем лишь об одном. Появившись в пустом коллекторном переходе, дырка уменьшит его сопротивление. И чем больше дырок проникнет в коллекторный переход, тем меньше будет его сопротивление.

Давайте еще раз проследим всю цепочку событий.

Первое: прямой ток через эмиттерный переход поставляет в базу дырки (рис. 32). Второе: в результате диффузии дырки проходят через всю базу и попадают в район коллекторного перехода (рис. 33). Третье: попавшие в коллекторный переход дырки уменьшают его сопротивление, создают коллекторный ток (рис. 34). И отсюда делаем самый главный вывод: изменяя ток в цепи эмиттер — база, мы изменяем сопротивление цепи коллектор — база, изменяем коллекторный ток.

Не об этом ли мы мечтали? Не к этому ли стремились все время? Наконец-то мы нашли нужного нам скульптора. Действительно, если в эмиттерную цепь включить источник слабого сигнала, то он заставит изменяться ток в этой цепи. И, значит, вслед за слабым сигналом, повторяя все его «взлеты» и «падения», будет меняться сопротивление коллекторного *pn*-перехода. А поскольку коллекторный переход включен в цепь мощного источника постоянного тока — батареи B_k , то в итоге под действием входного сигнала будет изменяться выходной ток, произойдет усиление сигнала.

В этом описании, правда, остается еще одна маленькая неясность. Еще нужно доказать, что сигнал на выходе транзистора будет не просто копией входного сигнала, а его мощной копией. Нужно доказать, что произойдет не простое копирование сигнала, а именно его усиление.

Нас, конечно, не устроит доказательство от противного: если бы транзисторы не усиливали, то кто бы стал их делать! Мы попробуем проверить усилительные способности транзистора путем рассуждений и расчетов, а также с помощью простейших экспериментов.

Прежде всего внесем поправку в простейшую модель транзистора, где три зоны полупроводникового триода отобража-

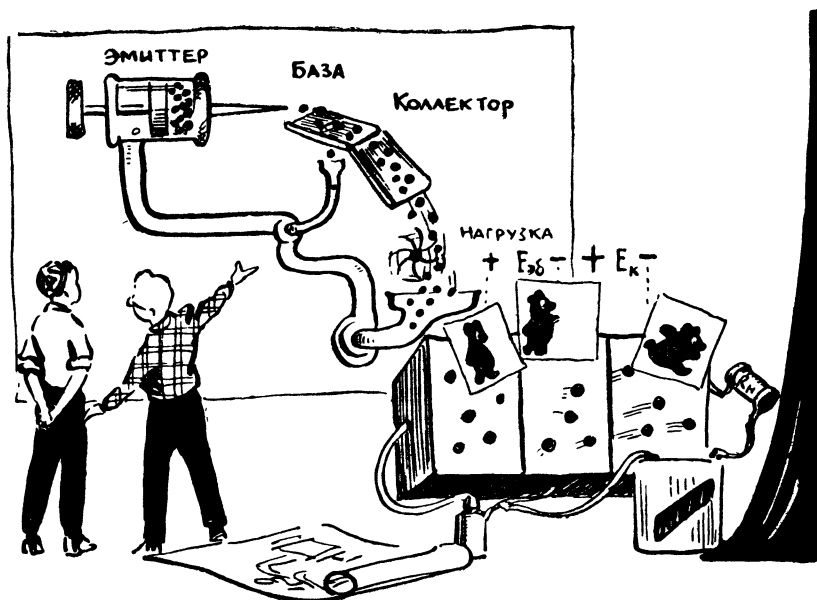


Рис. 34. Для коллекторного *pn*-перехода, включенного в обратном направлении, пришедшие из базы дырки—это, по сути дела, неосновные заряды, и поэтому они ускоряются коллекторным напряжением, создают коллекторный ток.

лись тремя сложенными вместе спичечными коробками (рис. 30). Выбросим среднюю коробку и вместо нее вставим пластинку тонкого картона. Теперь наша модель больше похожа на настоящий транзистор, так как базу действительно делают очень тонкой — ее толщина составляет несколько микрон или в крайнем случае несколько десятков микрон. База должна быть тонкой для того, чтобы попавшие в нее из эмиттера заряды (в нашем примере дырки), не обращая внимания на призвавший их сюда «минус» батареи E_b , могли легко добраться к коллекторному переходу под действием сил диффузии.

И действительно, если база будет тонкой, то силам диффузии не составит никакого труда протолкнуть заряды сквозь нее в область коллекторного *pn*-перехода. А это, собственно говоря, нам только и нужно, потому что всякий заряд, достигший коллекторного перехода, в итоге будет участвовать в создании мощной копии сигнала, а заряды, которые пойдут по

своему законному пути, из базы уйдут на «минус» эмиттерной батареи. Эти заряды, по сути дела, для нас потеряны.

Если вести строгий учет всем зарядам, то эмиттерный ток $I_э$, после того как он войдет в базу, нужно будет разделить на две слагающие. Одну из них назовем коллекторным током $I_к$ — его образуют заряды, которые за счет диффузии доберутся до коллекторного перехода и в дальнейшем пойдут по коллекторной цепи. Другую составляющую — базовый ток $I_б$ — создают заряды, сумевшие протиснуться по тонкой базе и пойти своим законным путем к «минусу» батареи. Теперь события, происходящие в нашем транзисторе, можно описать так:

$$I_э = I_к + I_б$$

Точно так же связаны между собой и изменения всех трех токов. Если, например, подняв напряжение $E_{эб}$, увеличить в два раза эмиттерный ток $I_э$, то одновременно в два раза возрастут и оба порождаемые им тока $I_к$ и $I_б$. При этом сумма $I_к + I_б$ опять-таки останется равной $I_э$. Да иначе и быть не может: ведь эмиттерный ток распределяется только между этими двумя слагающими.

В дальнейшем нас будут интересовать не только токи, напряжения и сопротивления, но и изменения этих величин. Поэтому давайте сразу же договоримся о том, как сокращенно записывать само слово «изменение». Очень малые изменения той или иной величины принято обозначать греческой буквой Δ («дельта»), и, пользуясь этим, все, что мы только что сказали о взаимной связи между изменениями токов в транзисторе, можно записать так:

$$\Delta I_э = \Delta I_к + \Delta I_б$$

В переводе на русский наша запись может звучать так: «Изменение эмиттерного тока равно сумме соответствующих изменений коллекторного тока и тока базы».

Для подопытной схемы, которую мы сейчас разбираем (рис. 35), введен особый показатель использования поступивших из эмиттера зарядов. Он называется коэффициентом усиления по току, обозначается греческой буквой α и численно равен:

$$\alpha = \Delta I_к : \Delta I_э$$

Коэффициент α показывает, какая часть эмиттерного тока достается коллекторному току. Смысл этого коэффициента проще всего уяснить на числовом примере: если при изменении тока эмиттера на 10 миллиампер, ток коллектора увели-

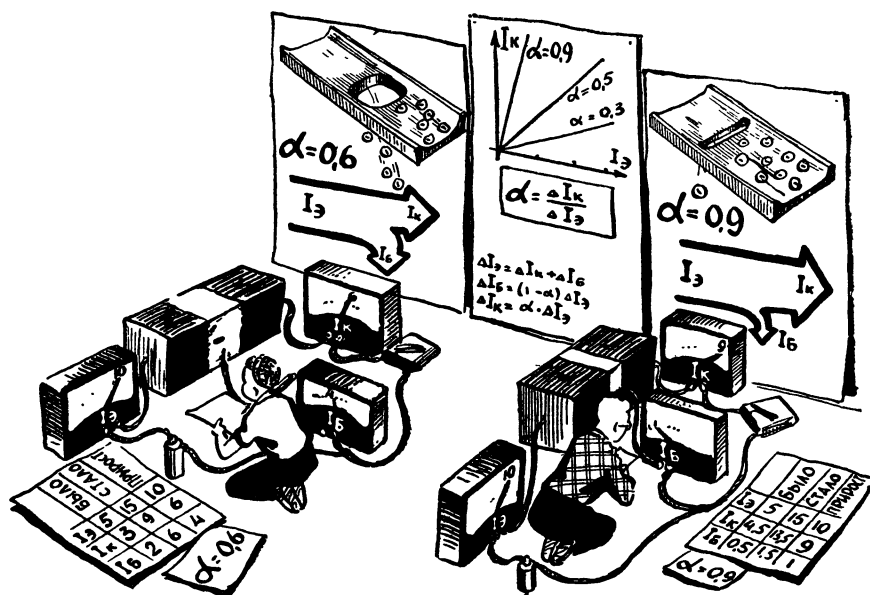


Рис. 35. Коэффициент усиления по току α показывает, какая часть вышедших из эмиттера зарядов участвует в создании коллекторного тока.

чится на 8 миллиампер, то $\alpha = 8 : 10 = 0.8$. А это значит, что заряды, поставляемые эмиттером в базу, на 80% используются для создания нужного нам коллекторного тока. Насколько же реальна такая цифра?

Уменьшая толщину базы и принимая ряд других мер в современных транзисторах, удастся довести коэффициент α в среднем до 0,95—0,99. Это значит, что коллекторный ток (строго говоря, речь идет об изменениях тока, то есть ΔI_E , ΔI_K , ΔI_B) составляет 95—99% эмиттерного тока I_E и лишь 1—5% приходится на базовый ток. Иными словами, из каждой сотни зарядов, попавших в базу из эмиттера, лишь 1—5 уходят на «минус» батареи B_E и через нее возвращаются в эмиттер, так ничего полезного и не сделав. Зато остальные 95—99 зарядов из ста добираются до коллекторного перехода, меняют его сопротивление, создают в коллекторной цепи постоянный ток, из которого в итоге и образуется мощная копия усиленного сигнала.

Выяснив все это, подключим к нашему транзистору, кроме источников питания, еще два элемента: источник усиливаемого сигнала и резистор R_H — нагрузку, на которой должен

выделяться усиленный сигнал. Естественно, что усиливаемый сигнал вводится в эмиттерную цепь, а усиленный извлекается из коллекторной (рис. 36).

После того как в цепи эмиттер—база появился входной сигнал $U_{\text{сиг}}$, так и хочется задать вопрос: а для чего же здесь теперь нужна батарея $B_{\text{см}}$ (она заменила батарею B_0)? И чем постоянное напряжение $U_{\text{см}}$ (оно действует так же, как и E_{06}) может помочь напряжению сигнала $U_{\text{сиг}}$?

Когда мы мысленно экспериментировали с транзистором, смотрели, куда в нем движутся заряды, то постоянное напряжение выполняло, если можно так сказать, учебные функции. Теперь же во входной цепи транзистора появился ее настоящий хозяин — усиливаемый сигнал. Нужно ли и после этого сохранять батарею $B_0(B_{\text{см}})$? Оказывается, нужно.

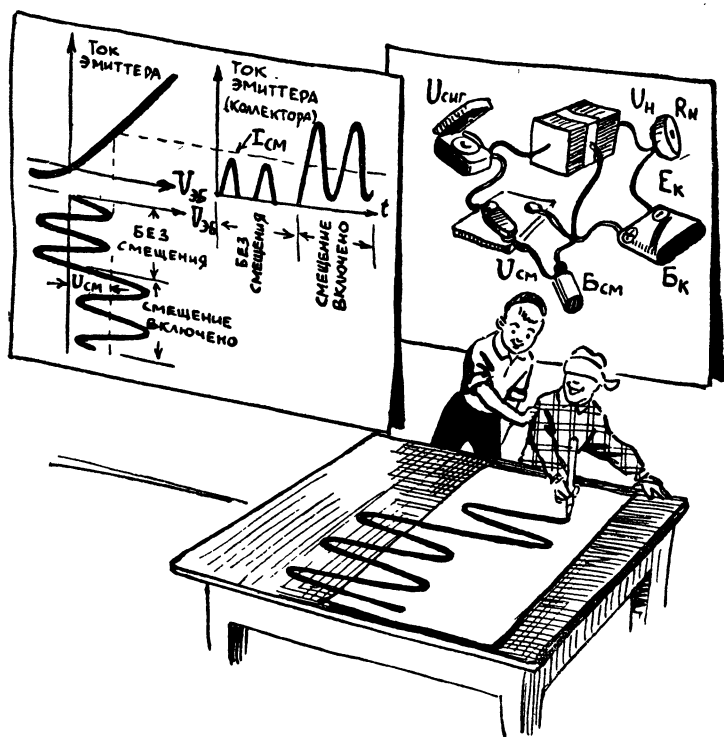


Рис. 36. Вместе с усиливаемым сигналом к транзистору подводится постоянное напряжение (смещение), и благодаря этому эмиттерный pn -переход всегда включен в прямом направлении.

Постоянное напряжение $U_{см}$ называется напряжением смещения, а созданный этим напряжением постоянный ток $I_{см}$ — током смещения. Мы договорились, что эмиттерный переход обязательно должен быть включен в прямом направлении (на этом, собственно говоря, и основан сам принцип работы транзистора), а значит, на базе всегда должен быть «минус» относительно эмиттера. (Не забудьте: «минус» на базе должен быть только в транзисторах $p-n-p$, где от эмиттера к базе движутся положительные заряды — дырки. В транзисторах $n-p-n$, где основные носители заряда в эмиттере — электроны, на базе всегда должен быть «плюс» относительно эмиттера.) Если бы во входную цепь транзистора мы ввели усиливаемый сигнал без смещения, то на базе появлялся бы то «плюс», то «минус»: ведь $U_{сиг}$ — это как-никак переменное напряжение.

То, что напряжение на базе меняется, — это хорошо. В этих изменениях как раз и записано все, что принес сигнал. Плохо лишь то, что, изменяясь, напряжение на базе время от времени залезает в запретную зону. Плохо и то, что моментами на базе появляется «плюс» и эмиттерный pn -переход запирается. Переход в этом случае просто работает как диод в выпрямителе, в его цепи появляется импульсный ток, и спектр этого тока, форма его графика (а значит, спектр и форма графика коллекторного тока, который является копией эмиттерного) уже не похожи на усиливаемый сигнал $U_{сиг}$. Проще говоря, если входное напряжение принесло с собой приятный голос диктора, то входной, а вместе с ним и выходной ток могут превратиться в рычание тигра.

Можно ли избежать этого? Можно ли, не трогая самого входного напряжения, сделать так, чтобы на базе никогда не появлялся «плюс» и чтобы график входного тока был таким же, как и график входного напряжения? Можно. И очень просто. Нужно вместе с переменным напряжением подать на базу еще и постоянный «минус». Постоянное напряжение не изменит самой формы сигнала, а лишь сместит его; отсюда и само слово «смещение» — в сторону «минуса» (рис. 36).

Все это можно проиллюстрировать простой аналогией. Во время вечера аттракционов в школе вам предложили с завязанными глазами нарисовать на листе бумаги простенькую фигуру. Вы сразу же начали рисовать неправильно — неточно нашли середину листа бумаги, съехали в сторону. Рисунок получается хороший, но только половина его попадает не на бумагу, а на стол. Что же нужно сделать, чтобы помочь вам? Нужно лишь сдвинуть, сместить руку на некоторое постоянное расстояние, подвести к ней «постоянное смещение». При

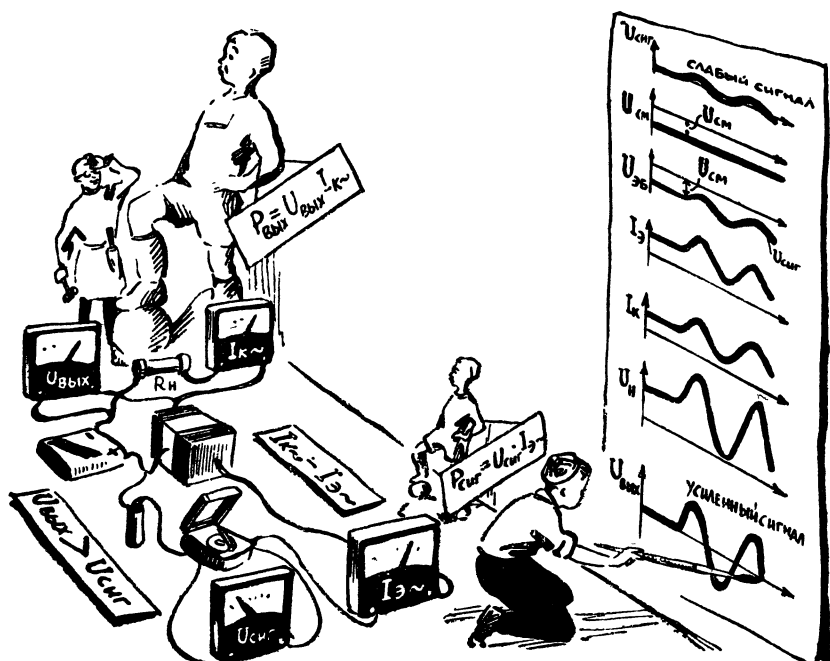


Рис. 37. В коллекторную цепь можно включить большое сопротивление нагрузки и получить на нем большое выходное напряжение.

этом карандаш будет делать все то, что он и делал, но уже не попадет на территорию стола.

Итак, напряжение $U_{\text{сиг}}$ усиливаемого сигнала суммируется с постоянным напряжением $U_{\text{см}}$. В некоторые моменты общее напряжение между эмиттером и базой $U_{\text{эб}}$ растет, в некоторые моменты — уменьшается, но оно всегда остается прямым напряжением. И, следуя за всеми изменениями, меняется и прямой ток $I_{\text{э}}$ во входной цепи транзистора. Точно так же меняется и коллекторный ток $I_{\text{к}}$, который теперь уже проходит по резистору нагрузки $R_{\text{н}}$ (рис. 37).

Давайте пока не обращать внимания на сравнительно небольшой ток базы $I_{\text{б}}$. Будем считать, что в нашей схеме коэффициент $\alpha = 1$, то есть эмиттерный ток $I_{\text{э}}$ на все сто процентов используется для создания коллекторного тока $I_{\text{к}}$. Иными словами, любое изменение тока в цепи эмиттер — база (входная цепь) вызывает точно такое же изменение тока в цепи база — коллектор (выходная цепь). Это значит, что если, напри-

мер, эмиттерный ток уменьшится на 5 ма , то на 5 ма уменьшится и коллекторный ток; увеличится $I_{\text{э}}$ на 20 ма , и на те же 20 ма возрастет и $I_{\text{к}}$. Одним словом, в эмиттерной и коллекторной цепи будут согласованно меняющиеся, всегда одинаковые по величине токи.

Эта радостная весть может вызвать весьма грустные мысли. Действительно, после долгих поисков, после странствий по океанам многих наук мы наконец построили прибор, который из слабого переменного тока делает... точно такой же слабый переменный ток! А где же усиленный сигнал? Где обещанная мощная копия?

Для беспокойства пока нет никаких оснований. То, что на выходе транзистора ток такой же, как и на его входе, еще ни о чем плохом не говорит: чтобы судить об усилении, нужно сравнивать мощности входного и выходного сигналов. А мощность — это не только ток, это еще и напряжение: $P = U \cdot I$.

Потребителем усиленного сигнала является резистор $R_{\text{н}}$, и именно на нем выделяется мощность усиленного сигнала или иначе выходная мощность транзисторного усилителя $P_{\text{вых}}$. Выходная мощность может использоваться по-разному, да и сама нагрузка усилительного каскада может быть различной (вместо $R_{\text{н}}$, например, может быть включен громкоговоритель, и тогда $P_{\text{вых}}$ расходуется на создание звука). Однако какой бы ни была реальная нагрузка и на что бы ни расходовалась выходная мощность, нагрузку эту почти всегда можно представить в виде резистора $R_{\text{н}}$, а выходную мощность — как произведение переменной составляющей коллекторного тока $I_{\text{к}\sim}$ на переменную составляющую $U_{\text{н}\sim}$ напряжения, действующего на сопротивление нагрузки:

$$P_{\text{вых}} = U_{\text{н}\sim} \cdot I_{\text{к}\sim}.$$

Обратите внимание на то, что выходная мощность определяется не током и напряжением «вообще», а именно переменными составляющими тока и напряжения. Дело в том, что в коллекторной цепи так же, как и в эмиттерной, протекает пульсирующий ток. Конечно, батареи $B_{\text{см}}$ и $B_{\text{к}}$ создают только постоянные токи $I_{\text{э}}$ и $I_{\text{к}}$, но с появлением сигнала токи начинают изменяться по величине, становятся пульсирующими.

Пульсирующий коллекторный ток можно довольно просто разделить на постоянную и переменную составляющие. Например, с помощью фильтров, которые применялись нами в выпрямителе и детекторе для разделения постоянных и переменных составляющих (рис. 27—6, 19). Совершенно ясно, что постоянные составляющие коллекторного тока $I_{\text{к} =}$ и напряжения на нагрузке $U_{\text{н} =}$ нам совсем не нужны: выходной

сигнал — это переменный ток и переменное напряжение, в нашем примере $I_{к\sim}$ и $U_{н\sim}$. И, не задумываясь пока о конкретных способах выделения этих переменных составляющих, мы только их и учитываем при подсчете выходной мощности, делая вид, что постоянных составляющих $I_{к=}$ и $U_{н=}$ просто не существует.

Поскольку мы договорились, что коллекторный ток равен эмиттерному, то, значит, равны и их переменные составляющие. Одна из них $I_{э\sim}$ определяет мощность входного сигнала, другая $I_{к\sim}$ — мощность выходного сигнала. Теперь вопрос об усилительных способностях транзистора можно решить только одним способом: сравнить переменное напряжение $U_{сиг}$ входного сигнала и выходное переменное напряжение $U_{вых}$ (так мы будем в дальнейшем называть переменную составляющую $U_{н\sim}$). Если окажется, что $U_{вых}$ больше, чем $U_{сиг}$, то, значит, выходная мощность больше входной и, следовательно, транзистор усиливает. Чем большее значение $U_{вых}$ нам удастся получить, тем большим будет и усиление сигнала.

К эмиттерному переходу приложено напряжение усиливаемого сигнала. Если мы захотим подсчитать это напряжение, то нужно будет воспользоваться уже знакомой формулой закона Ома — $U_{сиг} = I_{э\sim} \cdot R_{вх}$. Здесь $R_{вх}$ — это так называемое входное сопротивление транзистора, сопротивление, которое входной сигнал встречает со стороны эмиттерного перехода. Вскоре мы подробно выясним, от чего зависит и чему равно входное сопротивление. А пока ограничимся лишь общим выводом: входное сопротивление $R_{вх}$ очень мало. В общих чертах, по-видимому, ясно, что это должно быть именно так потому, что входное сопротивление — это, по сути дела, сопротивление эмиттерного *pn*-перехода, а этот переход благодаря смещению всегда включен в прямом, проводящем направлении. И, как всякий диод, он обладает небольшим прямым сопротивлением.

То, что для подсчета входного напряжения $U_{сиг}$ мы пользуемся входным сопротивлением транзистора $R_{вх}$, по-видимому, требует некоторых пояснений.

Разумеется, мы не можем менять сопротивление $R_{вх}$ так, как меняем по своему вкусу сопротивление нагрузки, да и напряжение $U_{сиг}$ получаем уже в готовом виде. Но ведь мы и не говорим: «напряжение $U_{сиг}$ зависит от сопротивления $R_{вх}$ ». Мы просто отмечаем, что напряжение на каком-либо участке цепи (в данном случае это относится к напряжению $U_{сиг}$) во всех случаях равно произведению тока на сопротивление.

Умножив ток на сопротивление, можно подсчитать и выходное напряжение транзисторного усилителя, то есть пере-

менное напряжение на нагрузке: $U_{н\sim} = U_{вых} = I_{к\sim} \cdot R_{н}$. Отсюда следует: чтобы увеличить переменное напряжение на нагрузке, есть два пути — увеличение $I_{к\sim}$ и увеличение $R_{н}$. На величину коллекторного тока мы как будто повлиять не можем: к коллектору не может двигаться больше зарядов, чем их приходит в базу из эмиттера. Значит, для увеличения $U_{вых}$ остается одно: нужно увеличить сопротивление нагрузки. Чем больше будет $R_{н}$, тем больше будет и действующее на нем напряжение. А именно оно в данном случае и определяет возможности всего нашего усилительного каскада (каскадом называют блок электронной аппаратуры, способный решать какую-либо самостоятельную задачу, в частности — усиливать сигнал).

До каких же пор можно увеличивать сопротивление нагрузки $R_{н}$ в погоне за большим выходным напряжением? Здесь есть два ограничения, но нам пока достаточно познакомиться хотя бы с одним.

Вся коллекторная цепь нашего транзисторного усилителя, по сути дела, представляет собой делитель напряжения. Делитель этот состоит из двух основных участков — нагрузки и коллекторного перехода, и напряжение коллекторной батареи $B_{к}$ делится между этими двумя участками. Поэтому, увеличивая $R_{н}$, можно дойти до того, что все напряжение достанется именно этому сопротивлению, а на коллекторе (точнее, на коллекторном переходе) вообще не останется никакого напряжения (рис. 38). А это в свою очередь означает, что, увеличивая $R_{н}$, нужно всегда учитывать и величину сопротивления коллекторного перехода. Если, например, окажется, что сопротивление коллекторного перехода имеет ту же величину, что и $R_{н}$, — его можно назвать выходным сопротивлением транзистора $R_{вых}$, — то каждому из этих участков достанется половина напряжения, а с этим еще вполне можно мириться.

Чуть позже мы подробно остановимся на том, что представляет собой выходное сопротивление транзистора. Мы узнаем, что оно может быть различным для постоянного и переменного тока, что величина его зависит и от режима входной цепи (это, собственно говоря, нам уже известно — входная цепь в основном тем и занимается, что меняет сопротивление коллекторного pn -перехода, впрыскивая в него, разумеется через базу, свободные заряды). Пока же мы ограничимся некоторым общим высказыванием: выходное сопротивление транзистора весьма велико, коллекторный переход, по сути дела, представляет собой диод, включенный в обратном направлении. Во всяком случае, в коллекторную цепь транзистора малой мощности можно смело включить нагрузку с сопротивлением в несколько килоом, не опасаясь серьезных неприятностей,



Рис. 38. При слишком большом сопротивлении нагрузки постоянное напряжение на коллекторе может упасть до нуля.

в том числе слишком сильного уменьшения напряжения на самом коллекторе. Для определенности примем, что в коллекторную цепь нашего транзистора включена нагрузка $R_n = 10 \text{ ком}$. Это вполне реальная цифра.

Мы ограничили сопротивление резистора R_n из боязни потерять на нем слишком большую часть постоянного коллекторного напряжения и оставить слишком малое постоянное напряжение на самом коллекторе. Но можно ведь вместо резистора R_n включить в коллекторную цепь такой элемент, который будет представлять очень большое сопротивление для переменного тока и очень малое — для постоянного. Примером такого элемента может служить уже знакомый нам дроссель или трансформатор. Из-за разного сопротивления для переменной и постоянной составляющих коллекторного тока (возможные величины этих сопротивлений 50 ком и 5 ом) на этом элементе будет создаваться большое переменное напряжение и почти не будет теряться постоянное (рис. 38).

Это, конечно, позволит безболезненно увеличить сопротивление нагрузки, но опять-таки не до бесконечности. Избавившись от опасности слишком уменьшить постоянное напряже-

ние на коллекторе, мы столкнемся с другими ограничениями (о них будет рассказано на стр. 179) и все равно не сможем увеличить сопротивление нагрузки больше чем до нескольких десятков килоом.

Итак, в коллекторную цепь включена нагрузка с сопротивлением 10 ком. Теперь еще одна цифра: сопротивление эмиттерного *pn*-перехода $R_{вх}$ примем равным 10 ом. Это тоже вполне реальная величина: эмиттерный переход транзистора представляет собой диод, включенный в прямом направлении, а сопротивление такого диода как раз и составляет единицы или десятки ом.

Теперь мы наконец можем сравнить мощность входного и выходного сигналов и вынести окончательный приговор транзистору, можем определить, «усиливает» или «не усиливает».

Мощность входного сигнала выделяется на сопротивлении $R_{вх}$, мощность выходного сигнала — на сопротивлении $R_{н}$. На этих же сопротивлениях действуют соответственно входное и выходное напряжение $U_{сиг}$ и $U_{вых}$. Токи $I_{э\sim}$ и $I_{к\sim}$, протекающие по сопротивлениям $R_{вх}$ и $R_{н}$, примерно равны, а значит, соотношение между напряжениями $U_{сиг}$ и $U_{вых}$ определяется только соотношением сопротивлений $R_{вх}$ и $R_{н}$. В нашем примере сопротивление нагрузки $R_{н}$ в тысячу раз больше, чем сопротивление $R_{вх}$, и поэтому напряжение $U_{вых}$ также в тысячу раз больше, чем $U_{сиг}$. Иными словами, наш каскад дает усиление по напряжению в тысячу раз. А поскольку мощность сигнала — это произведение напряжения на ток ($P=U \cdot I$) и поскольку токи $I_{э\sim}$ и $I_{к\sim}$, как мы уже говорили, равны, то усиление по мощности также равно тысяче. Это реальные цифры: примерно такое усиление можно получить в нашей схеме от среднего по своим параметрам транзистора.

Вот и конец долгого путешествия. Мы не ошиблись, воскликнув в свое время: «Земля!» Построенный нами из двух диодов трехслойный полупроводниковый прибор — транзистор — действительно может создавать мощную копию слабого электрического сигнала, используя для этой цели энергию источника постоянного тока.

Достигнув заветной цели, ни один путешественник не откажет себе в удовольствии вспомнить самые интересные, самые важные этапы пройденного пути. Давайте же и мы подведем итог своего трудного и долгого путешествия от диода до триода. А заодно уже коротко, буквально в двух словах, подытожим все, что успели узнать о транзисторе.

Слабый электрический сигнал, который нужно усилить, мы вводим в эмиттерную цепь транзистора. Она представляет со-

бой *pn*-переход, который с помощью вспомогательного постоянного напряжения (смещения) всегда включен в прямом направлении. Сопротивление такого перехода невелико, и поэтому входной сигнал довольно легко изменяет эмиттерный ток. Заряды, образующие этот ток, в результате диффузии просачиваются сквозь базу и попадают во второй, в коллекторный *pn*-переход. Этот переход включен в обратном направлении, и сопротивление его очень велико. Попадая из базы в коллекторный переход, свободные заряды уменьшают его сопротивление. Под действием усиливаемого сигнала число этих зарядов меняется, а значит, сопротивление коллекторного перехода тоже меняется, следуя по пятам за всеми изменениями сигнала.

Теперь батарея, в цепь которой включен коллекторный переход, уже отдает энергию не в виде постоянного, а в виде меняющегося тока — копии слабого сигнала. Если на пути этого меняющегося тока (то есть в коллекторную цепь транзистора) включить нагрузку R_n и если сделать ее сопротивление достаточно большим, то на этой нагрузке можно получить большое по величине меняющееся напряжение. Во всяком случае, во много раз большее, чем напряжение сигнала, подведенного к эмиттеру. Так создается усиление по напряжению, а значит, и усиление по мощности. Эффект усиления получается за счет того, что входной ток, действующий в цепи с малым сопротивлением, создает такой же по величине изменяющийся ток в цепи с большим сопротивлением. Именно исходя из этого и назвали транзистор преобразователем (переносчиком) сопротивлений.

Глубокий смысл этого названия станет особенно хорошо понятным, если попытаться включить нагрузку не в коллекторную, а в эмиттерную цепь, а коллектор вместе с батареей для упрощения просто выбросить из схемы. В таком поступке есть даже какая-то логика: если коллекторный ток, проходя по сопротивлению нагрузки, создает на нем большое выходное напряжение, то, очевидно, и эмиттерный ток, который, как мы уже много раз подчеркивали, по величине равен коллекторному, создаст на нагрузке такое же большое напряжение, и мы извлечем необходимую мощность прямо из источника слабого сигнала, без всякого транзистора.

Но, конечно же, эти рассуждения ошибочны. Прежде всего они не учитывают неумолимый закон Ома. Включив в эмиттерную цепь свою нагрузку $R_n = 10 \text{ ком}$, мы примерно в тысячу раз уменьшим ток в этой цепи, так как сопротивление нагрузки в тысячу раз больше прямого сопротивления эмиттерного *pn*-перехода. Безболезненно (или почти безболезненно) боль-

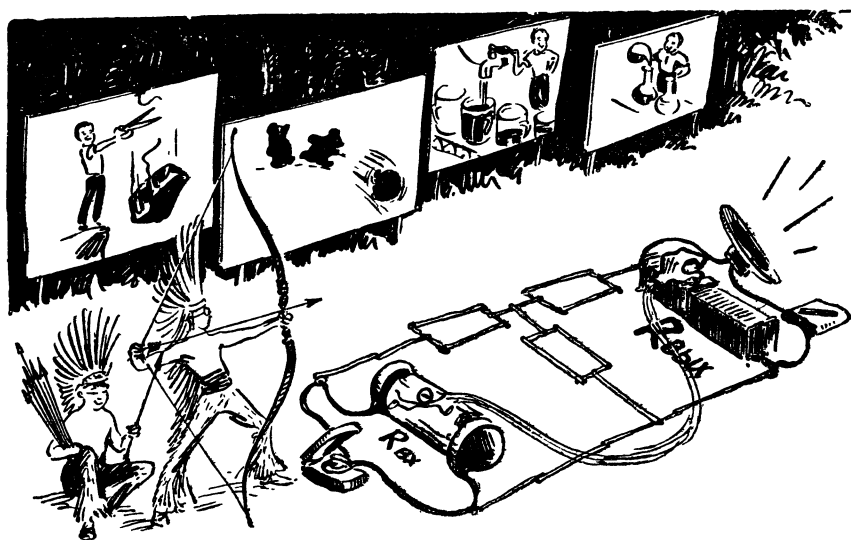


Рис. 39. Транзистор, по сути дела, представляет собой реостат, сопротивление которого (сопротивление коллекторной цепи) меняется под действием усиливаемого сигнала.

шое сопротивление нагрузки можно включать лишь в коллекторную цепь: ее собственное сопротивление достаточно велико и на этом фоне включение нагрузки не очень-то заметно.

Как видите, наша попытка усилить сигнал без управляющего прибора, в данном случае без транзистора, кончилась крахом. Да иначе и быть не могло. Никакой сигнал не может отдать больше мощности, чем у него есть, и единственная возможность усилить слабый сигнал — это слепить его мощную копию из энергии, которую дает другой источник.

На рис. 39 коллекторный *pn*-переход показан в виде переменного сопротивления $R_{\text{вых}}$. При этом, конечно, не отражены все теперь уже хорошо известные нам процессы — впрыскивание зарядов из эмиттера в базу, диффузия, ускорение зарядов в коллекторном переходе, — в результате которых слабый сигнал управляет мощным потоком энергии. Забыв обо всех подробностях, можно представить себе, как этот слабый сигнал, действующий в цепи входного сопротивления $R_{\text{вх}}$, каким-то образом двигает ручку переменного сопротивления $R_{\text{вых}}$, меняет ток коллекторной цепи, а вместе с ним и напряжение на нагрузке.

Можно найти немало аналогий, помогающих понять, как работает транзистор. Можно, например, представить себе, как

охотник-индеец стреляет из лука, а товарищ помогает ему, подает стрелы. Этот помощник делает примерно то же, что источник сигнала, подключенный к эмиттерному переходу: он подает заряды-стрелы для стрельбы в цель-нагрузку. Как бы ни старался помощник, он не сможет запустить стрелу с такой силой, как это делает сильно натянутая тетива лука. Лук здесь играет примерно ту же роль, что и коллекторная батарея в усилителе.

А вот еще одна, уже знакомая нам аналогия (стр. 22): затрачивая сравнительно небольшие усилия, вы подталкиваете к краю высокой горы каменные глыбы, а затем сталкиваете их вниз. Разогнавшись при падении с большой высоты, камни совершают значительную механическую работу, подобно тому как заряды, ускоренные коллекторной батареей, работают на сопротивлении нагрузки.

Для того чтобы эта аналогия была больше похожа на усилительный каскад с транзистором, нужно добавить подъемник, который бы возвращал сброшенные камни на вершину горы: ведь коллекторная батарея возвращает поработавшие на нагрузке заряды обратно в эмиттерную цепь усилителя, точнее — к «плюсу» батареи смещения. Кроме того, камни нужно подталкивать к обрыву в соответствии с каким-либо условным кодом. Например, в соответствии с азбукой Морзе (три камня, сброшенных подряд, — «тире», одиночный камень — «точка»). При этом поток камней, летящих с вершины вниз, как и полагается мощной копии, будет повторять все наши условные сигналы. Подумав, вы наверняка найдете немало других подобных аналогий.

Работу усилительного каскада может иллюстрировать система резервуаров, насосов и соединительных труб (рис. 40). Возле каждого элемента этого гидравлического усилителя написано, чью роль он исполняет, какому элементу транзисторного усилителя соответствует. Наибольшую работу в этой системе выполняет насос, исполняющий роль коллекторной батареи B_k . Он-то и создает большой перепад уровней между резервуарами «база» и «коллектор», и вода, падая с большой высоты, вращает мощную турбину-«нагрузку». Во входной цепи гидравлической системы имеется еще два насоса — «смещение» и «сигнал». Главная задача этих насосов — регулировать поток жидкости из «эмиттера» в «базу». Для регулирования используется поршень с заслонкой, которая делает примерно то же самое, что и напряжение, приложенное к эмиттерному pn -переходу. Насос «смещение» создает постоянное давление, а насос «сигнал» — переменное. Поэтому в гидравлической системе интенсивность потока воды меняется так же,

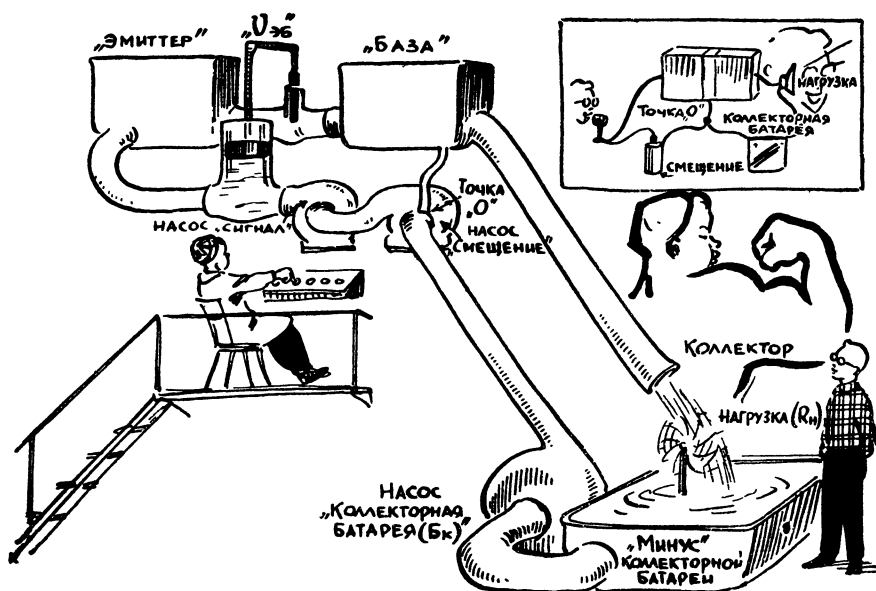


Рис. 40. Транзисторный усилитель напоминает гидравлическую систему, где, легко перемещая заслонку, можно управлять мощным потоком воды.

как под действием усиливаемого электрического сигнала меняется ток во всех цепях транзистора. Изменение интенсивности потока воды приводит к тому, что меняется и скорость вращения мощной турбины-нагрузки. Турбина при этом работает неравномерно, мощность ее меняется, и таким образом создается своеобразный механический сигнал, некоторое подобие выходного сигнала в транзисторном усилителе. Механический сигнал, созданный турбиной, намного мощнее механического сигнала, полученного от насоса «сигнал». И именно в этом заключается эффект усиления.

Мы с вами затратили немало времени на то, чтобы выяснить, как устроены и как работают полупроводниковые приборы. Сейчас, пожалуй, уже можно считать, что цель достигнута, что суть дела более или менее ясна. Однако, несмотря на это, мы по собственной инициативе пойдем на еще одну трудную операцию. После нее эта самая «суть дела» наверняка станет для вас не просто более или менее ясной, а такой же бесспорной, такой же привычной, как, скажем, восход солнца или падение камня. Нашей новой операции можно смело присвоить шифр «Видел сам».

Человек так устроен, что он всегда немножко не верит даже самым убедительным словам, самым логичным рассуждениям. (Может быть, это защитная реакция, связанная с тем, что мы нередко ошибаемся, принимая безошибочные, казалось бы, решения, делая бесспорные на первый взгляд выводы?) Лучший способ борьбы с этим своим внутренним неверием, лучший способ определения истинной ценности слов, идей, рассуждений — это эксперимент, испытание на опыте, проверка делом. Вот почему следующие два раздела книги полностью посвящены делам: это своего рода руководство к практическим занятиям. Мы проделаем несколько простейших опытов и попытаемся практически доказать, что диод действительно выпрямляет, а транзистор усиливает.

Начнем с диода.

О Т С Л О В К Д Е Л У

Есть несколько простейших опытов, доказывающих, что полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью и что все наши рассказы о «великолепных четверках» германия и кремния, об электронах и дырках, донорах и акцепторах, основных и неосновных носителях, о «маневрах» электрических зарядов на границе между n и p зонами диода и о многих других чудесах, — что все это истинная правда.

Вот один из таких простейших опытов. Возьмите обычный абонентский громкоговоритель (громкоговоритель радиоточки) и, подключив его к батарейке карманного фонаря, попробуйте периодически разрывать цепь, проще говоря — попробуйте подергать один из соединительных проводов (рис. 41). Вы услышите в громкоговорителе щелчки. Батарейка дает постоянный ток, под действием которого громкоговоритель не создает звука, но в момент подключения батарейки к громкоговорителю или ее отключения ток в цепи меняется (от нуля или до нуля). Толчки тока заставляют диффузор колебаться и создавать звук.

Введем в нашу цепь любой полупроводниковый диод. Будут ли теперь слышны щелчки при размыкании и замыкании цепи? Это зависит от того, как включен диод. Если он включен в прямом направлении и пропускает ток, то пощелкивание будет продолжаться. А если диод включен в обратном направлении, то никаких щелчков вы не услышите: диод легко пропускает ток только в одну сторону. При обратном включении диода в цепи появляются очень слабые толчки обратного тока, которые не могут с достаточной силой двинуть диффузор.

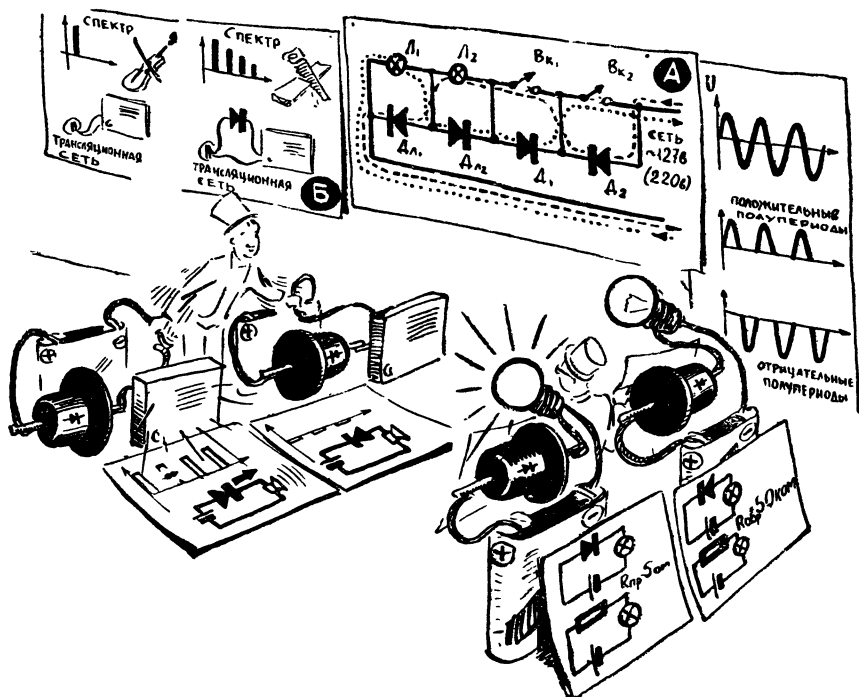


Рис. 41. Используя в качестве индикатора громкоговоритель или лампочку, можно на опыте убедиться в односторонней проводимости полупроводникового диода.

Кстати, вместо того чтобы переключать диод, можно изменить полярность батарей.

Еще один опыт — включение диода в цепь лампочки карманного фонаря (рис. 41). Для этого опыта лучше взять плоскостной диод. Во-первых, не всякий точечный диод может выдержать ток, который нужно пропустить через лампочку (50 — 150 *ма*). Во-вторых, прямое сопротивление у плоскостного диода меньше, чем у точечного, ток в цепи оказывается несколько больше, и лампочка горит ярче. А вот обратное сопротивление диода во всех случаях настолько велико, что ток в цепи становится очень малым, и лампочка не горит.

Хотя этих двух опытов вполне достаточно для того, чтобы навсегда запомнить, что диод хорошо пропускает ток только в одну сторону, мы все же сделаем еще один эксперимент. Его, правда, лучше бы назвать фокусом: наш следующий опыт

настолько интересен, настолько занимателен, что его можно показывать публике, например, на каком-нибудь школьном вечере самодеятельности.

Соберите схему, приведенную на листке А (рис. 41). Здесь L_1 и L_2 обыкновенные электрические лампочки небольшой мощности, лучше всего по 25 вт или в крайнем случае по 40 вт. Лампочки рассчитаны на то напряжение, которое действует у вас в сети, — на 127 или на 220 в. Выключатели BK_1 и BK_2 — любого типа. В качестве диодов $D_{л1}$, $D_{л2}$, D_1 и D_2 можно использовать все типы плоскостных диодов, у которых $I_{пр}$ больше 150 ма, а $U_{обр=доп}$ больше 200 в, если напряжение сети 127 в, и больше 300 в, если напряжение сети 220 в (диоды приводятся рассчитывать на амплитуду напряжения сети, см. стр. 73). Пользуясь таблицами 1 и 3, находим, что для любого напряжения сети подходят диоды Д7Д, Д7Е, Д7Ж, Д226 и др.

Внимательно проверив правильность соединения диодов (ошибаться здесь нельзя: некоторые ошибки могут привести к одновременной гибели всех четырех диодов!), включите собранную схему в сеть. Теперь можете поочередно замыкать и размыкать выключатели и удивляться. Если замкнут BK_1 , то горит только лампочка L_2 , если замкнут BK_2 — только лампочка L_1 . Когда замкнуты оба выключателя, то одновременно горят обе лампочки, а если оба выключателя разомкнуты, лампочки не горят. Попробуйте «перевернуть» диоды D_1 и D_2 , то есть включить их в обратную сторону, и выключатели поменяются ролями: BK_2 будет управлять лампочкой L_2 , а BK_1 — лампочкой L_1 .

Как же объяснить столь странное поведение нашей подопытной цепи? Прежде всего нужно вспомнить, что прямое сопротивление диода очень мало, а обратное — очень велико. Мы подводим к цепи переменное напряжение, и в некоторые моменты параллельно выключателям и лампочкам диоды включены в прямом направлении, а в другие моменты — в обратном. Иными словами, в некоторые моменты параллельно выключателям и лампочкам включены очень небольшие (прямые) сопротивления, а в другие моменты — очень большие (обратные) сопротивления.

Нарисуем график подводимого напряжения и четные полупериоды условно назовем положительными, а нечетные — отрицательными. Будем считать, что положительные полупериоды — это те, во время которых пропускают ток диоды $D_{л1}$ и D_2 , а отрицательные полупериоды — это те, во время которых пропускают ток диоды $D_{л2}$ и D_1 . На рисунке положительное направление тока (ток во время положительных полупериодов)

показано пунктиром, а отрицательное направление тока — точками.

Предположим, что замкнуты оба выключателя и все напряжение сети подводится только к лампочкам. Во время положительного полупериода диод $D_{л1}$ своим малым прямым сопротивлением сильно шунтирует (см. Воспоминание № 8, стр. 145), проще говоря, замыкает накоротко лампочку L_1 , весь ток идет через этот диод (по пути наименьшего сопротивления), и лампочка L_1 , естественно, не горит. Зато во время отрицательного полупериода, когда диод $D_{л1}$ оказывается включенным в обратном направлении и поэтому обладает очень большим сопротивлением, весь ток идет через лампочку L_1 , и она светится.

С лампочкой L_2 все происходит наоборот. Шунтирующий ее диод $D_{л2}$ включен в противоположную сторону (если сравнивать с диодом $D_{л1}$), и поэтому лампочка L_2 горит только во время положительных полупериодов.

Когда замкнуты оба выключателя, горят обе лампочки поочередно, если можно так сказать — через такт. Мы, конечно, этой очередности не замечаем: лампочки слишком быстро сменяют друг друга, одна зажигается позже другой всего лишь на сотую долю секунды.

Правда, присмотревшись, можно отметить некоторое мигание лампочек, которого не бывает при включении их в сеть переменного тока без диодов. Мигание появляется потому, что через лампочку, параллельно которой подключен диод, проходит ток только одного направления (используется лишь один полупериод). Через лампочку проходит 50 толчков (импульсов) тока в секунду. Если же лампочка включена в сеть без диода, то ток через нее идет и «туда», и «обратно» (используются оба полупериода), то есть толчки тока следуют в два раза чаще и притом без перерывов. Нить не успевает остывать, и никакого мелькания практически нет.

Итак, при замкнутых выключателях горят обе лампочки: одна — во время положительных полупериодов, другая — во время отрицательных. Как только вы разомкнете один из выключателей, одна из лампочек потухнет. Так, в частности, если разомкнуть $B_{к2}$, то потухнет L_1 , а если разомкнуть $B_{к1}$, то потухнет L_2 . И, наконец, если разомкнуть оба выключателя, то потухнут обе лампочки. Это очень эффектное зрелище, когда, манипулируя последовательно соединенными и, казалось бы, совершенно одинаковыми выключателями, вы поочередно зажигаете так же последовательно соединенные и уж наверняка одинаковые лампочки.

Механизм «чуда» довольно прост. Размыкая выключатель, вы вводите в цепь полупроводниковый диод, который преграждает путь току во время одного из полупериодов. Так, например, диод D_1 преграждает путь положительному току (ток положительного полупериода), который заставлял светиться лампочку L_2 , и она гаснет. Точно так же диод D_2 преграждает путь отрицательному току (ток отрицательного полупериода), который зажигал лампочку L_1 . Когда включены в цепь оба диода, то закрыт путь току и положительного, и отрицательного направления, поэтому ни одна из лампочек не горит.

Можно проделать много очень интересных опытов, показывающих, как диод изменяет форму сигнала, преобразует его спектр. Но мы пока ограничимся одним опытом, простейшим среди простых. Включите громкоговоритель в трансляционную сеть через диод (рис. 41, листок Б), и вы сразу услышите сильнейшее искажение звука. Это как раз и есть результат появления в спектре новых составляющих, результат изменений формы сигнала из-за односторонней проводимости диода.

Все, что мы до сих пор делали, это, если можно так сказать, учебные опыты. А сейчас попробуем собрать несколько схем, которые могут найти практическое применение. Это три схемы выпрямителей для питания транзисторной аппаратуры небольшой мощности, выпрямитель для зарядки автомобильных аккумуляторов и двухдиапазонный детекторный приемник. Принципиальные и монтажные схемы всех этих простейших устройств приведены на цветной вклейке (рис. 42, 43)¹. Никаких пояснений схемы эти, по-видимому, не требуют: в общем виде, без конкретного указания деталей, мы с ними встречались и раньше (рис. 27).

В выпрямителях для питания маломощной транзисторной аппаратуры (рис. 42—1, 2, 3) проще всего применить небольшой силовой трансформатор, который понижает напряжение сети до 6—12 в. Выпрямив это пониженное напряжение и погасив часть его, если в этом будет необходимость, на сопротивлении фильтра $R_1(R_2)$, мы как раз и получим нужное постоянное напряжение 8—10 в. Во всех наших выпрямителях в качестве понижающего используется накальный трансформатор телевизора «Рекорд», который дает необходимое переменное напряжение 6,3 в.

Можно использовать и любой другой накальный трансформатор от телевизора, да и вообще любой трансформатор, имеющий шестивольтовую обмотку. Желательно лишь, чтобы этот трансформатор был поменьше размером, так как тран-

¹ Цветные вклейки (рис. 42, 43, 44, 45) см. между стр. 128—129.

зисторные приемники, которые будет питать наш выпрямитель, потребляют очень небольшую мощность — всего каких-нибудь 0,5—1 *вт*. Даже сравнительно мощные потребители, такие, например, как переносная радиолка «Отдых», и то берут от выпрямителя не больше чем 3—5 *вт*. А сетевые трансформаторы, как правило, рассчитаны на мощность 30—60 *вт* и более. Поэтому, выбрав готовый трансформатор, мы неизбежно создаем огромный запас по допустимой для трансформатора мощности и платим за этот запас весом, габаритами трансформатора и, конечно, рублями. Страшного в этом, конечно, ничего нет. Жаль только, что трансформатор оказывается значительно больше и тяжелее, чем он мог бы быть, если бы был рассчитан специально на наш выпрямитель.

Сердечник выбранного трансформатора собран из пластин УШ-19, толщина набора 28 *мм*. Первичная обмотка содержит 820 витков провода ПЭЛ 0,23 (секция для сети с напряжением 127 *в*) и 640 витков провода ПЭЛ 0,2 (секция, которая добавляется к первой секции при включении трансформатора в сеть 220 *в*). Вторичная обмотка содержит 49 витков провода ПЭЛ 1,2 и дает напряжение, необходимое для питания сетевых ламп, то есть 6,3 *в*. Не забудьте, что это эффективное значение напряжения, а амплитуда его в 1,4 раза больше. Иными словами, амплитуда переменного напряжения достигает 8,8 *в*, и именно таким будет выпрямленное напряжение при достаточно большой емкости конденсатора C_1 и сравнительно небольшом потребляемом токе (рис. 28, стр. 74). Практически даже в однополупериодном выпрямителе (рис. 42—1) на выходе получается 7—8 *в* выпрямленного напряжения, а этого, как показал опыт, достаточно для питания таких приемников, как «Альпинист», «Атмосфера», «Нейва», «Спорт-2» и многие другие.

Можно несколько повысить выпрямленное напряжение и, конечно, уменьшить пульсации, если собрать выпрямитель по мостовой схеме, используя тот же трансформатор (рис. 42—2), или по двуполупериодной схеме на трансформаторе, где имеется еще одна накальная обмотка (как, например, в другом накальном трансформаторе того же телевизора «Рекорд»). Наконец, если нужно получить более высокое напряжение, то можно, используя тот же трансформатор с одной шестивольтовой обмоткой, собрать выпрямитель по схеме с удвоением напряжения (рис. 42—3).

Собранные нами выпрямители можно использовать для питания микроэлектродвигателей, в частности, для питания электрифицированных игрушек. К наиболее распространенному двигателю (официальное его название ДП-10) нужно

подвести напряжение 3—5 в. Потребляемый двигателем ток может составлять 200—500 *ма*, в зависимости от нагрузки, то есть от той работы, которую этот двигатель выполняет. Чтобы погасить излишек напряжения, резистор R_1 (рис. 42—1, 2) должен иметь сопротивление 10—20 *ом*, рассчитанное на мощность 1—2 *вт*. Вместо этого резистора можно включить лампочку на 3,5 или на 6,3 в. Если сопротивление одной лампочки мало, можно включить две лампочки последовательно, а если велико — параллельно. Поскольку двигателю не страшны пульсации напряжения, то питание его осуществляется прямо с первого конденсатора фильтра C_1 . Можно обойтись вообще без конденсатора C_1 , но при этом выпрямленное напряжение несколько уменьшится (рис. 28). Кстати, воспользовавшись этой неприятностью, можно создать предельно простой выпрямитель питания для микроэлектродвигателя. В таком выпрямителе есть только один диод, через который с шестивольтовой обмотки напряжение подается прямо на двигатель без всякого фильтра и гасящего резистора. Постоянная составляющая напряжения при этом получается около 5 в, что вполне терпимо.

Выпрямитель, схема которого показана на рис. 42—4, предназначен для зарядки автомобильных и мотоциклетных аккумуляторов. Согласно существующим правилам, зарядка кислотных аккумуляторов (а именно такие аккумуляторы установлены на автомобилях и на большинстве мотоциклов) производится током, составляющим 10% емкости аккумулятора. Так, например, аккумулятор 6-СТ-54 (автомобиль «Волга», «Победа»; последняя цифра указывает емкость в ампер-часах) и аккумулятор 6-СТ-42 (автомобиль «Москвич-408») нужно заряжать током около 5 *а* при напряжении около 12,6 в, а аккумулятор 3-МТ-6 (мотоцикл «ИЖ-50», мотороллер «Вятка» и др.) заряжают током до 1 *а* при напряжении около 6,3 в.

Собственное внутреннее сопротивление аккумулятора, а значит, и ток в его цепи зависит от многих факторов: от емкости, степени заряда, плотности электролита, температуры и др. Это внутреннее сопротивление может изменяться в довольно широких пределах, и, чтобы устранить его влияние на величину зарядного тока, в схему вводят резистор R_1 с сопротивлением 0,5—2 *ом* при допустимой мощности 5—10 *вт*. Его можно изготовить самому из небольшого кусочка спирали от плитки или намотав на жаропрочный каркас 2—3 метра провода ПЭ 0,3 (намотка однослойная). Такой самодельный резистор будет сильно нагреваться, но на это можно не обращать внимания. Подробней об этом резисторе сказано на стр. 347.

Для того чтобы можно было установить нужный зарядный ток при любом состоянии аккумулятора и при изменении напряжения сети, во всех зарядных устройствах предусматривают регулировку напряжения, подводимого к аккумулятору. Часто для этой цели пользуются реостатом, который включается последовательно с выпрямителем (то есть вместо R_1) и гасит ту или иную часть напряжения.

В нашем выпрямителе применен другой распространенный способ регулировки: меняется переменное напряжение, подводимое к выпрямителю, а значит, и выпрямленное напряжение, поступающее на аккумулятор. Амплитуда подводимого напряжения всегда должна быть несколько больше, чем э. д. с. аккумулятора, — выпрямитель, подключенный к аккумулятору, всегда работает с отсечкой, и, чем больше амплитуда переменного напряжения, тем больше импульсы выпрямленного тока, тем больше и средний (зарядный) ток. У вторичной обмотки нашего понижающего трансформатора сделано несколько отводов, и, подключая выпрямитель к тому или иному отводу, мы, по сути дела, меняем переменное напряжение, которое на этот выпрямитель подается. Учтите, что в цепи выпрямителя идет довольно большой ток, и при переключении отводов нужно обеспечить надежный контакт. Проще всего это сделать так: каждый отвод соединяется со своим зажимом, а уже под него зажимается провод, идущий к диодам.

Переключение отводов производится с таким расчетом, чтобы установить в цепи аккумулятора необходимый зарядный ток. При этом проще всего ориентироваться на показания амперметра, если, конечно, есть амперметр. Если же амперметра нет, то его место занимает обычный проводник.

Можно приближенно оценить зарядный ток и без амперметра — по свечению лампочки, включенной в первичную цепь трансформатора. Чем больше ток в цепи аккумулятора, тем больший ток потребляется и из сети, тем ярче горит лампочка. Нетрудно подсчитать, что при зарядном токе 6 а и напряжении 12 в трансформатор будет потреблять от сети около 60 вт, а значит, в первичной обмотке пойдет ток около 0,5 а при напряжении сети 127 в и около 0,25 а при напряжении сети 220 в. Это значит, что индикатором тока зарядки может быть стандартная лампочка на 6,3 в и 0,28 а (для сети 220 в) или две такие лампочки, соединенные параллельно (для сети 127 в).

На рис. 42 приводятся два варианта выпрямителя для зарядки аккумуляторов. Один из них собран по мостовой схеме (рис. 42—5), другой — по простейшей однополупериодной (рис. 42—4). Когда идет речь о зарядке аккумуляторов, то

мостовая схема сама по себе не имеет особых преимуществ по сравнению с более простой однополупериодной схемой. Мостовую схему иногда применяют в тех случаях, когда допустимый выпрямленный ток $I_{\text{вып}}$ для одного диода слишком мал. Так, например, в нашей мостовой схеме используются диоды Д 304, каждый из которых может выпрямить ток не более 5 а. А в мостовой схеме, где каждый полупериод (половина общего тока) дает одна пара диодов (D_1 и D_2 или D_3 и D_4), можно допустить общий выпрямленный ток до 10 а. И хотя выпрямитель рассчитан на зарядный ток 5 а, иметь запас по допустимой величине тока необходимо. В однополупериодном выпрямителе работает один диод Д 305, для которого $I_{\text{вып}} = 10$ а. Собрать на таких диодах мостовую схему, мы могли бы получить выпрямленный ток до 20 а.

Несколько слов о трансформаторе. Его можно изготовить, взяв за основу от какого-нибудь лампового приемника силовой трансформатор, рассчитанный на мощность 50—60 вт. У такого трансформатора удаляются все обмотки, кроме сетевых, и на месте удаленных обмоток легко размещается новая понижающая обмотка с отводами. Число витков этой понижающей обмотки довольно просто рассчитать следующим образом. Прежде всего нужно посчитать (или узнать по справочнику) число витков удаленной накальной обмотки и разделить его на 6,3 (на напряжение, которое дает накальная обмотка). В результате вы получите одну из основных характеристик трансформатора — число витков на вольт. Затем определяется необходимое число витков новой вторичной обмотки с таким расчетом, чтобы секция 1—2 давала напряжение 10 в, а секции 2—3, 3—4, 4—5 и 5—6 по 1—1,5 в.

Для примера рассмотрим, как рассчитывается вторичная обмотка, если за основу взят силовой трансформатор от радиолы «Рекорд-61». Накальная обмотка в этом трансформаторе содержит 40 витков, то есть на каждый вольт приходится примерно 6,4 витка ($40 : 6,3 \approx 6,4$). Отсюда следует, что секция 1—2 новой обмотки, рассчитанная на 10 в, должна содержать 64 витка ($10 \cdot 6,4 = 64$), а все остальные секции, каждая из которых должна давать напряжение примерно 1—1,5 в, могут содержать по 7—10 витков.

При выборе диаметра провода для новой обмотки исходят из того, что на каждый квадратный миллиметр провода можно допустить ток 3 а. (Можно допустить и 5 а на квадратный миллиметр, но при этом трансформатор будет перегреваться.) Таким образом, если мы хотим, чтобы провод легко, то есть не слишком сильно нагреваясь, пропускал ток 5—6 а, то нужно, чтобы сечение провода было не меньше чем 2 мм². Такое

сечение имеет провод диаметром 1,6 мм, и, значит, именно из этого провода (а хотите — более толстого) нужно сделать новую обмотку. Если под руками нет такого толстого провода, то можно взять провод диаметром 1,1 мм и намотку вести вдвое, то есть одновременно двумя проводами, — общее сечение опять-таки будет около 2 мм². От каждого из этих двух проводов нужно сделать выводы и соединить их между собой.

Новая обмотка должна быть сделана очень аккуратно. Ее нужно тщательно изолировать от остающейся на трансформаторе сетевой обмотки. Для этого лучше всего проложить несколько слоев плотной бумаги или лакоткани. Провод новой вторичной обмотки нужно укладывать туго, делая прокладки из плотной бумаги или даже из изоляционной ленты, хорошо закреплять сами выводы в боковых щечках каркаса. Не стоит особенно гоняться за местом, так как после удаления повышающей и накальной обмоток трансформатора для новой обмотки места хватит с избытком.

И, наконец, для тех, кто будет выполнять подобную работу впервые, сообщаем: не вздумайте мучиться и производить переделку трансформатора, не разбирая его. Нужно разобрать сердечник, снять каркас с обмотками, произвести необходимую переделку и затем вновь собрать сердечник. Дело это не очень сложное, и, если не торопиться, оно много времени не займет.

Все приведенные выше данные относятся к выпрямителю для зарядки автомобильных двенадцативольтовых аккумуляторов. Для зарядки мотоциклетных аккумуляторов нужно лишь перебросить провод, идущий к диодам, с отвода 1 на отвод 2. При этом со вторичной обмотки будет сниматься напряжение от 1 в до 4—6 в и в цепи аккумулятора можно будет установить необходимый ток зарядки — около 1 а. К сожалению, в этом случае лампочки в цепи первичной обмотки уже не будут индикаторами нормального тока зарядки — они вообще не будут светиться из-за того, что потребляемый от сети ток слишком мал.

Не думайте, что, изготовив выпрямитель, вы уже сделали все необходимое для того, чтобы самостоятельно заряжать аккумуляторы. Нужно еще иметь представление, как именно, в каком режиме и в течение какого времени следует производить зарядку. Проще говоря, нужно не только иметь чем заряжать аккумулятор, но еще и уметь это делать.

Здесь, пожалуй, неуместно рассказывать о том, как это делается. Существует очень много пособий и инструкций по зарядке и эксплуатации аккумуляторов. Но одну рекомендацию мы все же дадим: будьте осторожны.

Будьте осторожны, так как в аккумуляторе имеется кислота, а она может испортить (проще говоря, сжечь) одежду, а попав на кожу, вызывает ожоги.

Будьте осторожны, так как при зарядке аккумулятора выделяется кислород и водород, а вместе они образуют гремучий газ, который, если поднести огонь, взрывается.

Будьте осторожны (трижды осторожны!), работая с выпрямителем, так как к нему подводится сетевое напряжение, попав под которое, особенно если у вас влажные руки или если вы стоите на сыром полу, можно стать участником (и жертвой!) весьма трагичных событий. Настолько трагичных, что в этих событиях лучше не участвовать. Даже если вам очень нужно зарядить аккумулятор.

Следующая практическая схема с участием полупроводникового диода — это двухдиапазонный детекторный приемник (рис. 43—1). Нужно прямо сказать, что детекторный приемник, если не считать разного рода помех, например грозовых разрядов, удовлетворительно принимает только местные мощные станции. И вполне вероятно, что на обоих диапазонах вы больше одной-двух станций и не услышите.

Разумеется, для приема двух станций можно было и не строить приемник с плавной настройкой да еще двухдиапазонный. Однако для нас постройка такого приемника имеет определенный смысл. И не только учебный. В дальнейшем к детекторному приемнику будут добавлены усилительные каскады, и постепенно, шаг за шагом, мы превратим его в более или менее чувствительный аппарат, принимающий довольно много станций.

Прежде всего несколько слов о приведенных на рис. 43 трех схемах детекторных приемников.

Первая из них (рис. 43—1) уже встречалась нам в общем виде (рис. 27—21; вместо головных телефонов в качестве нагрузки включен резистор). Колебательный контур образуется конденсатором переменной емкости C_2 и одной из катушек — L_1 или L_2 . При приеме на длинных волнах переключатель Π_1 подключает к контурному конденсатору C_2 катушку L_1 , а при приеме на средних волнах — катушку L_2 . Индуктивность L_2 в несколько раз меньше, чем L_1 , а значит, при включении L_2 вместо L_1 резонансная частота контура резко повышается, что и требуется при переходе на средние волны.

Через конденсатор C_1 небольшой емкости (его называют конденсатором связи) к контуру подключена антенна. Можно было бы присоединить антенну непосредственно к контуру и без конденсатора C_1 — в этом случае из антенны в контур попадало бы несколько больше энергии и прием был бы гром-

че. Однако при непосредственном подключении антенны вся ее собственная емкость (антенна и Земля образуют своего рода конденсатор, емкость которого C_A обычно составляет 100—500 $n\phi$ и называется собственной емкостью антенны) вошла бы в контур, суммируясь с C_2 . При этом на настройке контура в меньшей степени сказывалось бы изменение емкости конденсатора C_2 и с его помощью удалось бы перекрыть лишь небольшую часть диапазона. Кроме того, при смене антенны менялась бы настройка контура — ведь у разных антенн разная собственная емкость.

Благодаря введению в схему конденсатора связи собственная емкость антенны уже входит в контур не сама, а соединенная последовательно с этим конденсатором. А поскольку при последовательном соединении конденсаторов их общая емкость меньше наименьшей (см. стр. 150, Воспоминание № 14), то и емкость, вносимая антенной в контур, всегда меньше чем 30 $n\phi$. После того как вы поймаете какую-нибудь станцию, попробуйте соединить антенну непосредственно с контуром и еще раз подстроиться конденсатором C_2 . Может быть, при этом станция будет слышна немного громче.

В нашей схеме выбран наиболее простой способ переключения (коммутации) катушек — на каждом диапазоне используется отдельная катушка, которая либо включается в контур переключателем $П_1$, либо «висит в воздухе» (рис. 46— A'). Иногда применяются и другие схемы коммутации. Вместо длинноволновой катушки, например, используется лишь своего рода «добавка» (рис. 46— A''), катушка L_1 , которая на длинных волнах соединяется последовательно с нормальной средневолновой катушкой L_2 , и общая индуктивность оказывается больше суммы $L_1 + L_2$ (за счет взаимной индукции). Подобная схема, в частности, применяется в приемнике «Селга».

В принципе возможна еще и такая схема коммутации: на средних волнах параллельно длинноволновой катушке подключается «добавка» L_2 (рис. 46— A''), и общая индуктивность уменьшается до нужной на СВ диапазоне величины.

Много остроумных схем коммутации можно встретить в супергетеродинных приемниках с большим числом растянутых коротковолновых диапазонов. Интересные схемы коммутации применяются в универсальных измерительных приборах для переключения предела измерений или рода работы. Нужно сказать, что составление экономных, разумных схем коммутации — занятие хотя и не простое, но довольно интересное.

Теперь о деталях детекторного приемника. В качестве самого детектора D_1 можно применить любой точечный диод.

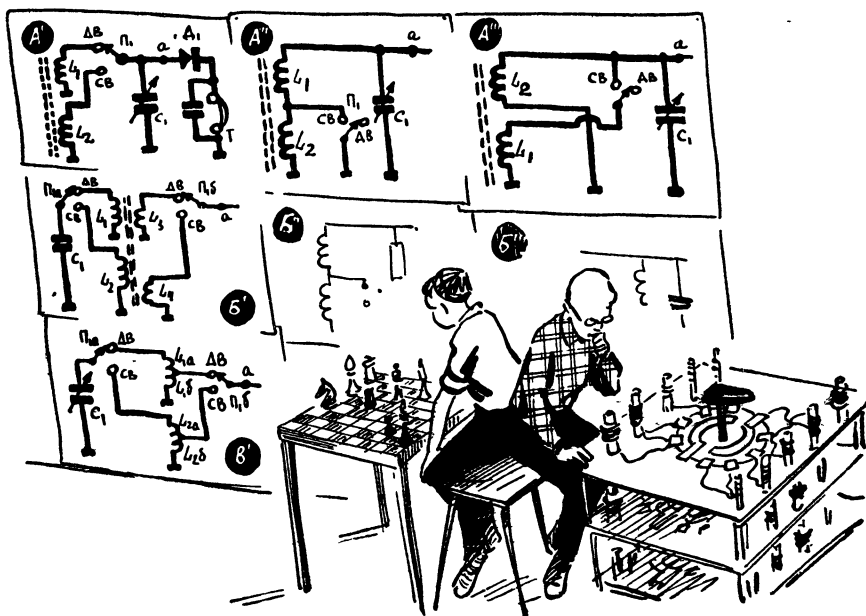


Рис. 46. Существуют различные схемы переключения (коммутации) контурных катушек.

(Рис. 42—45 см. на цветной вклейке между стр. 128—129.)

Выключатель Bk_1 также может быть любого типа, лишь бы он осуществлял нужное переключение.

В нашем первом детекторном приемнике используется перекидной выключатель ТП-1 (рис. 43—4; переключатели такой конструкции обычно называют тумблерами). Этот выключатель поочередно замыкает две пары неподвижных контактов (1 с 2 или 3 с 4), а сам подвижной контакт вывода не имеет.

Соединив два неподвижных контакта, например, 2 и 4, можно превратить ТП-1 в однополюсный переключатель. Роль подвижного контакта в нем будут играть соединенные вместе контакты 2 и 4, которые могут подключаться либо к контакту 1, либо к контакту 3.

В расчете на будущие более сложные схемы удобней было бы применить двухполюсный перекидной переключатель ТВГ, в котором есть два подвижных контакта (поэтому-то он и называется двухполюсным) с самостоятельными выводами и четыре неподвижных контакта. Каждый подвижной контакт «обслуживает» свою пару неподвижных контактов (рис. 43—

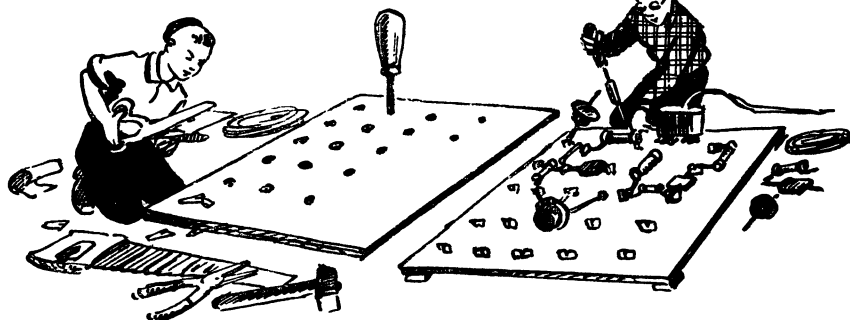
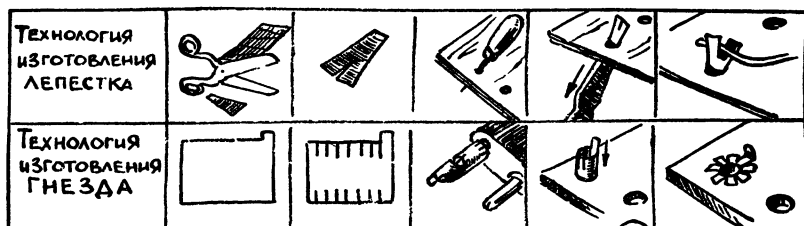


Рис. 47. Монтаж транзисторных схем можно производить на фанерных панелях, в которые вставлены монтажные лепестки из жести.

5). Для того чтобы заменить ТВГ, нужно иметь два выключателя ТП-1.

Для плавной настройки контура используется малогабаритный конденсатор переменной емкости, специально выпускаемый для радиолюбителей. Можно применить и керамический подстроечный конденсатор типа КПК, например КПК-5 25—175. Последние две цифры указывают соответственно минимальную и максимальную емкость конденсатора. Из-за сравнительно небольшого изменения емкости в таком керамическом конденсаторе перекрываемый диапазон несколько уменьшится. Если вы не стеснили себя габаритами приемника (а на первых порах совсем не стоит гоняться за тем, чтобы подковать блоху), то лучше всего осуществить настройку одной секцией стандартного блока воздушных конденсаторов переменной емкости от любого старого лампового приемника.

Головные телефоны должны быть высокоомные, например ТОН-2, сопротивление каждого наушника которых 1600 ом.

Сам приемник монтируется на небольшой фанерной панели, в которую вставлены жестяные лепестки и такие же жестяные гнезда (рис. 47).

Более подробно нужно остановиться на изготовлении контурных катушек (рис. 48).

Прежде всего одно важное общее замечание. Радиолюбители обычно очень старательно выполняют все указания по изготовлению контурных катушек. И это неплохо: катушка, изготовленная точно по описанию, как правило, получается именно такой, какой она и должна быть. А это упрощает наладивание приемника.

Но обратите внимание, что точное копирование катушки только облегчает наладивание, а не избавляет от него. Много разных, казалось бы, второстепенных факторов, таких, например, как емкость монтажа, собственная индуктивность соединительных проводов или, наконец, емкость полупроводниковых приборов, могут свести на нет все труды по точному копированию катушки.

Даже в заводских условиях, когда технология массового производства позволяет делать все приемники абсолютно одинаковыми, эти приемники одинаковыми все же не получаются. Именно поэтому в контурные катушки почти всегда вводят элементы подстройки, чаще всего подстроечные сердечники из

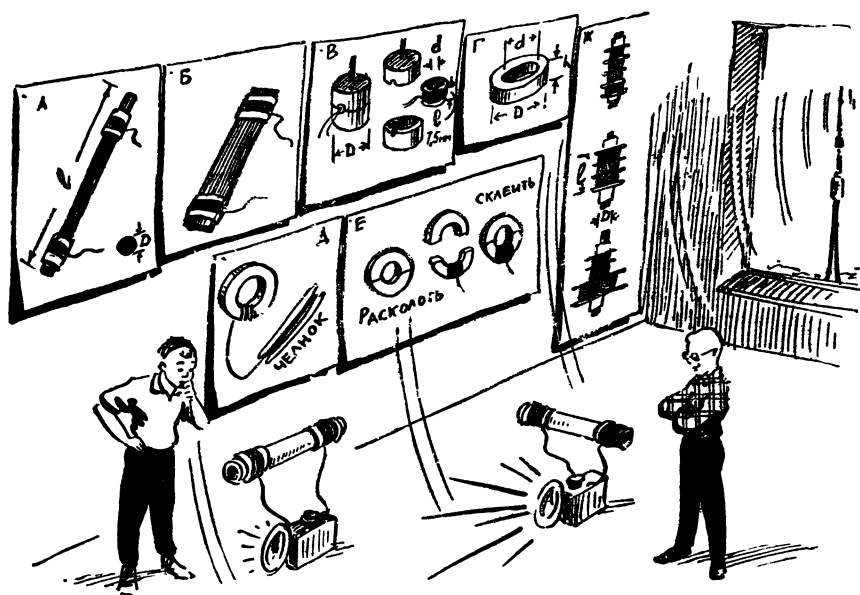


Рис. 48. Контурные катушки могут быть намотаны на ферритовых стержнях (магнитные антенны), в горшкообразных сердечниках, на ферритовых кольцах и на пластмассовых каркасах с подстроечными сердечниками.

магнитного материала. По той же причине при самостоятельном изготовлении катушек нужно спокойней относиться к некоторым небольшим отклонениям от описания и помнить, что индуктивность катушки можно тем или иным способом подогнать при налаживании приемника.

Главное, что характеризует катушку индуктивности, — это ее индуктивность L . А она, в свою очередь, зависит от числа витков, диаметра и длины намотки, размеров, конфигурации и материала сердечника. Очень часто, сохраняя заданную индуктивность L , можно заменять один тип катушек другим. Например, вместо катушек в горшкообразном сердечнике (рис. 48—*В*) применять катушки, намотанные на ферритовых кольцах (рис. 48—*Д*). Если нет возможности точно воспроизвести какую-либо контурную катушку — нет нужного провода, нужного каркаса или нужного сердечника, — то вовсе не следует отчаиваться. Всегда можно сделать несколько иную катушку, на ином каркасе, намотанную иным проводом, и, подобрав число витков катушки (для этого, конечно, придется повозиться), получить нужную индуктивность.

Никто не говорит о том, что к контурной катушке можно относиться неуважительно. За небрежность и ошибки при изготовлении катушек приходится дорого платить, и прежде всего — временем. Но не кидайтесь и в другую крайность: не бойтесь катушки. Помните, что главная характеристика контурной катушки — ее индуктивность L — всегда в ваших руках.

После этого общего замечания — несколько конкретных.

Основные типы катушек, применяемых в любительских и промышленных приемниках, показаны на рис. 48. Контурные катушки, намотанные на длинном круглом (рис. 48, листок *А*) или прямоугольном (листок *Б*) ферритовом стержне, называются магнитной антенной. Это название связано с тем, что такая катушка хорошо отбирает энергию у проходящих к ней радиоволн, используя эту энергию на создание переменного тока в своей цепи. В этом отношении магнитная антенна делает, по сути дела, то же самое, что и обычная антенна. Только обычная антенна для создания электрического сигнала вылавливает (см. примечание на стр. 26) электрическую составляющую электромагнитных волн (радиоволн), а магнитная антенна вылавливает их магнитную составляющую.

По своей эффективности магнитная антенна эквивалентна обычной проволочной антенне высотой 2—3 метра. Отличительная особенность магнитной антенны — направленный прием. Она лучше всего ловит энергию радиоволн, которые приходят с направлений, перпендикулярных стержню. Именно по-

этому приемник, снабженный магнитной антенной, вращают, направляя эту антенну на принимаемую станцию (рис. 48).

Очень часто применяются катушки, намотанные на так называемых броневых (горшкообразных) сердечниках. Такой сердечник представляет собой собранную из двух половинок закрытую чашу, внутрь которой вставлен небольшой пластмассовый каркасик с самой катушкой. Броневые сердечники делают из прессованных магнитных порошков, чаще всего карбонильного железа или феррита. Карбонильный сердечник обозначается буквами СБ, ферритовый — Б. Цифра в названии сердечника указывает его внешний диаметр. Так, например, СБ-12 означает: «сердечник броневой, карбонильный диаметром 12 мм»; название «Б6» означает: «сердечник броневой ферритовый диаметром 6 мм».

В конце названия любого сердечника, в том числе и броневое, может стоять еще одна цифра. Она характеризует свойство магнитного материала, из которого сделан сердечник. Чем больше эта цифра, тем выше магнитная проницаемость сердечника, тем больше будет индуктивность намотанной на нем катушки. Однако, как правило, с повышением магнитной проницаемости сердечника уменьшается предельная частота, на которой его можно применять.

Так, например, из таблицы 6 видно, что сердечники с проницаемостью 4000 пригодны для частот не более 150 кГц, а сердечники с проницаемостью 1000 — до 750 кГц. В длинноволновых катушках обычно используют ферритовые сердечники с проницаемостью не более 1000, а в средневолновых катушках — сердечники с проницаемостью не более 600. Для коротковолновых катушек пригодны сердечники, проницаемость которых обычно не превышает нескольких десятков. Эти ограничения относятся к стержням магнитной антенны, к броневым сердечникам и к любым другим.

Радиолюбители для намотки катушек используют ферритовые кольца (рис. 48—Г) разных размеров. Размеры кольца отражены в самом его названии: первая цифра названия указывает внешний диаметр кольца D , вторая — его внутренний диаметр d , третья цифра — высоту кольца h . В название кольца входит также и марка феррита. Так, например, название кольца К6×2,5×2,8—600НН означает: «кольцо с внешним диаметром $D=6$ мм, внутренним диаметром $d=2,5$ мм, высотой $h=2,8$ мм; сделано из феррита с проницаемостью 600».

Существует два основных способа изготовления сердечников на ферритовых кольцах: можно использовать своего рода челнок, на который предварительно наматывают небольшой кусок провода (рис. 48—Д), а можно намотать провод, пред-

варительно расколов кольцо, а затем склеив его, например, клеим БФ-2 (рис. 48—Е). При склейке нужно хорошо совместить и крепко сжать половинки кольца, так как зазор между ними резко уменьшает индуктивность катушки.

Для намотки катушек часто используют также стандартные каркасы из различных видов пластмассы с небольшими стержневыми ферритовыми сердечниками (рис. 48—Ж).

Примерные данные контурных катушек L_1 и L_2 при использовании разных типов сердечников приведены в таблице 7. В нашем приемнике можно применить любой тип катушек, указанный в таблице (так же, впрочем, как и другие типы катушек, не попавшие в нее), но лучше всего, пожалуй, сделать магнитную антенну. И лишь только потому, что она в дальнейшем будет использована в других приемниках.

Таблица 6

Марки ферритов

Граничная частота	Марка феррита
Десятки	5В4
	10В4
	13В4
	20В4
	30В4
Мгц	50В4
	60В4
	100НН
4 Мгц	100ННІ
	150НН
	200НН
3,5 Мгц	200ННІ
2,5 Мгц	400НН
1,5 Мгц	600НН
1,2 Мгц	2000НН
400 кгц	1000НМ
750 кгц	1500НМ
650 кгц	2000НМ
450 кгц	2000НМІ
	3000НМ
	4000НМ
200 кгц	
150 кгц	

Таблица 7

Ориентировочное число витков контурных катушек и катушек магнитных антенн приемников прямого усиления (провод ПЭ 0,12, намотка — „внавал“ или для магнитных антенн на СВ — однослойная).

C_K (пФ)	15—500		10—250		3—150	
Диапазон	ДВ	СВ	ДВ	СВ	ДВ	СВ
L_K мкГн	2300	185	4600	370	7000	560
Тип катушки (см. примечание в конце таблицы)						
1	180	65	290	90	430	120
2	175	50	280	85	410	110
3	200	65	260	85	360 (0,1)	110
4	190	60	240	80	330	100
5	180	55	220	70	300	90
6	330	105	450 (0,1)	150	600 (0,1)	180
7	350 (0,1)	110	500 (0,1)	160	—	200 (0,1)
8	200 (0,1)	—	300 (0,1)	—	400 (0,1)	—
9	550	140	760 (0,1)	200	800 (0,08)	240

1. Магнитная антенна на круглом стержне из феррита 600 НН (Ф—600); диаметр — 8 мм, длина 140 мм.

2. То же, длина стержня 160 мм.

3. Магнитная антенна на плоском стержне из феррита 600 НН (Ф—600) размеры стержня 2,8×11×85 мм.

4. То же, размеры стержня 3×20×100 мм.

5. То же, размеры стержня 4×16×125 мм.

6. Горшкообразный сердечник СВ—12 а (см. рис. 48 — В). Размеры $D = 12,3$ мм, $d = 9$ мм и $l = 8$ мм.

7. Катушка на ферритовом кольце (см. рис. 48 — Г). Размеры кольца $D = 10$ мм, $d = 6$ мм, $h = 2$ мм. Феррит 600 НН (Ф — 600).

8. То же, феррит 2000НМ (Ф — 2000).

9. Катушка на секционированном пластмассовом каркасе с ферритовым сердечником. Размеры каркаса $D = 6$ мм, $l = 4 \times 3$ мм.

Для детекторного приемника магнитная антенна не имеет никакого смысла — она не в состоянии отнять у радиоволн энергию, достаточную для того, чтобы прокормить (см. примечание на стр. 26) головные телефоны. Для детекторного приемника нужна очень хорошая, очень большая антенна из медной проволоки и обязательно нужно заземление. Комнатная антенна длиной в 5—10 м годится лишь при приеме мощных местных станций.

Данные катушек можно взять из таблицы 7, а также из описаний любительских или заводских приемников.

Провод ПЭ — это обычный провод в эмалированной изоляции, провод ПЭЛШО — такой же провод, как и ПЭ, но покрытый снаружи еще и шелковой изоляцией, а провод марки ЛЭШО — это так называемый литцендрат. Он состоит из большого числа очень тоненьких жилок — в названии литцендрата входит число жилок и диаметр каждой из них. Так, например, провод ЛЭШО $21 \times 0,07$ содержит 21 жилку, диаметром 0,07 мм каждая. Применение литцендрата всегда желательно, так как он обладает очень малыми потерями на высоких частотах, и катушки, намотанные таким проводом, отличаются высокой добротностью (Воспоминание № 20).

При изготовлении катушек из литцендрата нужно проявлять сверхаккуратность: если хотя бы одна из жилок окажется обломанной или непропаянной, то контур, по сути дела, будет погублен. Вот почему у литцендрата очень важно аккуратно зачистить тончайшей шкуркой и залудить все жилки, убедиться в том, что ни одна жилка не обломалась, и уже после этого, объединив все эти жилки, подпаять их к нужному монтажному лепестку.

Таблица 7 требует некоторых пояснений.

В средней колонке этой таблицы число витков указано в расчете на применение конденсатора с минимальной емкостью $C_{\min} = 10 \text{ нф}$ и максимальной около $C_{\max} = 250 \text{ нф}$. Минимальная емкость контура $C_{\text{к-мин}}$ всегда больше, чем C_{\min} конденсатора, за счет емкости монтажа, собственной емкости катушки и других «паразитных» емкостей. Все эти емкости как бы подключаются параллельно конденсатору настройки, суммируясь с его емкостью. Предполагается, что паразитная емкость равна 20 нф, и поэтому общая минимальная емкость контура $C_{\text{к-мин}}$ составит 30 нф, а максимальная $C_{\text{к-макс}} = 270 \text{ нф}$. Иными словами, при полном повороте ротора конденсатора настройки емкость контура изменяется примерно в девять раз ($270 : 30 = 9$). Запомните эту цифру, пожалуйста: д е в я т ь раз.

Стандартный длинноволновый диапазон имеет граничные

необходимо изменение емкости в девять раз и т. д. Одним словом, если вы хотите, чтобы частота настройки контура изменялась в κ_f раз, то нужно, чтобы емкость настроечного конденсатора изменялась в $\kappa_c = \kappa_f^2$ раз. Это и есть квадратичная зависимость.

У нас как будто все получается прекрасно: емкость контура уже с учетом паразитных емкостей меняется в девять раз. Поэтому поворотом ротора конденсатора настройки мы полностью перекрываем средневолновый диапазон и даже с некоторым избытком длинноволновый (для точного перекрытия диапазона ДВ достаточно, чтобы емкость изменялась в $2,7^2 \approx \approx 7,3$ раза).

Нарисованная нами благополучная картина, к сожалению, не всегда соответствует действительности. И прежде всего потому, что паразитная емкость может оказаться значительно больше 20 пф, особенно при длинных монтажных проводах. К чему же приводит увеличение паразитной емкости? Об этом лучше всего расскажет числовой пример.

Представьте себе, что паразитная емкость равна не 20 пф, а 50 пф, а значит, минимальная и максимальная емкости контура соответственно равны $C_{к-мин} = 10 + 50 = 60$ пф и $C_{к-макс} = 250 + 50 = 300$ пф. В этом случае при полном повороте ротора конденсатора настройки емкость контура меняется в пять раз ($300 : 60 = 5$), а частота настройки соответственно в 2,3 раза ($2,3^2 \approx 5$). Естественно, что при таком изменении частоты настройки можно будет перекрыть лишь часть диапазона СВ или ДВ: например, от 525 до 1200 кГц (СВ) и от 150 до 250 кГц (ДВ).

Но и для такого частичного перекрытия диапазонов еще необходимо будет несколько уменьшить число витков контурной катушки. Ведь катушка рассчитана на максимальную емкость 250—270 пф, и при большей емкости (а у нас она теперь достигает 300 пф!) контур выйдет за границу диапазона и окажется настроенным на слишком длинные волны, где вещательные станции вообще не работают.

Такой избыток в низкочастотной (длинноволновой) части диапазона не был бы сам по себе неприятен, если бы у нас не оказался «отрезанным» большой участок в высокочастотной его части, то есть в области самых коротких волн диапазона. (Вряд ли стоит шить пиджак с большими накладными карманами, если не хватает материала на рукава.) Поэтому-то и возникает необходимость уменьшить число витков катушки, сдвинуть весь диапазон в сторону более коротких волн и таким образом хоть в какой-то степени скомпенсировать недостаточ-

ное перекрытие диапазона конденсатором переменной емкости.

Подобные же трудности возникают, если во входном контуре использовать конденсатор с иными значениями максимальной и минимальной емкости по сравнению с конденсатором, на который рассчитана контурная катушка. Так, например, применяя в качестве C_2 керамический конденсатор настройки типа КПК-3, имеющий максимальную емкость 150 пф и минимальную 25 пф, мы фактически сможем перекрыть лишь половину каждого диапазона. Если оставить данные катушек без изменения, то контур не будет настраиваться на длинноволновую часть диапазона (не хватит емкости), а если примерно в полтора раза увеличить число витков катушек, то мы скомпенсируем уменьшение максимальной емкости настроечного конденсатора, попадем в длинноволновые участки диапазонов, но, естественно, при этом выйдем из коротковолновых участков.

В сильной степени влияет на настройку контура и собственная емкость антенны. Причем влияние это всегда неприятное — чем больше емкость антенны, тем меньше перекрытие диапазона. Когда, добавив к детекторному приемнику несколько усилительных каскадов, вы сможете наконец вести прием только на магнитную антенну, а внешнюю антенну отключить, то диапазон, перекрываемый конденсатором C_2 , заметно увеличится.

Приведенные грустные примеры, конечно, не исчерпали осложнений, которые могут возникнуть при подгонке индуктивности и емкости колебательных контуров. Но эти примеры, по-видимому, достаточно ясно показали, что при изготовлении колебательных контуров может потребоваться в значительной степени отклониться от тех данных контурных катушек, которые с большой точностью приводятся в описаниях самодельных приемников.

Кроме этого общего примечания, таблица 7 нуждается еще и в нескольких конкретных примечаниях.

При изготовлении магнитных антенн средневолновая катушка наматывается в один слой, а длинноволновая — «внавал», то есть без определенного порядка. При намотке длинноволновой катушки желательно все же разбить ее на три-четыре секции, каждая из которых может иметь ширину 5—7 мм при расстоянии между секциями 3—5 мм. Во всех случаях обмотку укладывают на два-три слоя плотной бумаги или хлорвиниловой пленки, предварительно намотанной на ферритовый сердечник. Для того чтобы закрепить выводы ка-

тушек, проще всего надеть на стержень четыре (по числу выводов) тугие резинки.

Подгонка индуктивности катушек L_1 и L_2 осуществляется самым примитивным образом: отматыванием или добавлением витков. Это не слишком приятная операция, особенно если имеешь дело с литцендратом. Во всех других катушках, где есть подвижный сердечник, точная подгонка индуктивности производится с его помощью: чем глубже вдвинут сердечник в катушку, тем больше ее индуктивность. В магнитной антенне подвижного сердечника нет, и, если нужно осуществить точную подгонку индуктивности, пользуются иным способом.

Всю катушку разделяют на две половинки и одну из них делают подвижной — наматывают на бумажной гильзе, которая легко перемещается по ферритовому стержню. Если сближать половинки катушки, то ее общая индуктивность увеличивается, если раздвигать — уменьшается. Увеличение индуктивности происходит за счет так называемой взаимоиндукции, то есть за счет того, что каждая половинка усиливает магнитное поле другой половинки.

Для детекторного и даже для простого транзисторного приемника нет смысла усложнять конструкцию магнитной антенны и вводить точную подгонку индуктивности катушки L_1 и L_2 . Но если вы все же попытаетесь это сделать, то не делите всю обмотку на две равные части, а оставьте в подвижной секции примерно 10—20% общего числа витков. Даже такая небольшая подвижная секция позволит в некоторой степени менять индуктивность катушки. И в то же время отвод от небольшого числа витков пригодится нам для некоторых схем транзисторных приемников.

Кстати, попробуйте подключить к отводу цепь детектора. При таком автотрансформаторном включении явно улучшится избирательность, а может быть, даже возрастет громкость приема.

Уменьшая число витков, к которым подключен детектор (раньше он подключался ко всей катушке, а теперь к ее части), мы уменьшаем ту часть напряжения, которое поступает на детектор с колебательного контура. Это, конечно, проигрыш. Но в то же время мы уменьшаем и потери, которые детектор вносит в контур, и, значит, повышаем добротность контура, общее напряжение на нем. А это, конечно, выигрыш. Существует такая точка отвода от катушки, при которой выигрыш оказывается больше, чем проигрыш, и при подключении детектора к этой точке громкость возрастает. Это очень интересное решение — проигрыш, дающий выигрыш, — и вы навер-

няка еще будете вспоминать о нем, анализируя различные электронные схемы.

На этом, пожалуй, мы закончим наши практические работы с диодами и перейдем к транзисторам. И, так же как мы это делали при знакомстве с диодами, начнем с нескольких простых опытов.

ЗДРАВСТВУЙ, ТРАНЗИСТОР!

Прежде чем производить с транзистором опыты, нужно узнать его название, определить, какой из выводов-проводочек относится к базе, какой — к эмиттеру, а какой — к коллектору, и, наконец, проверить исправность прибора.

Название транзистора написано на нем самом — иногда сбоку, а иногда на плоской «макушке». Там же указана дата изготовления (обозначение «ХII 67», например, означает, что прибор сделан в декабре 1967 года), а также марка завода-изготовителя.

В дальнейшем будет подробно рассказано о том, из каких элементов складывается название транзистора и что означают отдельные буквы и цифры в этом названии. А пока лишь отметим, что система названий транзисторов несколько раз менялась и что названия старых и новых приборов часто расшифровываются по-разному. Однако при этом буквы всегда дают общую характеристику прибора, а цифры указывают его конкретный тип.

Так, например, буква «П» означает «плоскостной», а в новых названиях буквы «ГТ» означают «германиевый транзистор». В то же время транзисторы П4, П8, П13, П201 — это все совершенно разные приборы, с разными назначениями, параметрами, характеристиками, и именно в цифрах отражены все эти различия.

Итак, если вы хотите научиться по названиям различать транзисторы, то должны помнить, какая цифра к какому конкретному типу прибора относится. Задача эта не простая, она требует большого внимания и хорошей памяти. Однако решение задачи облегчается следующими тремя обстоятельствами.

Во-первых, существуют своего рода семейства транзисторов со многими схожими чертами и близкими номерами.

Так, например, транзисторы П8, П9, П10 и П11 (обратите внимание — цифры идут подряд) — это все приборы типа *n-p-n*, изготовленные по одной и той же технологии и различающиеся лишь некоторыми (правда, очень важными!) параметрами. Точно так же к одному семейству относятся *p-n-p*

транзисторы П13, П14, П15 и П16 (опять цифры подряд), хотя и они различаются по некоторым очень важным параметрам.

Зато очень резко отличаются от этой группы — и по технологии и по такому важному параметру, как предельная частота усиления, — транзисторы другого семейства: П401, П402 и П403 (цифры подряд). Это высокочастотные транзисторы, и самый низкочастотный из них (П401) работает на частоте 60 Мгц. В то же время для самого высокочастотного транзистора предыдущей группы (П15) частотный предел — 2 Мгц.

Совсем другая отличительная черта у транзисторов семейства П201, П202 и П203 (цифры подряд). Это мощные транзисторы, с помощью которых можно усилить сигнал до 10 вт. А у всех семейств, о которых шла речь до этого, предельная выходная мощность — 50—150 мвт, то есть в десятки раз меньше.

Второе обстоятельство, облегчающее запоминание конкретных типов транзисторов, связано с тем, что, начиная с некоторого времени, их группировали в сотни. Так, в первую сотню входят только сплавные *p-n-p* транзисторы малой мощности, работающие на сравнительно невысоких частотах (исключение составляют старые названия, например: П4 — очень мощный триод, П3 — мощный триод, П8 — П11 — триоды *n-p-n*); во вторую сотню входят сравнительно мощные *p-n-p*-транзисторы, в четвертую — высокочастотные транзисторы, и т. д.

И, наконец, третье обстоятельство, помогающее ориентироваться в океане параметров и названий, — большое число справочников по транзисторам. Кроме того, данные наиболее распространенных приборов имеются в большинстве книг, где приводятся транзисторные схемы. Сведения о некоторых отечественных популярных транзисторах вы найдете и в этой книге на стр. 259—262.

Для опытов, которые мы сейчас проведем, так же как и для наших первых транзисторных схем (рис. 44), можно взять любой транзистор семейства П13—П16 (МП13—МП16), или, что почти то же самое, любой транзистор семейства П39—П42 (МП39—МП42). Определить выводы у этих транзисторов довольно просто. Все выводы расположены в один ряд, и средний из них (он, кстати, соединен с металлическим корпусом) — это база. А вот как находят другие выводы у П13—П16.

Совершенно ясно, что по одну сторону от базы (средний вывод) находится вывод коллектора, по другую — вывод эмиттера. Отличить их тоже несложно. Во-первых, загнутый и прикрепленный к корпусу кусочек среднего вывода (вывода базы) направлен в сторону коллектора. Во-вторых, сам вывод эмит-

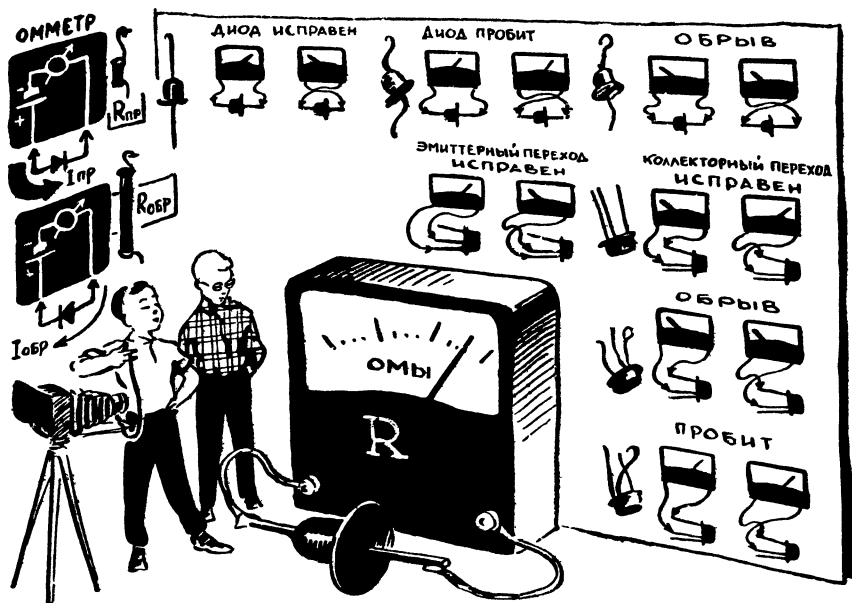


Рис. 50. Сопротивление pn -перехода различно при разной полярности батареи, и это позволяет проверять исправность диодов и транзисторов с помощью омметра.

тера расположен чуть ближе к выводу базы, чем вывод коллектора. У других транзисторов выводы расположены совсем по-иному, и их можно определить по справочному рисунку на стр. 268—269.

Итак, мы определили выводы выбранного транзистора: средний вывод — это база, ближний к нему — эмиттер, дальний — коллектор. (Еще раз напоминаем: это справедливо лишь для нескольких транзисторов!) Теперь попробуем проверить исправность транзистора. Проще всего это сделать с помощью омметра: нужно измерить прямое и обратное сопротивление эмиттерного и коллекторного переходов. Прямое сопротивление $R_{пр}$ каждого из этих переходов должно быть очень небольшим, обратное $R_{обр}$ — очень большим (рис. 50).

При измерении сопротивлений pn -перехода вам даже не нужно задумываться над тем, когда вы измеряете $R_{пр}$, а когда $R_{обр}$. Вы можете поступить так: подключите омметр к эмиттеру и базе, заметьте сопротивление, затем поменяйте местами концы омметра и еще раз заметьте сопротивление. В одном случае сопротивление должно быть большим, в другом — ма-

лым, потому что в одном случае внутренняя батарейка омметра подключена к базе «плюсом» (измеряется $R_{обр}$), в другом — к базе «минусом» (измеряется $R_{пр}$). И не стоит задумываться, в каком случае к базе подключен «минус» внутренней батарейки омметра, а в каком «плюс». Если при смене концов омметра вы обнаружите два разных, резко отличающихся сопротивления, то можете считать, что эмиттерный *pn*-переход исправен.

Точно так же, меняя концы омметра и замечая, как при этом меняется сопротивление, можно проверить исправность коллекторного *pn*-перехода. И так же, кстати, можно проверить исправность любого полупроводникового диода.

Если при проверке *pn*-перехода окажется, что в обоих направлениях он обладает очень большим сопротивлением, то можно предположить, что один из выводов просто отпаялся, «отгорел» от своей зоны. Если же окажется, что в обоих направлениях сопротивление *pn*-перехода очень мало, то вероятнее всего, что произошел пробой и обе зоны, образующие *pn*-переход, соединились коротко.

При проверке транзистора легко допустить ошибку, перепутав вывод базы с каким-нибудь другим выводом. В этом случае может оказаться, что вы измеряете сопротивление между эмиттером и коллектором, а это сопротивление у исправного транзистора всегда будет очень большим, как бы вы ни меняли местами выводы омметра.

Узнав тип транзистора, определив его выводы и убедившись в исправности прибора, можно приступить к опытам. Нужно сказать, что сами эти опыты могут быть использованы для проверки транзисторов. Точно так же и опыты с диодом можно использовать для его проверки. Прodelайте с диодом любой из двух показанных на рис. 41 опытов, и если он удастся, значит, диод исправен.

Перед началом опытов с транзисторами полезно повторить первые два опыта с диодами. Только на этот раз в них будут участвовать не настоящие диоды, а *pn*-переходы транзисторов. Батарейка и громкоговоритель или батарейка и лампочка позволяют легко убедиться, что полупроводниковый триод действительно можно рассматривать как два полупроводниковых диода, имеющих одну общую зону — базу (рис. 51).

Цель следующего опыта — доказать, что транзистор усиливает.

Включим абонентский громкоговоритель в коллекторную цепь транзистора в качестве нагрузки и подадим на коллектор напряжение — 9 в (рис. 52). Можно подвести к транзи-

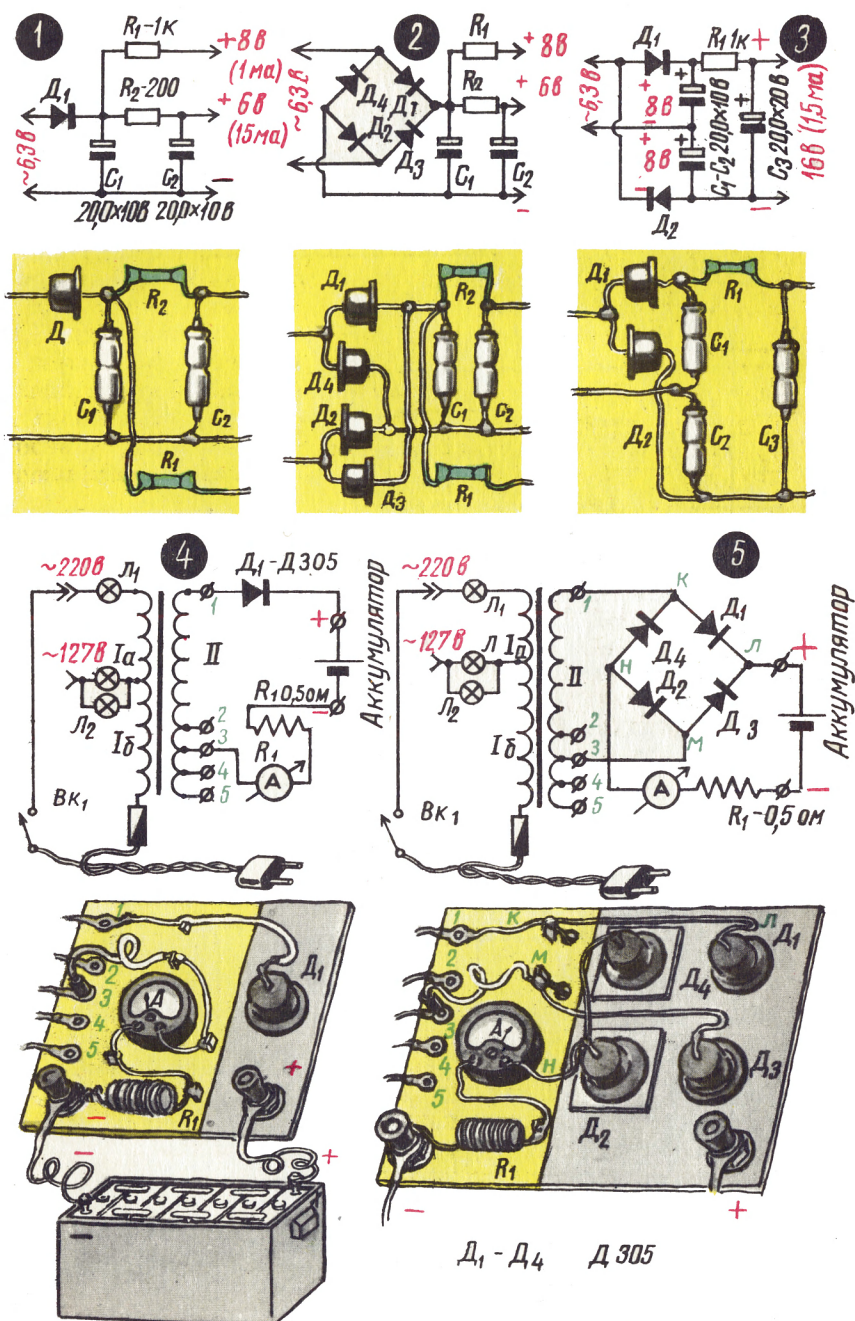


Рис. 42. Выпрямители для питания транзисторной аппаратуры (1—3) и для зарядки автомобильных аккумуляторов (4—5).

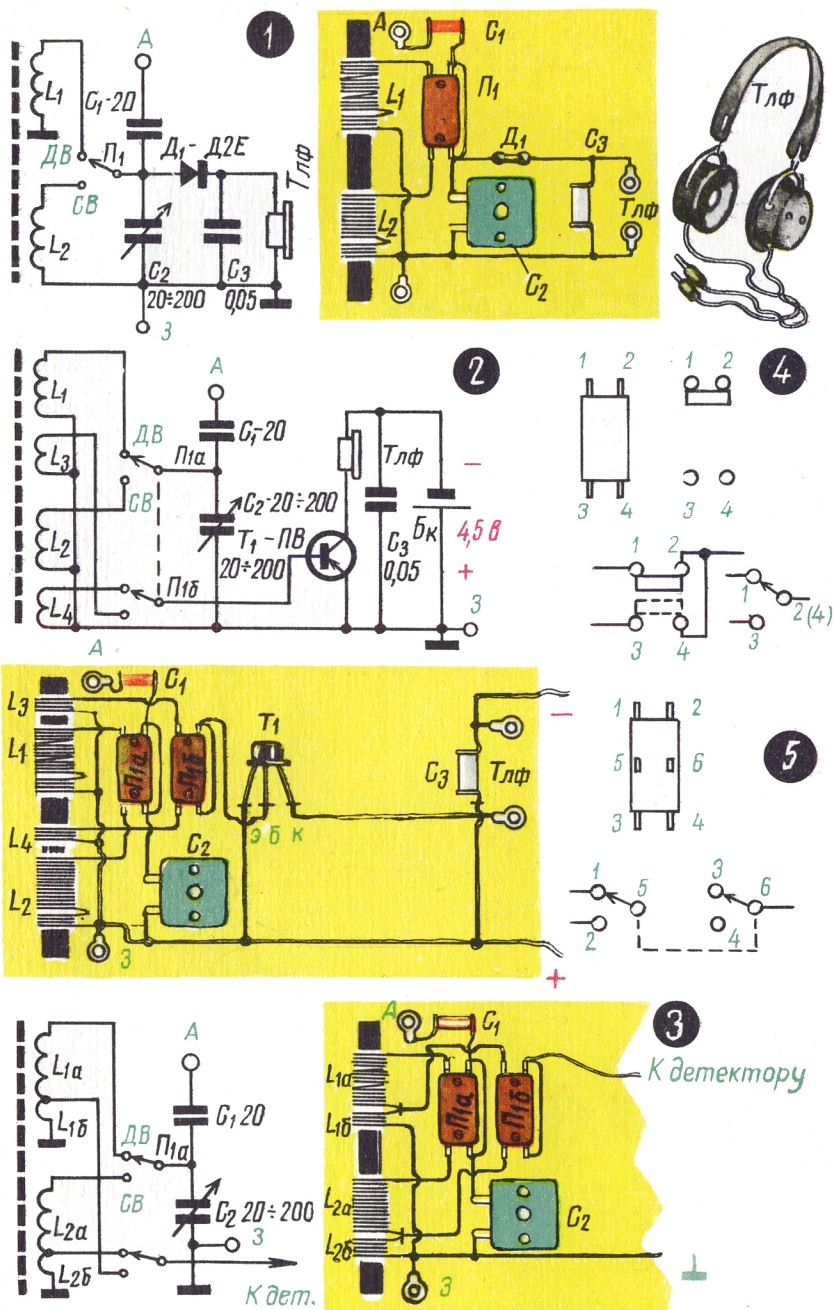


Рис. 43. Двухдиапазонные детекторные приемники.

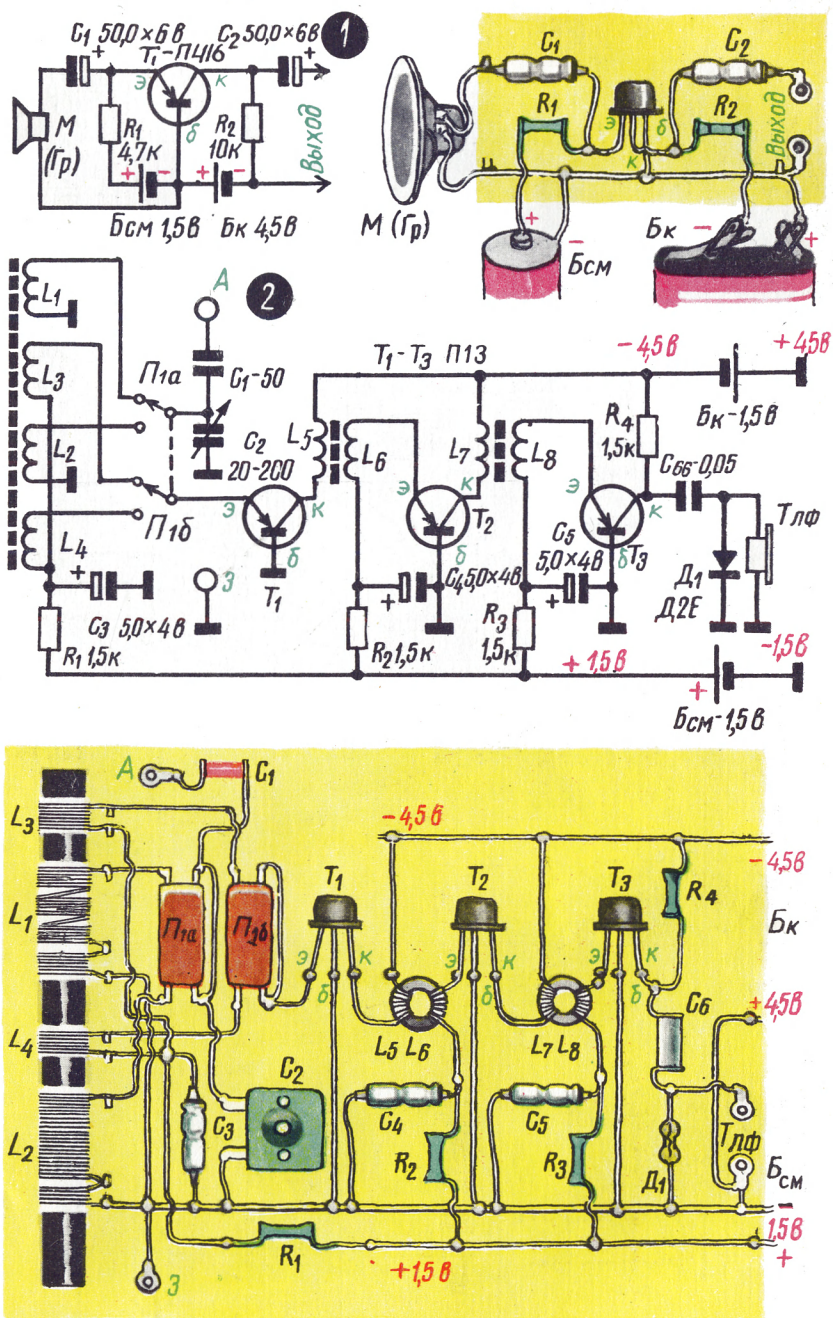


Рис. 44. Усилитель для громкоговорителя — микрофона (1) и трехкаскадный усилитель высокой частоты для детекторного приемника (2).

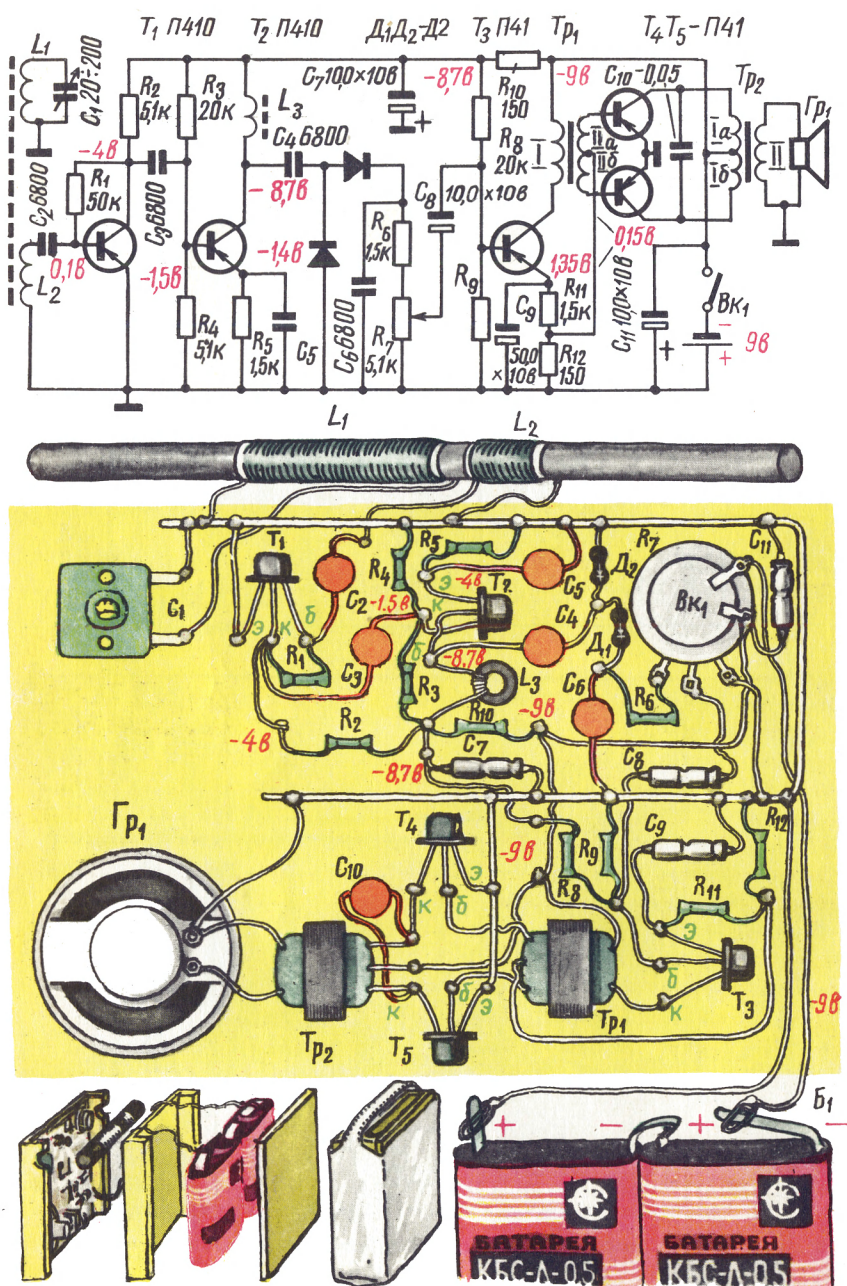


Рис. 45. Двухдиапазонный приемник прямого усиления по схеме 2—У—2.

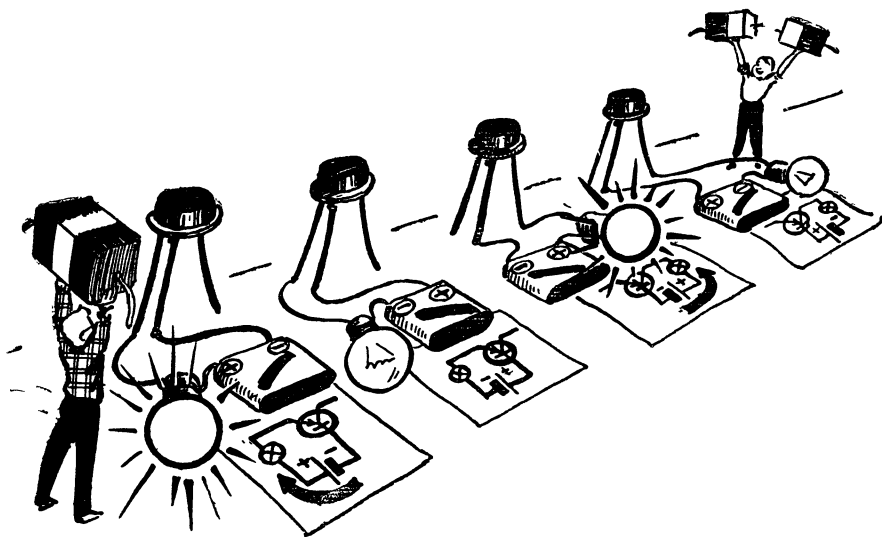


Рис. 51. Батарейка и лампочка карманного фонаря позволяют на опыте убедиться в том, что транзистор, по сути дела, представляет собой два полупроводниковых диода.

сторы и меньшее коллекторное напряжение, например 4,5 в, но при этом эффект усиления будет замечен меньше.

Для опыта нужен еще один источник тока — элемент B_2 на 1,5 в, с помощью которого мы будем имитировать слабый усиливаемый сигнал. Если присоединить «минус» элемента B_2 к базе и периодически прикасаться выводом эмиттера к «плюсу» этого элемента (то есть непрерывно замыкать и размыкать цепь, как мы это делали в опытах с диодами), то в громкоговорителе будут слышны щелчки. Появятся они потому, что элемент B_2 будет периодически отпирать транзистор (впрыскивать заряды из эмиттера в базу) и в коллекторной цепи будут появляться импульсы коллекторного тока. Эти импульсы и заставят в итоге колебаться диффузор громкоговорителя.

Если вы хотите убедиться в том, что щелчки в громкоговорителе появляются именно из-за отпирания транзистора, то попробуйте поменять полярность включения B_2 : «плюс» этого элемента соедините с базой, а «минус» — с эмиттером. При такой полярности элемент B_2 будет еще сильнее запира́ть транзистор: «плюс» на базе не только не притягивает дырки из эмиттера, но наоборот — отталкивает их. Поэтому при

тише тех щелчков, которые возникали при включении громкоговорителя в коллекторную цепь усилительного каскада.

А вот еще один опыт, позволяющий убедиться в том, что транзистор усиливает. Включите в его коллекторную цепь лампочку на 3,5 в и подайте напряжение на коллектор, но уже не 9 в, а 4,5 в. Теперь так же, как и в предыдущем опыте, подключите ко входу транзистора, то есть между базой и эмиттером, источник опирающегося напряжения — элемент B_3 на 1,5 в. Вы увидите, что даже под действием этого небольшого напряжения ярко загорится лампочка на 3,5 в. Разумеется, лампочка горит за счет другого источника энергии, за счет коллекторной батареи B_k , которая дает 4,5 в. Но управляет энергией коллекторной батареи слабенький элемент B_3 , который сам, конечно, не в состоянии зажечь лампочку L_1 . В этом легко убедиться, подключив лампочку L_1 непосредственно к элементу B_3 .

Следуя по пути, который был выбран нами при практическом знакомстве с полупроводниковыми диодами, сейчас следовало бы перейти от учебных опытов к практическим транзисторным схемам. Однако на этом участке пути, к сожалению, появляются серьезные препятствия. Мы пока еще слишком поверхностно знакомы с транзистором, слишком мало о нем знаем. Мы, по сути дела, знаем лишь одну транзисторную схему, которая в общем, упрощенном виде фигурирует на многих наших рисунках (рис. 36, 37, 40, 52 и др.). А эта схема далеко не исчерпывает всех возможностей включения транзистора. Более того, схема, с которой мы познакомились, применяется сравнительно редко, и она была выбрана для первого знакомства только потому, что позволяет легче всего пояснить принцип действия транзистора. На практике чаще всего применяется совсем иная схема, знакомство с которой у нас еще впереди.

И все же мы разберем несколько практических схем, не дожидаясь более детального знакомства с транзистором.

Начнем с уже имеющегося у нас детекторного приемника, включив в него вместо диода эмиттерный переход транзистора. Эмиттерный переход — это тот же полупроводниковый диод, и поэтому он прекрасно справится с детектированием сигнала. В этом легко убедиться, заменив в схеме рис. 43—1 диод D_1 эмиттерным переходом любого транзистора. Коллектор при этом никуда не подключается, «висит в воздухе».

Однако мы заменили диод транзистором совсем не для того, чтобы доказать, что эмиттерный переход может быть детектором. Это было ясно и без экспериментальных доказа-

тельств. Мы включили вместо диода транзистор для того, чтобы хоть в какой-то степени использовать его усилительные способности.

Давайте переведем головные телефоны в коллекторную цепь и подадим на коллектор питание от батареи B_k (рис. 43—2). Низкочастотная составляющая протектированного сигнала, проходя по входной цепи, будет, как и всякий входной сигнал, управлять коллекторным током, и в итоге в коллекторной цепи появится мощная копия входного низкочастотного сигнала. Во всяком случае, на нагрузке — головных телефонах — будет выделяться бóльшая мощность, чем это было в детекторном приемнике с диодом (рис. 43—1).

Обратите внимание на две особенности схемы. Прежде всего на то, что в этой схеме нет смещения. Вы удивлены? Напрасно. Здесь смещение не нужно, потому что не нужно избавляться от искажений. Более того, искажения в этой схеме совершенно необходимы: сущность детектирования в том и состоит, чтобы отсечь половину высокочастотного сигнала, создать в цепи пульсирующий ток.

Вторая особенность схемы сама бросается в глаза: рядом с контурными катушками появились еще какие-то две катушки L_3 и L_4 . О них, пожалуй, придется сказать несколько подробнее. Катушки L_3 и L_4 — это так называемые катушки связи. Каждая из них (это хорошо видно на монтажной схеме) располагается рядом со своей контурной катушкой (L_1 или L_2) и отбирает от нее некоторую часть энергии. Эту энергию катушка связи передает в ту цепь, куда она включена; в нашей схеме — в цепь детектора.

Здесь может возникнуть законный вопрос: зачем нужен посредник — катушка связи? Ведь и раньше энергия, которая циркулировала в контуре, передавалась в цепь детектора. Ответ на этот вопрос мы, собственно говоря, уже дали, когда рассматривали так называемое автотрансформаторное включение детектора — подключение детектора к части колебательного контура (стр. 143).

Было отмечено, что, подключая детектор к части контура, мы и проигрываем, и выигрываем. Проигрываем потому, что снимаем с контура меньшую часть напряжения, чем снимали бы при подключении детектора ко всей контурной катушке, а не к части ее витков. Выигрываем потому, что уменьшаем потери, которые сам детектор создает в контуре, отбирая у него энергию. И, подбирая точку подключения к контуру, можно добиться так называемого оптимального согласования (ему будет посвящен целый раздел — см. стр. 220), когда выигрыш оказывается максимальным, даже с учетом проигрыша.

С той же целью — для получения наибольшего выигрыша, для подбора наивыгоднейшей, оптимальной связи — в схему вводится и катушка связи. Уменьшение числа витков этой катушки равносильно уменьшению числа витков, к которым подключается детектор при автотрансформаторной схеме. Но если, сделав отвод от катушки, вы раз и навсегда определили ту часть энергии, которая попадет в детектор из контура, то, применив дополнительную катушку связи, вы получаете возможность плавно подобрать связь, добиваясь наибольшего выигрыша. Для этого достаточно несколько переместить катушку связи относительно контурной катушки.

В приемнике, где детектором служит точечный диод, ослабление связи между детектором и контуром весьма желательно. В приемнике с транзисторным детектором такое ослабление просто необходимо, потому что входное сопротивление плоскостного транзистора очень мало и если подключить его прямо к контуру, то контур, по сути дела, исчезнет. Малое входное сопротивление транзистора, подключенное параллельно контуру, настолько сильно шунтирует его (Воспоминания № 8 и № 20), настолько ухудшает добротность этого контура, что резонансные явления в нем почти не ощущаются.

В заключение приводим самые главные данные — данные катушек L_3 и L_4 . Для магнитной антенны первая из них содержит 15 витков (длинноволновая катушка связи L_3), вторая — 8 витков (средневолновая катушка связи L_4). Катушки могут быть намотаны тем же проводом, что и контурные. Если во входном контуре используется катушка в броневом сердечнике, то катушку связи проще всего намотать на бумажном каркасе, надетом поверх этого сердечника. Если контурная катушка намотана на кольцо, то на нем же следует намотать и катушку связи. Во всех случаях катушка связи может содержать в 10—20 раз меньше витков, чем соответствующая контурная катушка.

Вместо отдельной катушки связи можно сделать отвод от самой контурной катушки, примерно от одной десятой части ее витков (рис. 43—3). Такой отвод удобен лишь в магнитной антенне, так как отдельную секцию контурной катушки можно использовать для подгонки ее индуктивности. В большинстве промышленных и любительских приемников применяют отдельные катушки связи.

Схему рис. 43—2, хотя в ней и используется транзистор, не стоит называть усилителем. Это триодный детектор, в котором усиление осуществляется «по совместительству».

А сейчас мы рассмотрим две практические схемы, где транзистор занят своим основным делом — усиливает слабый сиг-

нал. Первая из этих схем — усилитель низкой частоты, вторая — усилитель высокой частоты.

Если понадобится быстро сделать простейшее переговорное устройство, то включите обычный абонентский громкоговоритель в гнезда «Звукосниматель» любого приемника. Громкоговоритель будет играть роль микрофона, а сам приемник достаточно громко воспроизведет все то, что вы будете перед этим микрофоном говорить.

Микрофон-громкоговоритель можно отнести на 20—30 метров от самого приемника, если они соединены экранированным проводом, и на 5—7 метров, если для соединения используется обычный двухжильный провод. Это последнее ограничение связано с тем, что в открытый соединительный провод попадают сильные «наводки» от проводов сети. По мере удлинения провода они становятся все сильнее, все заметнее рядом со сравнительно слабым сигналом микрофона.

Микрофон-громкоговоритель обязательно должен быть с трансформатором, потому что сам громкоговоритель, когда он работает микрофоном, даже при сравнительно громкой речи развивает напряжение 1—5 мв. А для того чтобы приемник развивал нормальную выходную мощность, проще говоря — чтобы он воспроизводил вашу речь достаточно громко, нужно подвести к гнездам «Звукосниматель» напряжение 100—200 мв. Почти до такого уровня напряжение повышает собственный трансформатор абонентского громкоговорителя. Когда сигнал идет в обратную сторону, не к громкоговорителю, а от него, трансформатор оказывается повышающим.

Если у вас нет под руками абонентского громкоговорителя с трансформатором, то вы можете использовать в качестве микрофона любой динамик, добавив к нему простенький усилитель на одном транзисторе (рис. 44—1). Правда, в данном случае основное достоинство усилителя не будет использовано. Дело в том, что к гнездам «Звукосниматель» (они соединены прямо со входом усилителя низкой частоты приемника) можно подвести сигнал очень малой мощности, и с этой точки зрения вполне можно было бы обойтись и без усилителя. Усилитель нужен нам лишь для того, чтобы повысить напряжение, которое дает громкоговоритель-микрофон. А поскольку в известной нам схеме (рис. 37) эффект усиления получается за счет того, что напряжение на выходе усилителя больше, чем на входе, то именно поэтому однокаскадный транзисторный усилитель прекрасно заменяет повышающий трансформатор.

Конечно, заменять трансформатор усилителем, использовать только усиление по напряжению там, где можно было бы использовать усиление по мощности, — это непростительное

расточительство. Но мы идем на него сознательно. Во-первых, предлагаемая схема нам доступна (имеющихся у нас знаний пока недостаточно, чтобы строить другие, более сложные, совершенные и более полезные схемы). Во-вторых, не исключено, что вам эта схема пригодится: иногда труднее бывает достать трансформатор, чем транзистор.

Вторая практическая схема — трехкаскадный усилитель высокой частоты (рис. 44—2). Как всегда, он включается между антенной и детектором и усиливает сигнал, поступающий на детектор. Усилитель повышает напряжение примерно в пятьсот — тысячу раз, а это позволяет принимать уже довольно большое число станций, которые без усилителя вообще не слышны. Сигналы некоторых станций усиливаются настолько, что их можно слушать уже не на головные телефоны, а на громкоговоритель. Например, на простейший громкоговорящий капсульт ДЭМ—4М. Главное достоинство усилителя в том, что для него пригодны транзисторы с самыми скверными параметрами. В частности, в этом усилителе работают триоды с таким низким коэффициентом усиления, что в других схемах они не дали бы приемлемых результатов. Другое достоинство усилителя в том, что он почти не требует налаживания.

Есть у этого усилителя и недостатки: он рассчитан только на один диапазон — на длинные волны. Хотя на схеме показан усилитель, включенный в двухдиапазонный детекторный приемник, однако надо прямо сказать, что на средних волнах такой усилитель работает плохо — слишком мало усиление. В дальнейшем, познакомившись с транзистором более подробно, мы построим более простой и в то же время более совершенный усилитель высокой частоты для двухдиапазонного приемника. А схема, о которой идет речь сейчас, останется в нашей памяти лишь «этапом большого пути».

В схеме рис. 44—2 — три усилительных каскада, и сигнал, как эстафета, передается с одного из них на другой. Первый каскад (транзистор T_1) получает сигнал прямо из входного контура через катушку связи L_3 или L_4 . Этот сигнал подается, естественно, во входную цепь транзистора — одним концом катушка связи L_3 (L_4) подключается прямо к эмиттеру, а вторым концом соединяется с базой. Соединение с базой осуществляется не непосредственно, а через конденсатор C_3 . Емкость этого конденсатора весьма велика, и можно считать, что переменное напряжение высокой частоты замыкается прямо на «землю», куда подключена база транзистора.

Небольшой черный прямоугольник — это условное обозначение, показывающее соединение с металлическим шасси (панелью), на котором монтируется схема. Но там, где монтаж

ведется на панели из изолятора, роль такого общего для всех цепей «металлического шасси» обычно играет медная шинка — сравнительно толстый медный провод, к которому удобно подпаивать много разных цепей. Такая медная шинка имеется и на всех монтажных панелях нашего приемника. С ней соединено и гнездо «Земля». Поэтому о проводнике, подключенном к общей медной шинке, говорят, что этот проводник заземлен.

Соединить нижний (по схеме) конец катушки связи прямо с базой нельзя — через катушку связи на эмиттер подается напряжение смещения. «Минус» батареи смещения $B_{см}$ соединен с «землей», куда подключены все базы, а «плюс» подается на эмиттер транзистора T_1 через катушки связи и резистор R_1 . Конденсатор C_3 позволяет заземлить нижний конец катушки связи для переменного тока и одновременно оставить его незаземленным для постоянного тока. Такие приемы — раздельное подключение какой-либо точки для переменного и постоянного тока — в электронной аппаратуре встречаются на каждом шагу. Более подробно мы познакомимся с ними немного позже (см. стр. 208).

Нагрузкой первого усилительного каскада служит высокочастотный трансформатор L_5L_6 . Его первичная обмотка включена в коллекторную цепь транзистора T_1 , и через эту обмотку на коллектор подается «минус» с батареи B_k . Вторичная обмотка вводит усиленное первым каскадом напряжение во входную цепь второго транзистора T_2 . Так же, как и в первом каскаде, верхний (по схеме) конец катушки связи соединен непосредственно с эмиттером, а нижний конец — с базой (через конденсатор C_4). И так же, как и в первом каскаде, через катушку связи подается на эмиттер «плюс» смещения. Мы привыкли к тому, что на базу подается «минус» смещения относительно эмиттера, но это то же самое, что подать на эмиттер «плюс» смещения относительно базы.

Третий усилительный каскад отличается от второго только тем, что нагрузкой в нем служит уже не трансформатор, а резистор R_4 , выходное напряжение с которого поступает прямо на детектор. Детектор собран по параллельной схеме, и его нагрузкой служит сам громкоговоритель или головные телефоны.

Во всех трех усилительных каскадах смещение подается одним и тем же способом, и нужное напряжение смещения устанавливается подбором резисторов R_1 , R_2 или R_3 . Каждый из этих резисторов образует со своим эмиттерным $p\bar{n}$ -переходом делитель напряжения. Резисторы выбраны таким образом, чтобы погасить излишек напряжения батареи $B_{см}$ и оставить на эмиттерном переходе постоянное напряжение 0,2 в.

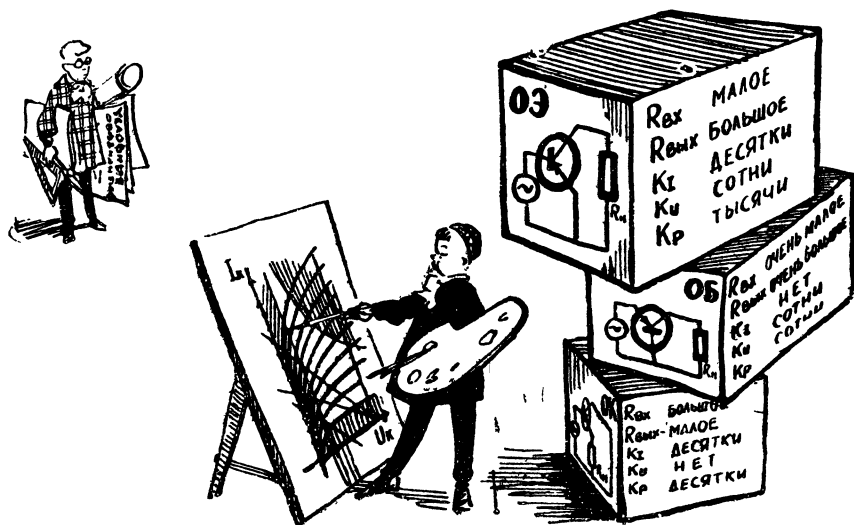
Напряжение на коллектор в первых двух транзисторах подается через катушку (L_5 , L_7) с очень небольшим активным сопротивлением. На такой катушке постоянное напряжение практически не теряется, и поэтому к коллекторам транзисторов T_1 и T_2 подводится полное напряжение батареи B_k . Это, кстати, одна из причин, позволивших удовлетвориться очень небольшим напряжением батареи B_k .

В приемнике по схеме рис. 44—2 используются те же основные детали — входной контур, переключатели диапазонов, конденсатор настройки, — что и в детекторных приемниках. Да и сам монтаж может вестись на той же фанерной панели. Единственное изменение, которое следует произвести, — это уменьшение числа витков катушки связи в три — пять раз. Так, например, катушка L_3 может содержать 3—4 витка, катушка L_4 — 2—3 витка.

Высокочастотные трансформаторы L_5L_6 и L_7L_8 выполнены на ферритовых кольцах $K7 \times 4 \times 2$ 2000 НМ (магнитная проницаемость феррита — 2000; применение колец из феррита с меньшей проницаемостью снижает усиление). Данные катушек L_5 — 120 витков, L_6 — 90 витков, L_7 и L_8 — по 10 витков каждая. Для намотки может быть использован провод ПЭЛШО 0,15.

Рассматривая схемы наших первых транзисторных усилителей, можно найти в них много неясного. Для чего, например, включать в качестве коллекторной нагрузки понижающий трансформатор (число витков L_5 и L_7 меньше, чем число витков L_6 и L_8) и снижать таким образом выходное напряжение каскада? Почему бы не собрать усилитель низкой частоты по той же схеме, по которой собран наш усилитель высокой частоты, и обеспечить таким образом нормальную работу громкоговорителя? Почему бы не упростить схему высокочастотного усилителя, применив вместо трансформаторов резисторы? Почему этот усилитель плохо работает на средних волнах?

Подобных вопросов можно придумать немало. Но пока трудно дать ответы на них. И трудность эта прежде всего связана вот с чем: мы с вами еще плохо знаем язык, на котором можно было бы говорить о транзисторных схемах. Преодолеть эту трудность можно только одним способом: нужно более внимательно, более подробно познакомиться с транзисторами.



Глава III

АБСТРАКТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Для начала заглянем в энциклопедический словарь и найдем там такое пояснение: «Абстракция — мысленное отвлечение от тех или иных конкретных сторон, свойств или связей предмета. Научная абстракция — отвлечение от несущественных, случайных признаков предмета или явления в целях познания наиболее существенных его сторон...»

Сейчас мы начинаем серьезное знакомство с транзисторными усилителями. Начинаем не с каких-либо конкретных, а именно с абстрактных, обобщенных, «очищенных» от подробностей транзисторных схем. На этих схемах в коллекторную цепь транзистора вместо определенного резистора на 1,5 или на 4,3 килоома будет включен абстрактный, без конкретного значения резистор R_n . Между базой и эмиттером вместо конкретного, точно отмеренного напряжения 0,2 или 0,15 в,

будет действовать абстрактное напряжение $U_{эб}$ без указания величины. Да и сами транзисторы на таких схемах — это не конкретные приборы П13 или П403, а условные, абстрактные полупроводниковые триоды, без определенных названий и параметров.

Вам, по-видимому, хочется узнать, для чего понадобилось такое отвлечение от «конкретных сторон, свойств или связей» нашего «предмета» — транзисторного усилителя? И почему нельзя знакомиться с транзисторными усилителями не по абстрактным, а по конкретным схемам, которые в заключение знакомства можно было бы «спаять» и «пустить в дело»? Пусть таких практических схем очень много, пусть знакомство с ними дело долгое и утомительное, но ведь лучше сразу затрачивать силы и время на нужное, практически важное дело, чем заниматься какими-то абстракциями!

В качестве ответа на эти вопросы и возражения приведем такое сравнение.

Существуют очень сложные арифметические задачи, которые можно решать «обычным способом» — последовательно придумывать простые вопросы и отвечать на них вычислениями.

А можно решать эти задачи и по-другому — с помощью алгебраических уравнений. Вы, наверное, по собственному опыту знаете, что этот второй путь более удобен и легок. А главное, научившись решать абстрактные, то есть отвлеченные от конкретных чисел алгебраические уравнения, вы тем самым сразу получаете ключ к решению бесчисленного множества разнообразных арифметических задач. К тому же этот алгебраический ключ открывает вам доступ к решению таких сложных задач, которые арифметическим способом практически вообще не решаются.

Можно смело сказать, что способность к абстрактному мышлению, умение выделять главные, наиболее важные особенности предметов и явлений, умение находить универсальные методы, пригодные для решения сразу многих сложных задач, пользоваться одним обобщенным, абстрактным понятием вместо огромного множества конкретных, — все это составляет одну из главных особенностей человеческого ума. Постарайтесь найти время и серьезно задуматься над этим.

А сейчас нам пора возвращаться к транзисторным схемам. Познакомившись с абстрактным усилителем, соединяющим в себе главные особенности множества конкретных транзисторных схем, познакомившись с характерными для этого абстрактного усилителя физическими процессами и схемными решениями, мы с вами вместо долгой и утомительной осады

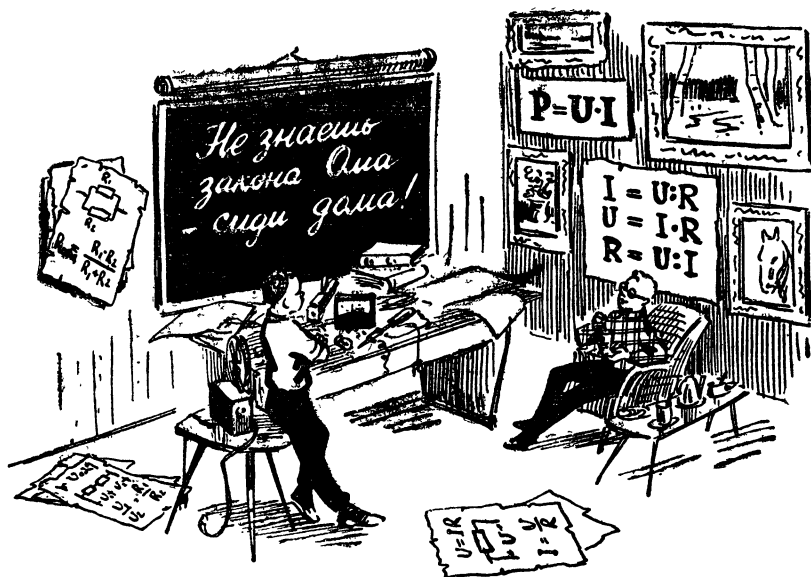


Рис. 53. Для того чтобы разбираться в транзисторных схемах, нужно прежде всего знать основные законы электрических цепей, основные законы электротехники.

совершим своего рода танковый прорыв,— быстро и легко войдем в огромную и прекрасную Страну Практических Транзисторных Схем.

ВЕЧЕР ВОСПОМИНАНИЙ

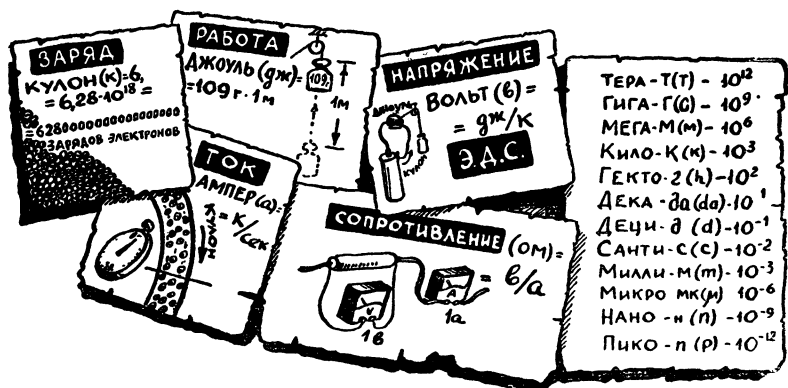
Мастера, ремонтирующие приемники или телевизоры, любят говорить, что радиоэлектроника — это наука о контактах. Действительно, нарушение контактов в переключателях, соединительных фишках, контактных разъемах, ламповых панелях, наконец просто в местах плохой пайки — это довольно частое, если не самое частое повреждение аппаратуры. Устранить такое повреждение несложно, но обычно требуется большой опыт, чтобы найти место нарушения контакта.

И все же изречение «Радиоэлектроника — наука о контактах» не более чем шутка. Если говорить серьезно, то радиоэлектроника — это прежде всего наука об электрических цепях и сигналах.

Если вы свободно разбираетесь в сложных электрических цепях, знаете законы, которым они подчиняются, представляете себе, как проходят по этим цепям различные электрические сигналы, то вы легко разберетесь в работе любого радиоэлектронного устройства. Любое радиоэлектронное устройство — это прежде всего электрические цепи, в которых создаются и преобразуются электрические сигналы.

Все сказанное в полной мере относится и к транзисторным усилителям. И именно поэтому, прежде чем браться за схемы усилителей, мы с вами устроим небольшой вечер воспоминаний — вспомним несколько важных правил, действующих в мире электрических цепей и сигналов. С некоторыми из этих правил вы уже встречались в этой книге, некоторые наверняка знаете с еще более давних времен. Ну, а если не знаете, то сможете узнать, познакомившись с одним из популярных учебников по основам электротехники. А на первых порах вам будет достаточно тех более чем скромных сведений, которые вы почерпнете из наших коротких воспоминаний. При этом не забывайте о примечании на стр. 26.

ВОСПОМИНАНИЕ № 1. СОПРОТИВЛЕНИЕ, ТОК, НАПРЯЖЕНИЕ, Э. Д. С.



О первых трех характеристиках мы уже говорили на стр. 18. Известны также единицы, в которых измеряются сопротивление, напряжение и ток. Часто бывает удобно пользоваться более крупными и более мелкими единицами (не всегда же мы пользуемся метром — расстояние между городами удобней измерять в километрах, а диаметр провода — в миллимет-

рах). Как образуются производные единицы, все эти мегомы (Мом), киломы (ком), миллиамперы (ма), микровольты (мкв) и другие, подскажет вам таблица.

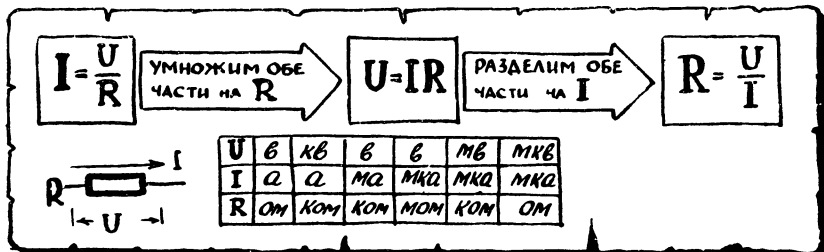
Напряжение, которое может дать генератор в режиме холостого хода, то есть когда от него не потребляют энергии, называется электродвижущей силой, сокращенно э. д. с. Она, как и напряжение, измеряется в вольтах и так же говорит о работе, которую мог бы выполнить генератор, перемещая по цепи заряд в один кулон. Однако э. д. с. — это, откровенно говоря, хвостовство. Как только вы подключите к генератору нагрузку и в цепи пойдет ток, некоторая часть э. д. с. тут же потеряется на внутреннем сопротивлении этого генератора (см. стр. 146). Поэтому напряжение на зажимах генератора всегда меньше, чем э. д. с.

ВОСПОМИНАНИЕ № 2. НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА. Разбирая сложные схемы, нужно следить, где возникает «плюс», где «минус», куда идет ток и т. д. Ток могут создавать и положи-



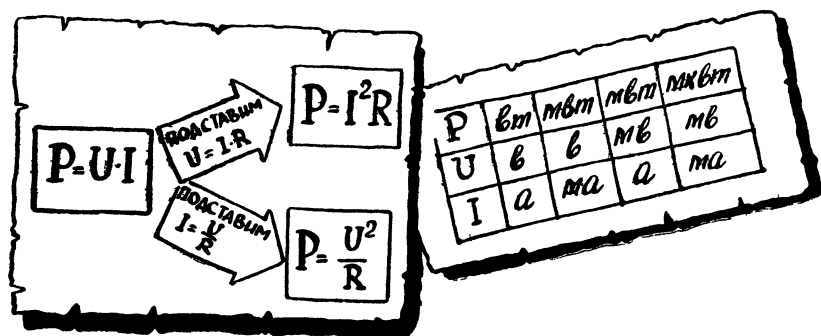
тельные, и отрицательные заряды, которые, естественно, под действием одного и того же напряжения движутся в разные стороны. Положительные заряды всегда тянутся к «минусу», а отрицательные бегут от него. Чтобы не заводить лишней путаницы, договорились следить только за движением положительных зарядов, а на отрицательные (электроны), по возможности, вообще не обращать внимания. Поэтому официальное направление тока — от «плюса» к «минусу».

ВОСПОМИНАНИЕ № 3. ЗАКОН ОМА. И о нем мы уже говорили не раз. Чтобы не допускать обидных ошибок при



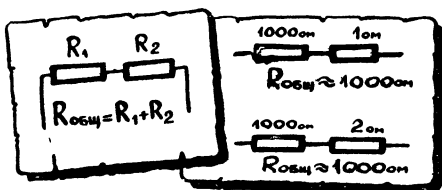
расчетах по формулам закона Ома, пользуйтесь приведенной здесь таблицей, в одном из вертикальных столбцов которой вы найдете удобный «комплект» единиц. Если цепь состоит из большого числа элементов, то нужно сначала найти ее общее сопротивление, которое позволит определить общий ток, а затем ток и напряжение на отдельных участках.

ВОСПОМИНАНИЕ № 4. МОЩНОСТЬ. Как известно, мощность — это произведение тока на напряжение. Если не-



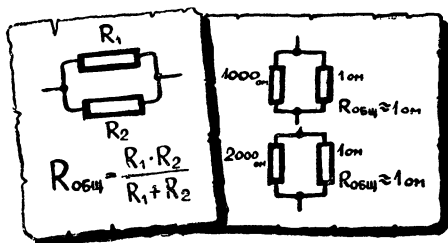
известна одна из этих величин, ее легко получить, пользуясь все тем же законом Ома. «Комплекты» единиц для вычисления приведены в таблице.

ВОСПОМИНАНИЕ № 5. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ. Общее сопротивление равно сумме соединенных сопротивлений, причем главную роль играет наибольшее из них. Пример. Если соединить последовательно два резистора $R_1 = 1000 \text{ ом}$ и $R_2 = 1 \text{ ом}$, то их общее сопротивление $R_{\text{общ}} = 1001 \text{ ом}$. Резистор R_2 выглядит на фоне своего коллеги R_1 как муха, помогающая волу тянуть плуг.

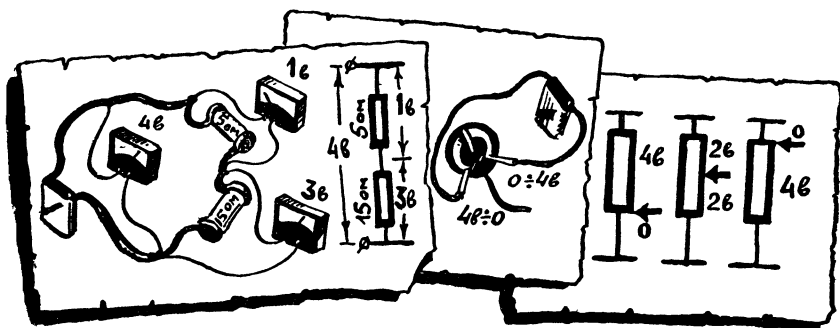


ВОСПОМИНАНИЕ № 6. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ. Общее сопротивление в основном определяется малым сопротивлением, а роль мухи достается

большому. Пример. Включим те же два резистора $R_1=1000\text{ ом}$ и $R_2=1\text{ ом}$. Нетрудно подсчитать общее сопротивление (произведение нужно делить на сумму) — оно равно $0,999\text{ ом}$. Параллельно подключенное сопротивление может лишь уменьшить сопротивление участка, и поэтому общее сопротивление всегда меньше наименьшего.



ВОСПОМИНАНИЕ № 7 (ОДНО ИЗ САМЫХ ВАЖНЫХ ДЛЯ НАС). ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЯ. Подведем напряжение к двум последовательно соединенным резисторам. Оно автоматически распределится между ними так, что на большем сопротивлении будет действовать и большая часть напряжения.

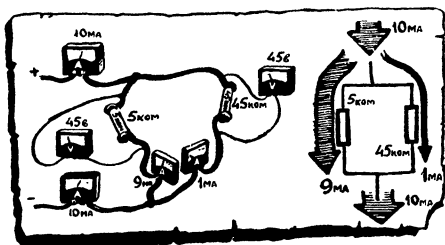


Такое распределение напряжений легко объяснить. Дело в том, что во всех участках последовательной цепи течет один и тот же ток: сколько зарядов входит в электрическую цепь (не забывайте о примечании на стр. 26), столько же выйдет из нее. А чтобы продвинуть один кулон по участку с сопротивлением 10 ом , нужно поработать в десять раз больше, чем для продвижения этого же кулона по участку с сопротивлением 1 ом .

Напряжение, ток, сопротивление на любом участке делителя, так же как и во всей цепи, связаны формулами закона Ома. Разновидностью делителя является потенциометр — переменное сопротивление, позволяющее плавно менять распределение напряжений.

В том, что делитель действительно делит подведенное к нему напряжение пропорционально сопротивлениям отдельных участков, легко убедиться, подключив вольтметр к каждому из резисторов.

ВОСПОМИНАНИЕ № 8. ШУНТ. В переводе на русский «шунт» означает «обходной путь». Так называют резистор или другой элемент, подключаемый параллельно какому-либо участку цепи. Через шунт, естественно, идет часть тока, и, чем меньше шунтирующее сопротивление, тем больший ток ответвится в него, тем меньшая часть тока пойдет через шунтируемый участок цепи. Напряжение на резисторах, соединенных параллельно, всегда одинаково, а их общее сопротивление меньше наименьшего (Воспоминание № 6).



Если вы хотите убедиться в том, что усвоили понятия «делитель» и «шунт», попробуйте составить несколько эквивалентных схем (все детали представлены резисторами) уже знакомой нам цепи (рис. 41, листок А), состоящей из лампочек, выключателей и диодов. Составьте эквивалентные схемы этой цепи для всех возможных комбинаций включения и выключения B_{K1} и B_{K2} , причем для обоих полупериодов. При этом считайте, что прямое сопротивление диода равно 2 ом, обратное — 20 ком и сопротивление лампочки — 200 ом.

ВОСПОМИНАНИЕ № 9. ГЕНЕРАТОР И НАГРУЗКА. Пекарь, выпекающий хлеб, обязательно должен и сам чего-нибудь поесть. Так и генератор, вырабатывающий электрическую энергию, часть ее расходует на свои внутренние нужды. Можно сказать, что внутреннее сопротивление генератора R_{Γ} вместе с сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$ образует делитель (Воспоминание № 7): чем больше $R_{\text{н}}$ по сравнению с R_{Γ} , тем большая часть э. д. с. достается нагрузке. Об этом можно сказать и иначе: чем меньше $R_{\text{н}}$, тем больше потребляемый от генератора ток, тем больше падение напряжения на R_{Γ} и, следовательно, меньше напряжение на выходе генератора.

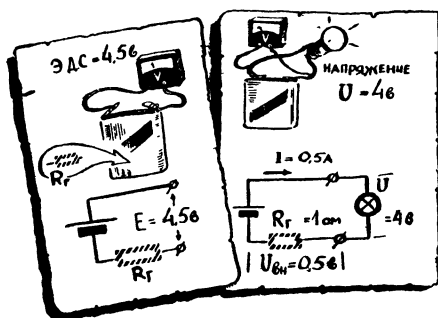
Попробуйте постепенно увеличивать число лампочек, подключаемых параллельно батарееке карманного фонаря. Вы

увидите, что, чем больше лампочек, тем более тускло горит каждая из них.

Происходит это потому, что потребляемый ток растет, возрастают потери на внутреннем сопротивлении батареи и напряжение на ее зажимах падает. Естественно, что напря-

жение на выходе генератора зависит и от самого внутреннего сопротивления.

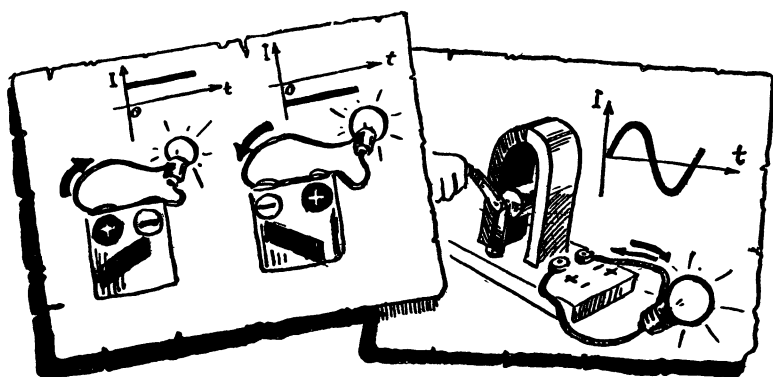
Пример. У старых батареек R_r сильно возрастает, и напряжение, которое дает такая батарея под нагрузкой, уменьшается. В то же время при отключенной нагрузке, когда ток через R_r практически не идет, вольтметр показывает у старых



батарей нормальную э. д. с. (ток, потребляемый самим вольтметром, мал, и мы его не учитываем).

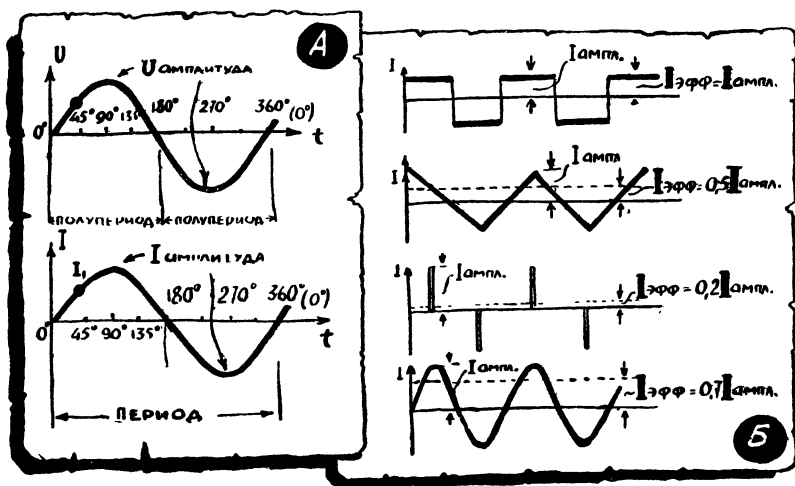
Все, о чем сейчас говорилось, относится к генератору в широком смысле слова. Генератором можно считать всякий элемент цепи, передающий энергию своему соседу независимо от того, как была получена эта энергия. Генератор — это и гальванический элемент, и антенна приемника, и транзисторный усилитель, и колебательный контур, и электрическая сеть. Во всех случаях нужно учитывать и то, что генератор отдает, и то, что теряется в нем самом; нужно учитывать и соотношение сопротивлений потребителя и самого генератора.

ВОСПОМИНАНИЕ № 10. ПЕРЕМЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. Генератор, на зажимах которого «плюс» и «минус» непрерывно меняются местами, дает переменное напряжение. А под действием переменного напряжения в цепи протекает переменный ток — заряды двигаются «туда» и «обратно». Для многих элементов (например, для лампочки, электроплитки, холодильника) совершенно безразлично, куда двигаются заряды, меняется ли их направление или остается неизменным. Главное — чтобы заряды двигались и работали. Но, конечно же, многие элементы электрических цепей совершенно по-разному ведут себя при постоянном и переменном токе. Более того, поведение многих элементов зависит от параметров (характеристик) переменного тока.



ВОСПОМИНАНИЕ № 11. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (НАПРЯЖЕНИЯ).

Период. Это время, в течение которого ток проходит полный цикл изменений. Измеряется в секундах. Иногда удобно вести речь о полупериодах, которые условно называют положительным и отрицательным.



Частота — число периодов в секунду. Измеряется в герцах (Гц), килогерцах (кГц), мегагерцах (МГц) и т. д.
 $1 \text{ Гц} = 1 \text{ период за } 1 \text{ сек.}$

Амплитуда — наибольшее значение напряжения, тока или мощности. Измеряется соответственно в вольтах, амперах и ваттах. Напряжение и ток дважды за период достигают амплитудного значения — во время положительного и отрицательного полупериодов.

Мгновенное значение напряжения, тока, мощности. Посмотрев на часы и точно заметив момент времени, можно (по крайней мере, в мысленном опыте) измерить ток именно для этого момента. Это и будет мгновенное значение тока (напряжения, мощности). Естественно, для разных моментов времени мгновенные значения различны — на то у нас и переменный ток.

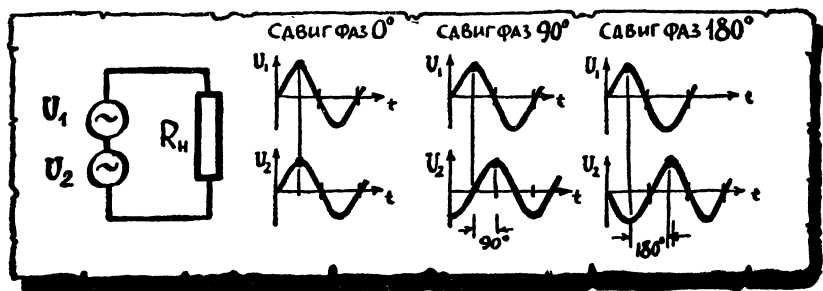
Форма кривой. Официально ее не числят в параметрах переменного тока. А зря. Судить о форме кривой, то есть о характере изменения тока (напряжения), можно по его графику. А точное описание формы переменного тока (напряжения) может дать спектр — набор синусоидальных составляющих (см. стр. 60).

Эффективное значение напряжения и тока. Амплитуда говорит о наибольшей работе, которую может выполнить переменный ток. Но ведь амплитудные значения бывают редко. Чтобы судить о работоспособности тока не в один какой-нибудь момент, а в течение длительного времени, вводится еще одна характеристика — эффективное значение тока. Оно указывает, какой величины нужно пустить в цепь постоянный ток, чтобы он работал так же, как и протекающий там переменный. Эффективное значение, как правило, меньше амплитуды, а вот на сколько меньше, это зависит уже от формы кривой, точнее, от того, каков переменный ток в интервалах между амплитудами. Для синусоидального переменного тока и напряжения (обратите внимание — только для синусоидального!) эффективный ток (напряжение) составляет 70% амплитуды, или иначе — амплитуда на 30% больше эффективного значения. Когда речь идет об электрических приборах или сети переменного напряжения, то приводят только эффективные токи и напряжения. Иными словами, в сети 220 в амплитуда достигает 310 в; в сети 127 в — около 180 в.

Фаза. Чтобы всякий раз не путаться с тысячными, сотыми или миллионными долями секунды, удобно разбить весь период, независимо от того, сколько он длится, на условные единицы времени — градусы. Весь период делят на 360°. При этом половина периода, естественно, равна 180°, четверть пе-

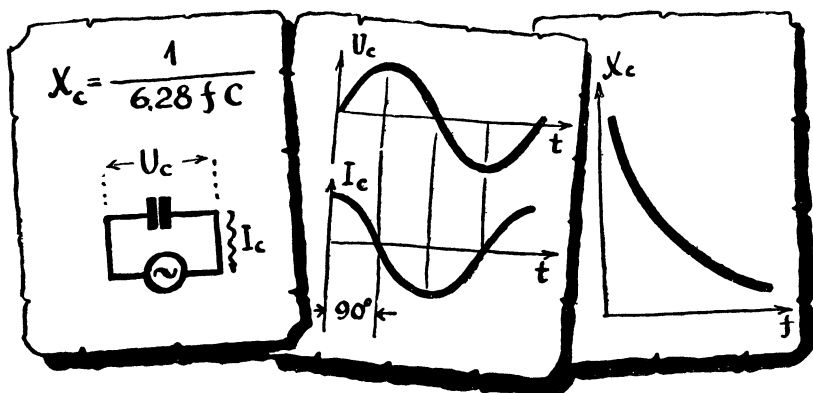
риода — 90° и т. д. Момент времени, соответствующий какому-нибудь определенному мгновенному значению тока (напряжения), называется фазой мгновенного значения. Так, например, на нашем графике A фаза положительной амплитуды — 90° , фаза отрицательной амплитуды — 270° , фазы нулевых значений — 0° , 180° и 360° , фаза помеченного на графике значения I_1 составляет 45° . Точно так же можно было бы отметить фазы и любого другого значения тока и напряжения. Ток и напряжение на этом графике изменяются синфазно — положительные и отрицательные амплитуды наступают у них в одни и те же моменты времени. Но так бывает не всегда.

ВОСПОМИНАНИЕ № 12. СДВИГ ФАЗ. Подключим к общей нагрузке два генератора. Их переменные напряжения могут действовать согласованно (в фазе), а могут действовать



и не согласованно — со сдвигом фаз. В самом страшном случае генераторы просто работают друг против друга. Положительная амплитуда у одного из них появляется на полпериода позже, чем у другого, или, иными словами, напряжения сдвинуты по фазе на 180° . Возможны и другие сдвиги фаз между разными напряжениями, а кроме того, возможен сдвиг между переменным током и создавшим его переменным напряжением.

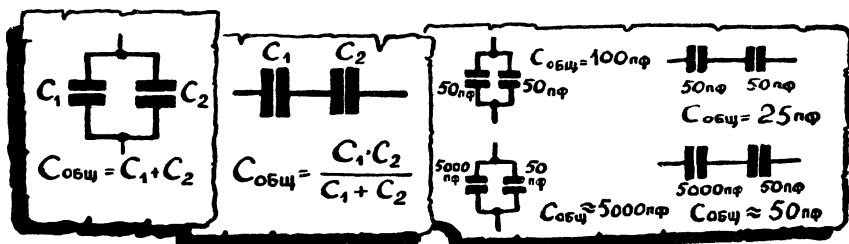
ВОСПОМИНАНИЕ № 13. КОНДЕНСАТОР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Чем быстрее меняется напряжение, тем больше ток через конденсатор, этим и объясняется уменьшение X_C с ростом частоты. Теперь посмотрите на график синусоидального напряжения: быстрее всего оно меняется, когда проходит через ноль, и именно в эти моменты в конденсаторе наблюдается амплитуда тока. Когда напряжение приближается к своей амплитуде, оно растет все медленнее, наконец как бы замирает на миг и начинает уменьшаться.



f	50	50	50	2	20	20	200	2	20	20
	Гц	Гц	Гц	кГц	кГц	кГц	кГц	МГц	МГц	МГц
C	100	5	100	5	5	0,01	0,01	0,01	0,01	100
	мкф	мкф	пф	мкф	мкф	мкф	мкф	мкф	мкф	пф
X_c	32	640	32	16	1,6	800	80	8	0,8	80
	Ом	Ом	Мом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом

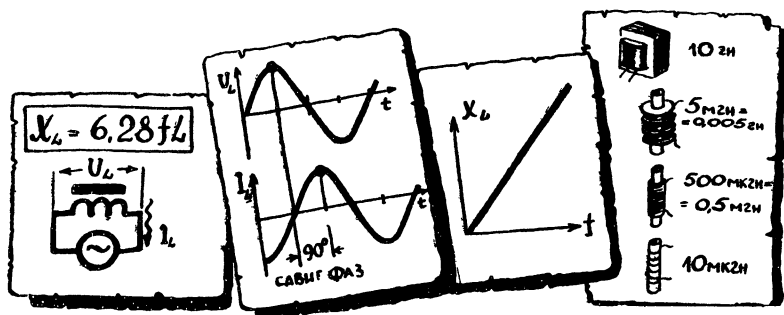
Вот именно во время этого «замирания» ток в цепи становится равным нулю, а затем меняет свое направление. Вывод: **положительная амплитуда тока наступает на четверть периода раньше, чем положительная амплитуда напряжения, то есть ток через конденсатор опережает напряжение на нем на 90°.**

ВОСПОМИНАНИЕ № 14. СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ. При параллельном соединении общая емкость конденсаторов равна сумме емкостей, при последовательном соединении общая емкость меньше наименьшей. Формулы для расчета общей емкости — это те же формулы для подсчета



общего сопротивления (Воспоминания №№ 5 и 6), только «перепутанные»: формула для параллельного соединения R похожа на формулу для последовательного соединения C , а формула для последовательного соединения R — на формулу параллельного соединения C .

ВОСПОМИНАНИЕ № 15. КАТУШКА В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Когда изменяется ток в катушке, то изменяется созданное этим током магнитное поле, и в результате электромагнитной индукции (наведения) катушка сама в себе



наводит электродвижущую силу. Величина этой э. д. с. самоиндукции зависит от скорости изменения тока (а значит, от его частоты), а также от некоторых свойств самой катушки, которые отображены в ее коэффициенте самоиндукции, или, иначе, индуктивности L . Индуктивность L , в частности, тем больше, чем больше витков. Резко увеличивает L сердечник из стали или другого ферромагнитного материала.

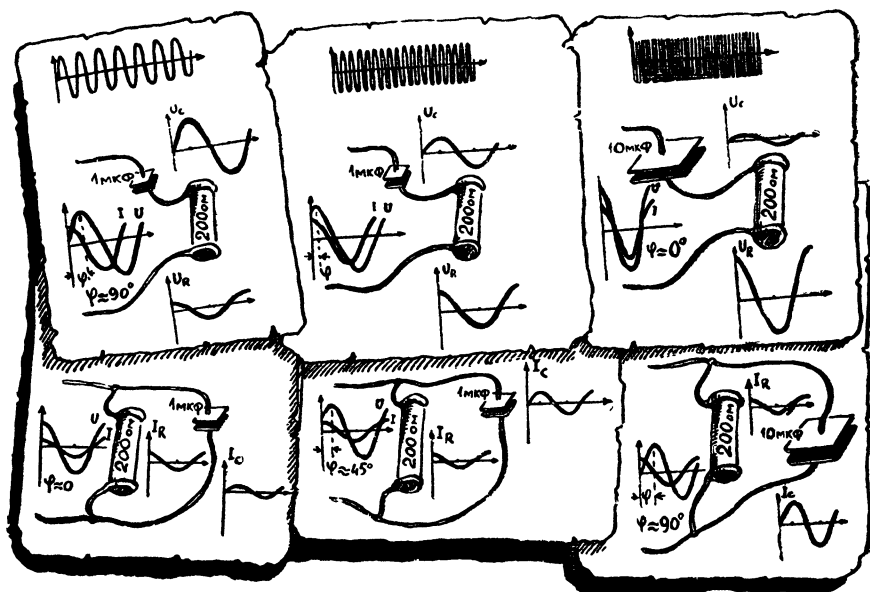
Единица индуктивности — генри ($гн$). Такой индуктивностью обладает катушка, в которой при изменении тока на 1 а за 1 сек наводится э. д. с. 1 в.

Электродвижущая сила самоиндукции всегда препятствует изменению тока: когда ток нарастает, она мешает ему нарастать, когда ток убывает, э. д. с. самоиндукции, наоборот, поддерживает его, затягивает процесс уменьшения тока. Этим самым катушка оказывает переменному току определенное сопротивление. Это так называемое индуктивное сопротивление x_L возрастает с увеличением частоты f (скорости изменения тока) и с ростом самой индуктивности L катушки. Напряжение на катушке и ток через нее также сдвинуты по фазе

на 90° , но, в отличие от конденсатора, ток отстает от напряжения.

Индуктивность катушки, правда, очень приблизительно можно определить по ее внешнему виду.

ВОСПОМИНАНИЕ № 16. СЛОЖНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. Когда в общую цепь одновременно включены и активные элементы (например, резисторы), и реактивные (например, конденсаторы), то в цепи могут возникать самые разные сдвиги фаз между общим током и общим напряже-



нием — от 0 до 90° . Так, например, если конденсатор и резистор соединены последовательно, то через них идет один и тот же ток I . При этом напряжение U_R на резисторе совпадает по фазе с током, а напряжение на конденсаторе U_C , как обычно, отстает от него на 90° . Общее напряжение U на RC -цепочке отстает от тока тем сильнее, чем больше x_C по сравнению с R . А поскольку эти напряжения пропорциональны сопротивлениям x_C и R , то можно сказать, что сдвиг фаз определяется соотношением этих сопротивлений.

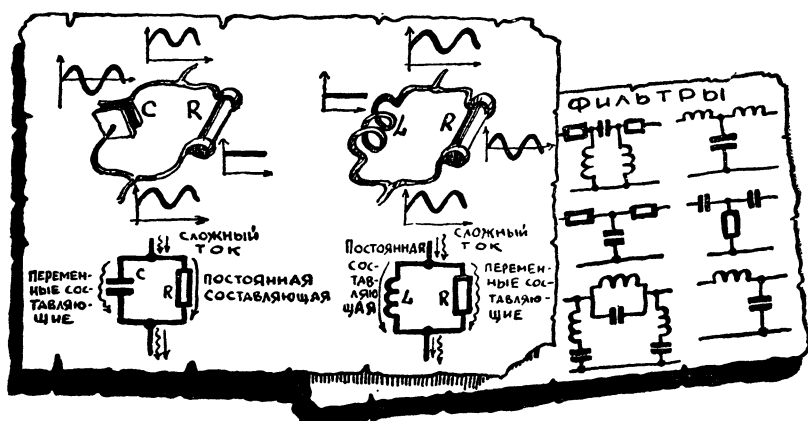
В отличие от последовательного соединения резисторов, общее сопротивление z определяется не как алгебраическая сум-

ма ($z \neq R + x_C$), а как геометрическая сумма ($z = \sqrt{R^2 + x_C^2}$). При последовательном соединении R и C влияние конденсатора возрастает с уменьшением частоты f и его емкости.

При параллельном соединении R и C на обоих этих элементах действует общее напряжение U , ток I_R совпадает с ним по фазе, ток I_C опережает на 90° . Чем больше ток I_C через конденсатор, тем сильнее результирующий сдвиг фаз между U и I . Иными словами, при параллельном соединении R и C влияние конденсатора тем сильнее, чем больше его емкость и чем выше частота.

Аналогично определяется сдвиг фаз и для цепей, содержащих индуктивность L . Но здесь с увеличением частоты и индуктивности влияние катушки при параллельном соединении уменьшается, а при последовательном — растет.

ВОСПОМИНАНИЕ № 17. ФИЛЬТРЫ. Цепи, состоящие из R и C , или R и L , или из всех трех элементов, находят чрезвычайно широкое применение в электронной аппаратуре. Они представляют собой фильтры, которые, обладая разным сопротивлением на разных частотах, позволяют отделить одни составляющие сложного тока от других.

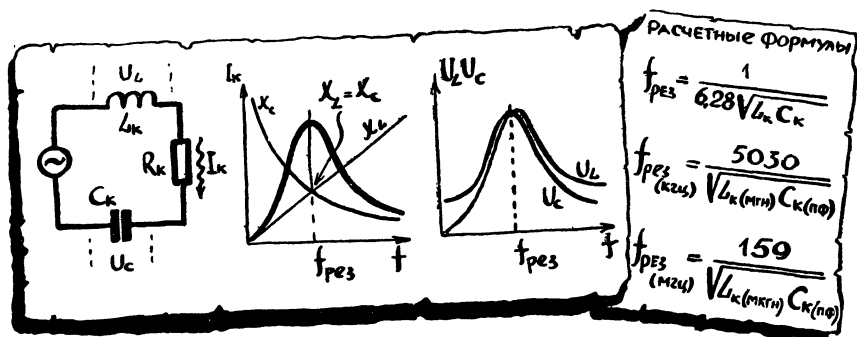


Самый простой и самый популярный — это RC -фильтр. Через его емкостную ветвь, то есть через конденсатор, постоянный ток вообще не проходит, и RC -фильтр используется везде, где нужно отделить переменную составляющую от постоянной. Конденсатор пропускает переменный ток тем лучше, чем выше его частота. Подбором R и C можно добиться того, что

на какой-то определенной частоте (а значит, и на более высоких частотах) большая часть тока — скажем, 90% и более — будет замыкаться через C и лишь 10% через R .

Аналогично по-разному пропускает разные частоты и RL -фильтр. Существует множество более сложных фильтров, которые осуществляют более «строгое» разделение переменных токов разных частот.

ВОСПОМИНАНИЕ № 18. РЕЗОНАНС. Очень интересно ведет себя при изменении частоты цепь, в которую входят и конденсатор C , и катушка L . Напряжения на этих элементах противофазны, так как ток в цепи общий. При этом U_C отстает от тока на 90° , а U_L опережает его, и тоже на 90° . Поэтому можно считать, что сопротивления x_C и x_L действуют друг против друга и общее реактивное сопротивление равно их разности.

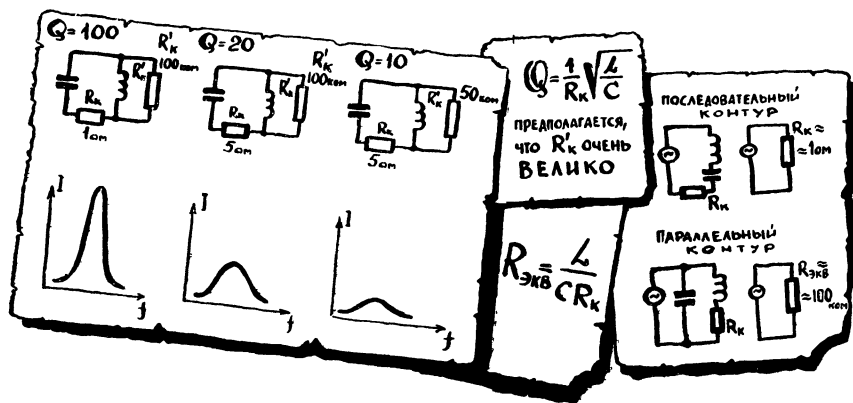


На какой-то частоте — назовем ее резонансной $f_{\text{рез}}$ — емкостное и индуктивное сопротивления окажутся равными. Они скомпенсируют друг друга, в цепи останется только активное сопротивление R_k . Из-за такого резкого уменьшения сопротивления резко возрастет ток, а вместе с ним возрастут напряжения на катушке и на конденсаторе.

Из условия $x_C = x_L$ легко вычислить резонансную частоту $f_{\text{рез}}$. При отходе от резонансной частоты ток в цепи падает, так как общее сопротивление z растет (при увеличении частоты — за счет роста x_L , а при уменьшении частоты — за счет роста x_C). График, показывающий, насколько резко уменьшаются ток в цепи и напряжение на L и C при отходе от резонансной частоты, называется резонансной кривой. На резо-

нансной частоте «с точки зрения» генератора сопротивление последовательного контура равно R_k (обычно единицы ом), а параллельного контура — $R_{экв}$ (обычно десятки килоом).

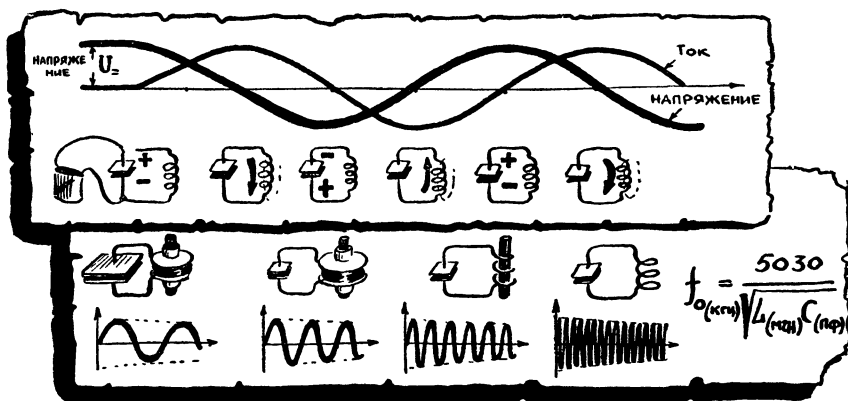
ВОСПОМИНАНИЕ № 19. ДОБРОТНОСТЬ. Увеличение тока при резонансе будет тем более резким, чем меньше активное сопротивление в сравнении с реактивным сопротивлением x_L и x_C . Величина, показывающая отношение $\frac{x_L}{R_k}$ (или $\frac{x_C}{R_k}$), называется добротностью Q . Добротность иногда называют множителем вольтжа, так как она показывает, во сколько раз



напряжение на катушке и на конденсаторе во время резонанса превышает напряжение на активном сопротивлении. Из отношения $\frac{x_L}{R_k}$ легко вывести, что добротность тем выше, чем

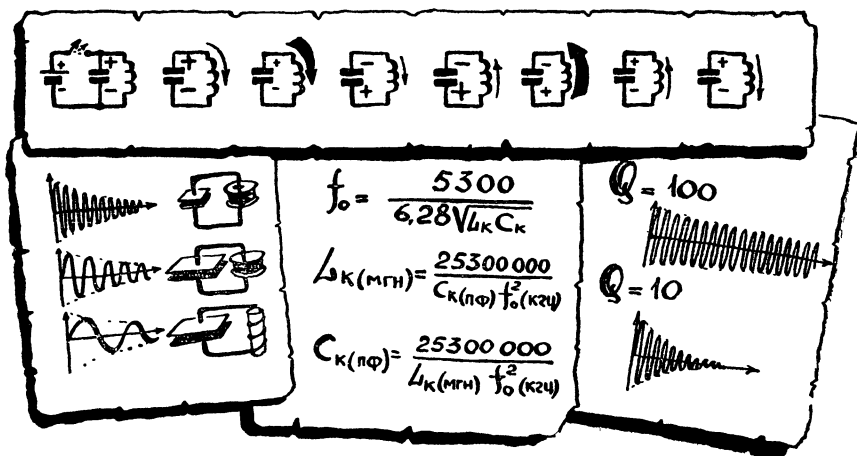
больше соотношение $\frac{L}{C}$. Увеличение R_k всегда приводит к ухудшению добротности, а значит, к снижению резонансного тока, а также напряжения на катушке и конденсаторе и к притуплению резонансной кривой. Ухудшить добротность можно еще и иначе: подключив параллельно конденсатору (катушке) шунтирующее сопротивление. В данном случае все наоборот: чем меньше это шунтирующее сопротивление, тем сильнее «задавлен» контур, тем хуже его добротность.

ВОСПОМИНАНИЕ № 20. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР. Явление резонанса, и, конечно, само название «резонанс», станет более понятным, если вспомнить, что цепь из конденсатора и катушки называется колебательным контуром, что в таком



контуре возникают собственные электромагнитные колебания всякий раз, когда мы передаем в него некоторое количество энергии (например, заряжаем конденсатор).

«Возникают колебания» означает, что конденсатор непрерывно обменивается энергией с катушкой — энергия электрического поля периодически переходит в энергию магнитного поля. Затем происходит обратный переход, и все повторяется сначала. При этом в цепи протекает переменный ток, частота которого зависит от индуктивности L и емкости C , подобно тому как частота собственных колебаний струны зависит от ее массы и натяжения.

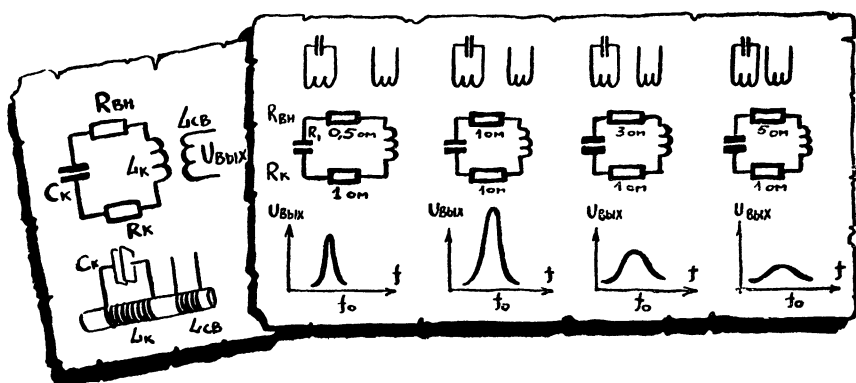


Частота собственных колебаний f_0 контура равна его резонансной частоте $f_{\text{рез}}$, и в этом заключен глубокий смысл. Резонанс наступает именно тогда, когда контур резонирует на частоту генератора, когда генератор действует в такт с собственными колебаниями в контуре.

Собственные колебания в контуре, если их не поддерживать, постепенно затухают, причем тем быстрее, чем больше потери энергии, чем ниже добротность Q контура.

Изменяя индуктивность и емкость контура, можно довольно просто менять частоту собственных колебаний и таким образом настраивать контур в резонанс на разные частоты. Так осуществляется настройка приемника на разные станции: переключением катушек переходят с одного диапазона на другой, а плавным изменением емкости производят настройку в пределах диапазона.

ВОСПОМИНАНИЕ № 21. ВНОСИМОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. С помощью вспомогательной катушки связи $L_{\text{св}}$ можно отобрать из контура часть энергии и передать «для дальнейшего прохождения службы». На первый взгляд кажется, что чем ближе сдвинуты катушки L_K и $L_{\text{св}}$, чем сильнее они свя-



заны общим магнитным полем, тем больше энергии мы получим от контура, тем больше будет напряжение $U_{\text{вых}}$. В действительности же усиление связи между L_K и $L_{\text{св}}$ может дать и обратный эффект: после некоторого «рубежа» дальнейшее сближение катушек приводит к уменьшению $U_{\text{вых}}$. Это связано с тем, что, отбирая у контура энергию, мы как бы вносим в него сопротивление $R_{\text{вн}}$.

Пока связь не очень сильная, это вносимое сопротивление играет второстепенную роль. Но по мере усиления связи роль эта становится все более значительной. Наконец дело доходит до того, что, сближая катушки, мы больше проигрываем от увеличения $R_{\text{вн}}$, чем выигрываем от увеличения доли получаемой из контура энергии.

При усилении связи во всех случаях ухудшается добротность контура и притупляется его резонансная кривая. Кроме того, несколько изменяется частота собственных колебаний f_0 (а значит, и резонансная частота), так как отбор энергии приводит к некоторому дополнительному сдвигу фаз между контурным током и напряжением. А это равносильно внесению в контур дополнительной емкости или индуктивности.

Главное, что нужно помнить, углубляясь в Воспоминания,— это то, что их нужно хоть когда-нибудь закончить. Сейчас, по-видимому, и для нас настало время закончить путешествие по прекрасному прошлому и двинуться в не менее прекрасное будущее. А это будущее прежде всего предстанет перед нами в виде самого сложного и в то же время, пожалуй, самого важного этапа на пути к транзисторным схемам. Нам предстоит научиться строить и анализировать входные и выходные характеристики транзистора. И тот, кто преодолеет этот участок пути (пусть даже не сразу), может смело считать, что главные трудности (и главные неприятности!) нашего путешествия уже позади.

РИСУНКИ НА ВЕКА

Есть серьезные основания считать, что история человеческой культуры, история науки и искусства берет свое начало еще с того времени, когда люди жили в пещерах и с каменными топорами охотились на мамонтов. Может быть, именно тогда и появились первые ученые и художники — люди, которые пытались составить описание окружающего их мира. Конечно же, этот мир они описывали не словами: в те времена человек не то что азбуки не знал, но и разговаривать толком не умел. В его лексиконе были лишь считанные слова, больше похожие на крики животного, чем на разумную речь. Первые описания окружающего мира человек сделал в виде рисунков на стенах своей пещеры.

С тех пор прошли многие тысячелетия... Навсегда исчезли с лица земли мамонты, навсегда заброшены каменные топоры. Из неудобных и сырых пещер человек переселился в много-

этажные дома с горячим водоснабжением, а вместо звериных шкур стал носить нейлоновые рубашки. Он сочинил Большую энциклопедию, научился писать стихи, снимать любительские фильмы и легко выводить километровые формулы. Но, несмотря на все эти великие достижения, человек не забыл о самом древнем способе описания мира — не забыл о рисунке.

Сколько бы мы ни шутили по этому поводу, столь прочная привязанность к многочисленному семейству рисунка — к чертежам, графикам, карикатурам, картам, планам — связана со сложными и тонкими механизмами нашего мозга. Во многих случаях мозг воспринимает графические описания намного легче и быстрее, чем словесные. Во многих случаях даже очень простой рисунок нельзя заменить пространным описанием, содержащим многие тысячи слов. К числу таких содержательных рисунков наверняка можно отнести и характеристики полупроводникового триода, которые нам сейчас предстоит построить и которые мы сохраним если не на века, то, во всяком случае, на все время знакомства с транзисторными усилителями.

Характеристики транзистора в принципе строятся так же, как и характеристики диода (рис. 19). Но только у диода нам пришлось строить одну характеристику — вольтамперную, на которой отобразилось изменение одного тока под действием одного напряжения. Для того чтобы описать поведение транзистора, придется построить несколько характеристик. Они покажут изменение разных протекающих в транзисторе токов под действием разных приложенных к нему напряжений.

Начнем с входной характеристики. Она показывает, как меняется эмиттерный ток I_e при изменении напряжения, приложенного к эмиттерному *pn*-переходу, то есть при изменении напряжения $U_{эб}$ между эмиттером и базой (рис. 54, А). Эта характеристика почти ничем не отличается от прямой ветви вольтамперной характеристики диода, так как эмиттерный переход — это, по сути дела, и есть диод, включенный в прямом направлении.

У входной характеристики есть и обратная ветвь, соответствующая положительному (запирающему) напряжению на базе. Но эта ветвь нас не интересует, и мы вообще не будем обращать на нее внимания. Мы не будем учитывать влияния коллекторного напряжения $U_{кк}$ на эмиттерный ток. Здесь мы, правда, несколько погрешим против истины, так как напряжение $U_{кк}$ все же влияет на эмиттерный ток. И об этом, в частности, говорит пунктирная линия — характеристика, которая получается при $U_{кк}=10$ в.

Сразу же признаемся, что на входной характеристике, так же как и на характеристиках, с которыми нам еще предстоит познакомиться, есть и ряд других неточностей, ряд других упрощений. На них пришлось пойти лишь только для того, чтобы наиболее важные «черты характера» полупроводникового триода не потонули в океане второстепенных подробностей.

Под действием напряжения $U_{эб}$ меняется эмиттерный ток $I_э$, а значит, коллекторный ток $I_к$ и напряжение на нагрузке $U_н$. Одновременно вслед за изменением $U_{эб}$ меняется и ток базы $I_б$, представляющий собой небольшое ответвление эмиттерного тока (рис. 35). Поэтому вслед за входной характеристикой, показывающей зависимость $I_э$ от $U_{эб}$, нужно построить и несколько ее двойников — несколько характеристик, показывающих, как меняется $I_к$, $I_б$ и $U_н$ при изменении первопричины всех событий — напряжения $U_{эб}$. Пользуясь этой группой характеристик, можно определить ряд важных параметров тран-

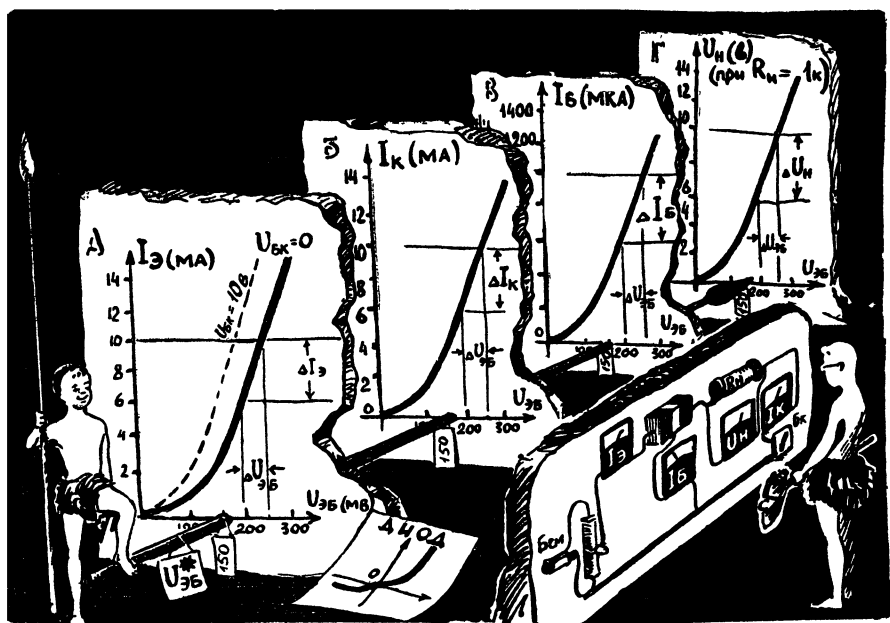


Рис. 54. Входная характеристика транзистора показывает, как меняется входной ток (ток эмиттера) при изменении управляющего напряжения (напряжение между базой и эмиттером).

зистора, а также сформулировать полезные рекомендации по подбору его режима.

Характеристики, приведенные на рис. 54, хотя и не относятся к какому-либо определенному типу транзистора, но по значениям токов и напряжений весьма близки к характеристикам многих транзисторов небольшой мощности. Поэтому и параметры, которые мы определим, в известной степени будут близки к параметрам реальных транзисторов.

Прежде всего отметим прямолинейный участок на входной характеристике: он начинается от напряжения $U_{э}^* = 150$ мв. Именно начиная с этого напряжения практически соблюдается прямая пропорциональная зависимость между напряжением $U_{эб}$ и током $I_{э}$ (увеличим напряжение в два раза, и ток вырастет в те же два раза), и поэтому входная характеристика начиная с $U_{эб}^* = 150$ мв представляет собой почти прямую линию.

При напряжениях меньших чем 150 мв зависимость эта носит сложный характер, и, уж во всяком случае, она не похожа на прямую пропорциональную зависимость. Участок от 0 до $U_{эб}^* = 150$ мв называется нелинейным участком или, проще, загибом. О причинах появления этого загиба уже шла речь, когда мы познакомились с диодом. Во многих случаях режим транзистора нужно выбирать так, чтобы входное напряжение всегда было больше $U_{эб}^*$, то есть не попадало бы в район загиба характеристики. Подробно об этом ограничении будет рассказано чуть позже (стр. 184), а сейчас лишь отметим, что работа в области загиба приводит к искажениям формы сигнала (рис. 55).

В качестве следующего шага определим входное сопротивление транзистора, то есть сопротивление, которое встречает со стороны транзистора ток, идущий от источника слабого сигнала.

Поскольку входная цепь транзистора представляет собой диод, включенный в прямом направлении, то можно сразу сказать, что его входное сопротивление $R_{вх}$ будет небольшим. Определить величину этого сопротивления можно следующим образом: нужно на время вообще забыть о существовании транзистора и предположить, что источник слабого сигнала подключен к некоторому условному резистору $R_{вх}$ (рис. 56). Если известны ток и напряжение в цепи резистора, то его сопротивление нетрудно подсчитать по одной из формул все того же закона Ома, а именно $R = U : I$.

Казалось бы, что для подсчета величины $R_{вх}$ нужно подставить в эту расчетную формулу любое из возможных

значений напряжения $U_{эб}$ и соответствующий этому напряжению ток $I_{э}$. Однако подобным образом можно найти лишь входное сопротивление для постоянного тока $R_{вх=}$. Да и то для разных напряжений $U_{эб}$ это сопротивление будет различным.

Пользуясь характеристикой (рис. 54), примерно определим, что при $U_{эб} = 50$ мв эмиттерный ток равен $I_{э} = 0,2$ ма, а значит, $R_{вх=} = 50$ мв : $0,2$ ма = 250 ом. Тем же способом найдем, что при $U_{эб} = 150$ мв входное сопротивление $R_{вх=} = 75$ ом, а для $U_{эб} = 250$ мв найдем $R_{вх=} = 25$ ом. Разными входные сопротивления получаются все из-за того же загиба на характеристике, так как в районе загиба ток растет намного медленней, чем на прямолинейном участке.

Научившись определять входное сопротивление для постоянного тока, мы отнюдь не решили поставленной задачи: ведь нам нужно определить сопротивление, с которым встретится источник сигнала, а он, конечно, дает переменный ток. Каким же образом можно найти входное сопротивление $R_{вх}$ для переменного тока? Для этого нужно посмотреть, как меняется ток $I_{э}$ при изменении напряжения $U_{эб}$. Давайте вытащим на свет уже знакомые нам «дельты» (стр. 87) и будем учитывать не статические, не мертвые токи и напряжения, а их изменения.

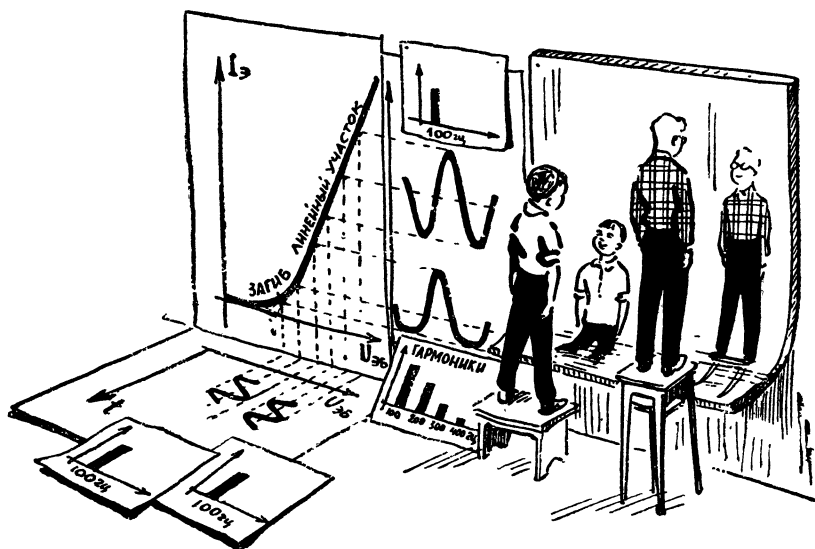


Рис. 55. Если сигнал попадает в область загиба входной характеристики, то искажается форма этого сигнала.

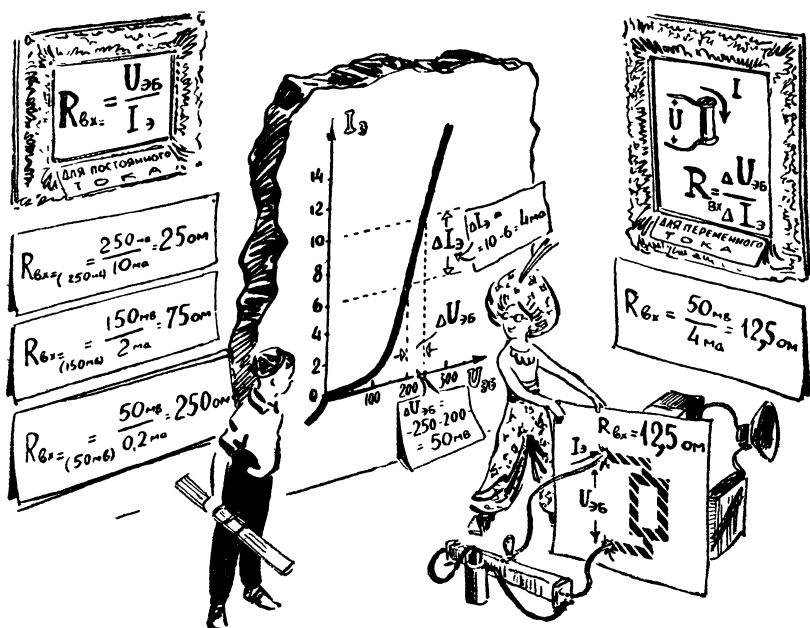


Рис. 56. Соотношение между управляющим напряжением и входным током можно характеризовать величиной входного сопротивления. Нужно различать входное сопротивление для постоянного и переменного (меняющегося) тока.

Поскольку чаще всего используется прямолинейный участок входной характеристики, то определим величину $R_{вх}$ именно для этого участка. Зададимся каким-либо определенным изменением входного напряжения ΔU_{36} , найдем соответствующее ему изменение тока ΔI_3 , а затем, пустив в ход все тот же закон Ома, получим $R_{вх} = \Delta U_{36} : \Delta I_3$. Это $R_{вх}$ как раз и есть то самое входное сопротивление, которое оказывает входная цепь транзистора изменяющемуся току, и называется оно динамическим входным сопротивлением.

На рис. 56 показан пример определения величины $R_{вх}$. Определив ток I_3 при напряжениях U_{36} , равных 200 мв и 250 мв, подсчитав $\Delta U_{36} = 250 \text{ мв} - 200 \text{ мв} = 50 \text{ мв}$ и соответствующее ему $\Delta I_3 = 10 \text{ ма} - 6 \text{ ма} = 4 \text{ ма}$, находим, что входное сопротивление транзистора в нашей схеме равно 12,5 ом. Это очень небольшая величина, но ничего иного мы, собственно говоря, и не ожидали от открытого диода. Несколько забегаая вперед, заметим, что малое входное сопротивление доставит нам

немало хлопот и явится одной из причин, ограничивающих применение схемы, которую мы сейчас исследуем.

Следующее, что нам нужно было бы сделать, это определить коэффициенты усиления по току κ_I , по напряжению κ_U и по мощности κ_P .

Коэффициент усиления во всех случаях показывает, во сколько раз та или иная величина — ток, напряжение или мощность — на выходе усилителя больше, чем на входе.

С коэффициентом усиления по току мы уже встречались. В свое время (рис. 35) мы обозначали его греческой буквой α . Разница между коэффициентами α и κ_I лишь в том, что первый относится к самому транзистору, а второй — к транзистору, включенному в определенный усилительный каскад с определенной нагрузкой. В нашей схеме нагрузка очень слабо влияет на изменение токов I_B и I_K , а поэтому можно считать, что α и κ_I — это одно и то же. Попутно еще раз заметим, что коэффициент α назван коэффициентом усиления незаконно, так как в нашей схеме усиления по току не происходит — коллекторный ток I_K всегда несколько меньше эмиттерного I_B , и поэтому $\alpha < 1$.

Для того чтобы определить α , можно воспользоваться одновременно двумя приведенными на нашем графике характеристиками (рис. 54—*A* и *B*), одна из которых показывает зависимость I_B от U_{B6} , а другая — зависимость I_K от U_{B6} . У нашего подопытного транзистора при увеличении U_{B6} на 50 мв эмиттерный ток возрастает на 4 ма, коллекторный — лишь на 3,6 ма, так как одновременно на 400 мка (то есть на 0,4 ма) увеличивается ток базы. Отсюда легко найти, что $\alpha = 0,9$. Это довольно низкая величина: как правило, у транзисторов α лежит в пределах 0,96—0,99.

Коэффициент усиления по напряжению κ_U зависит от того, какое сопротивление нагрузки R_H включено в коллекторную цепь. Поэтому сам коэффициент κ_U , в отличие от α , не является параметром транзистора и характеризует усилительный каскад в целом. В нашем примере в коллекторную цепь включен резистор $R_H = 1$ ком, и при изменении коллекторного тока от 6 до 10 ма, то есть всего на 4 ма, напряжение на этом резисторе меняется от 6 до 10 в, то есть всего на 4 в ($\Delta U_H = \Delta I_K R_H$). Иными словами, при изменении входного напряжения U_{B6} на 50 мв (и именно при таком изменении ток I_K меняется примерно на 4 ма) выходное напряжение U_H меняется на 4 в. А это значит, что напряжение усиливается в восемьдесят раз. Такая величина вполне реальна для нашей схемы, хотя эта схема позволяет получить значительно более высокое усиление по напряжению, вплоть до нескольких сотен раз.

Коэффициент усиления по мощности k_p равен произведению коэффициентов усиления по току α и по напряжению k_u . И это вполне понятно: мощность в равной степени зависит от тока и напряжения, и, увеличив, например, в два раза ток и в два раза напряжение, мы увеличиваем мощность в четыре раза. Поскольку коэффициент усиления по току α очень близок к единице, можно считать, что усиление по мощности примерно такое же, как и усиление по напряжению ($k_u \approx k_p$).

Казалось бы, что можно как угодно увеличить усиление по напряжению k_u , а вместе с ним и усиление по мощности k_p , увеличивая сопротивление нагрузки R_n . Однако в действительности здесь, конечно, существуют ограничения. (Иначе зачем было бы строить многокаскадные усилители — включая побольше сопротивление нагрузки и получай от одного каскада все необходимое усиление!) Об одном из таких ограничений мы уже говорили: чем больше R_n , тем большая часть питающего напряжения на нем теряется (рис. 38). Другое ограничение можно будет понять, познакомившись с выходной характеристикой транзистора.

Выходная характеристика транзистора (рис. 57) показывает, как меняется коллекторный ток I_k при изменении напряжения $U_{бк}$ между базой и коллектором. Обычно на одном графике размещают целое семейство выходных характеристик — несколько кривых, каждая из которых снята при «своем» неизменном входном напряжении $U_{аб}$. Вот как снимают такое семейство характеристик. Установив, например, $U_{аб} = 150$ мВ, поддерживают его неизменным и постепенно, от нуля увеличивая $U_{бк}$ отмечают на графике, как меняется ток I_k . Затем устанавливают другое входное напряжение $U_{аб}$, например 175 мВ, и вновь, начав от нуля, меняют $U_{бк}$ и регистрируют I_k . Точно так же снимают характеристики и при других значениях $U_{аб}$.

Что же можно увидеть, всматриваясь в семейство выходных характеристик транзистора? Прежде всего эти характеристики позволяют судить о том, что происходит в коллекторной цепи при работе усилительного каскада, то есть когда одновременно меняется и входное напряжение, и напряжение на коллекторе. (Напряжение на коллекторе меняется потому, что под действием сигнала в итоге меняется напряжение на нагрузке: чем больше напряжение на нагрузке, тем меньше оно на самом коллекторе.)

Кроме того, выходные характеристики позволяют определить, как влияют на режим транзистора напряжение источника питания, напряжение, действующее во входной цепи $U_{аб}$,

и само сопротивление нагрузки R_n . Наконец, семейство выходных характеристик позволяет разумно выбрать режим транзисторного усилителя, а также определить один из основных его параметров — выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$. С определения этого параметра мы, пожалуй, и начнем (рис. 58).

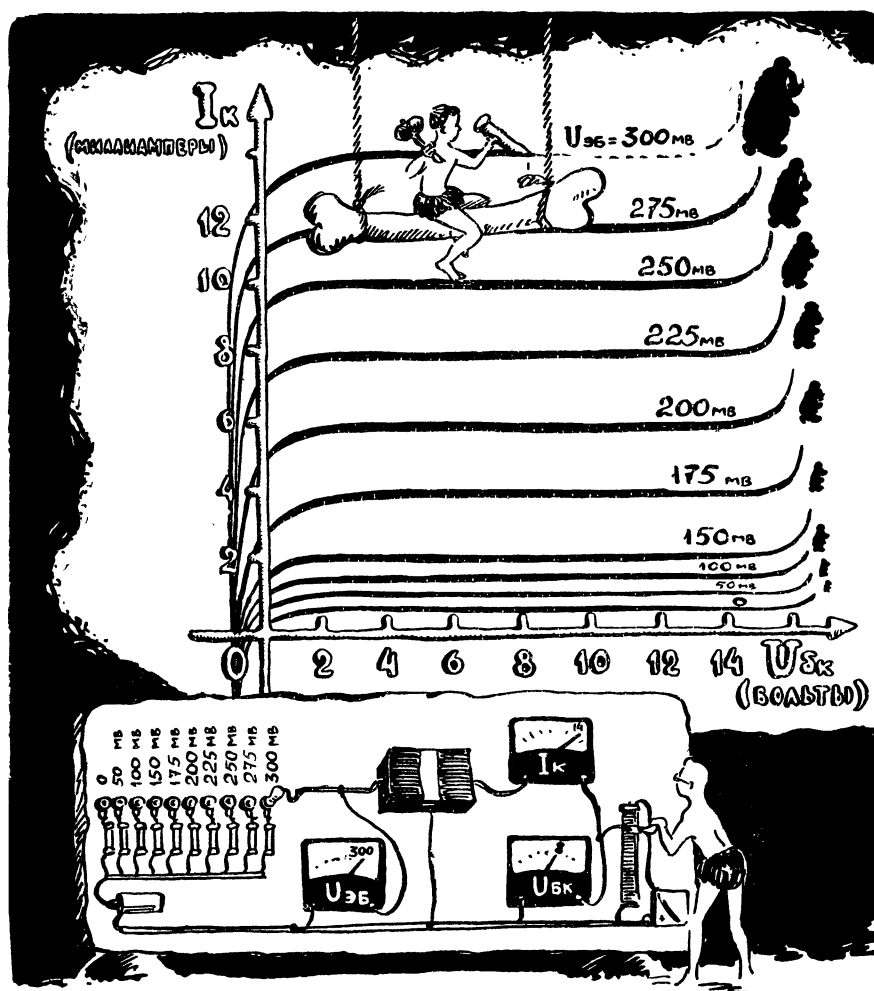


Рис. 57. Семейство выходных характеристик транзистора показывает, как меняется коллекторный ток при изменении коллекторного напряжения и при различных напряжениях на базе.

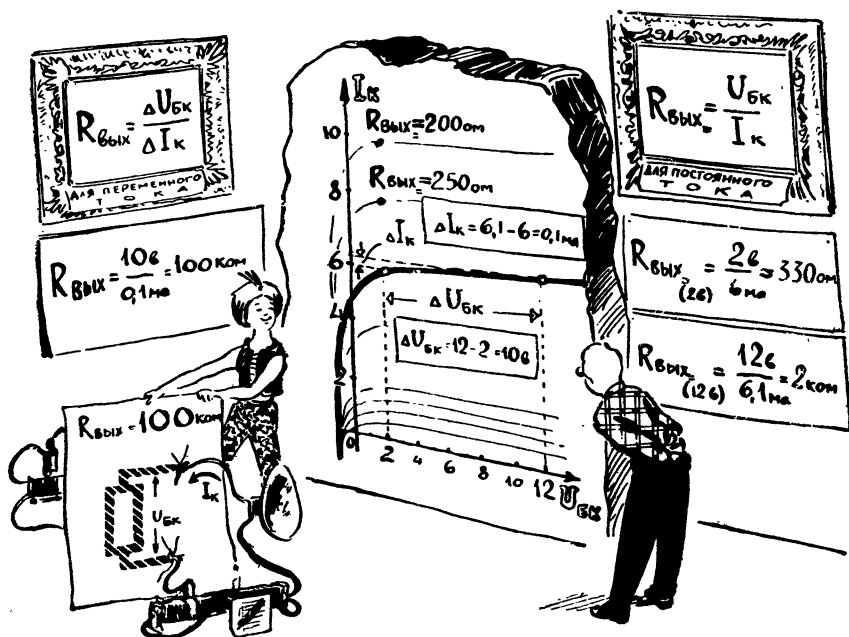


Рис. 58. Соотношение между выходным напряжением и выходным током можно характеризовать величиной выходного сопротивления; нужно различать выходное сопротивление для постоянного и переменного (меняющегося) тока.

Когда решается вопрос о выборе нагрузки для транзисторного усилителя, то прежде всего нужно знать, куда эта нагрузка попадет — каково сопротивление цепи, в которую нагрузка будет включена.

Именно сопротивление усилителя «со стороны нагрузки», сопротивление, с которым встретится нагрузка, попав в усилительный каскад, и называется выходным сопротивлением $R_{вых}$ усилителя. В нашей схеме (мы не случайно все время подчеркиваем «в нашей схеме» — в других схемах все может быть по-другому, и вы в этом скоро убедитесь) нагрузка включается в коллекторную цепь. И выходное сопротивление $R_{вых}$ — это внутреннее сопротивление самого транзистора от вывода коллектора до вывода базы. Сопротивлением источника питания, который также входит в коллекторную цепь, можно пренебречь — оно очень мало, а при последовательном соединении главную роль играет большое сопротивление, в данном

случае — сопротивление коллекторного *pn*-перехода (Воспоминание № 5).

В общих чертах можно сразу сказать, что выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ в нашей схеме будет весьма большим, так как коллекторный переход — это, по сути дела, диод, включенный в обратном направлении. Подсчитать величину $R_{\text{вых}}$ можно, пользуясь одной из выходных характеристик транзистора. На рис. 58 для этого используется выходная характеристика (зависимость I_K от U_{BK}), снятая при $U_{\text{аб}} = 200$ мв.

Давайте для начала, не обращая внимания на то, что происходит в самом транзисторе, поступим с ним так же, как поступали в свое время при определении входного сопротивления (рис. 56). Давайте заменим весь полупроводниковый триод одним резистором $R_{\text{вых}}$ и будем считать, что именно к нему подключается нагрузка.

Выходное сопротивление для постоянного тока $R_{\text{вых}} =$ определяется просто: постоянное напряжение на коллекторе U_{BK} нужно разделить на постоянный коллекторный ток I_K . Выходное сопротивление $R_{\text{вых}} =$ очень сильно зависит от режима входной цепи, от управляющего напряжения $U_{\text{аб}}$. Когда транзистор заперт, когда нет тока в его коллекторной цепи, то $R_{\text{вых}} =$, естественно, бесконечно велико.

«Плюс» на базе ничего не меняет, так как триод продолжает оставаться закрытым. Зато с появлением на базе «минуса» появляется коллекторный ток I_K и сопротивление $R_{\text{вых}} =$ резко уменьшается. Чем больше «минус» на базе, тем больше I_K , тем, следовательно, меньше $R_{\text{вых}} =$. Выходное сопротивление для постоянного тока может быть очень небольшим, вплоть до нескольких омов и даже долей ома. Совсем другие величины характеризуют выходное сопротивление для переменного тока.

Динамическое сопротивление $R_{\text{вых}}$ будем определять так же, как определяли и динамическое входное сопротивление: изменим коллекторное напряжение на величину ΔU_{BK} , посмотрим, на какую величину ΔI_K при этом изменится коллекторный ток, а затем найдем $R_{\text{вых}}$ по формуле закона Ома: $R_{\text{вых}} = \Delta U_{BK} : \Delta I_K$. У транзистора, характеристика которого приведена на рис. 57 и 58, выходное сопротивление оказалось равным 100 ком. В действительности же для нашей схемы величина $R_{\text{вых}}$ может оказаться значительно больше, иногда достигая даже нескольких мегом.

То, что $R_{\text{вых}}$ должно быть очень большим, видно по самой выходной характеристике: почти на всем протяжении она представляет собой слегка наклоненную прямую линию. Небольшой наклон характеристики говорит о том, что при изме-

нении $U_{\text{бк}}$ ток $I_{\text{к}}$ меняется очень мало, а это как раз и свидетельствует о большом сопротивлении цепи.

Каждая выходная характеристика из нашего семейства, в частности характеристика, снятая при входном напряжении $U_{\text{аб}} = 200 \text{ мВ}$, по сути дела, представляет собой обратную ветвь вольтамперной характеристики полупроводникового диода (рис. 19). И это вполне понятно: ведь коллекторный переход — это не что иное, как полупроводниковый диод, включенный в обратном направлении. Не стоит придавать значения тому, что выходная характеристика транзистора в сравнении с характеристикой диода оказывается перевернутой «вверх ногами». Характеристика перевернута только потому, что «ее так повесили», только потому, что нам так удобней на нее смотреть. Только поэтому коллекторный ток, который является обратным током «коллекторного диода», растет не вниз от нуля, а вверх, и только поэтому «минус» напряжения на коллекторе мы откладываем не влево от нуля, а вправо.

Выходная характеристика транзистора похожа на вольтамперную характеристику диода «во всех подробностях». При небольших напряжениях на выходной характеристике имеются загибы, а при больших напряжениях ток $I_{\text{к}}$ резко возрастает. Это начинается электрический пробой, вслед за которым, как мы уже знаем, произойдет тепловой пробой, и транзистор выйдет из строя. Таким образом, можно сразу же сделать некоторые рекомендации по поводу рабочего режима транзистора: напряжение на коллекторе никогда не должно заходить в область левого загиба, так как в этой области происходит искажение формы сигнала (подобно тому, как искажается сигнал на загибах входной характеристики; рис. 55). С другой стороны, напряжение на коллекторе не должно заходить в область правого загиба, то есть не должно заходить в область пробоя. На деле, выбирая режим транзисторного усилителя, приходится вводить еще более строгие ограничения.

На семействе выходных характеристик транзистора нужно отметить несколько запретных зон (рис. 59). Это говорит о том, что коллекторный ток и коллекторное напряжение не должны быть ни слишком большими, ни слишком малыми, что они могут изменяться не как угодно, а лишь в определенных пределах — в пределах не заштрихованной на рисунке рабочей зоны. Чем же определяются границы этой рабочей области? Чем определяется тот набор токов и напряжений, при которых режим коллекторной цепи не попадает в опасные запретные зоны?

Левая граница рабочей области нам уже известна — за ней находится запретная зона загибов, загнутых участков харак-

теристик. Попадание в эту запретную зону приводит к искажению формы сигнала. Чтобы не попадать в зону искажений, не нужно допускать, чтобы напряжение на коллекторе становилось меньше чем $U_{\text{бк}}^*$.

Правая граница рабочей области — это изогнутая линия с надписью «Не входить — пробой!». Переход этой границы влечет за собой прямо-таки смертельную опасность, так как приводит в запретную зону, где коллекторному $p\text{-}n$ -переходу транзистора грозит тепловой пробой. Еще знакомясь с диодами, мы установили, что $p\text{-}n$ -переход может выйти из строя,

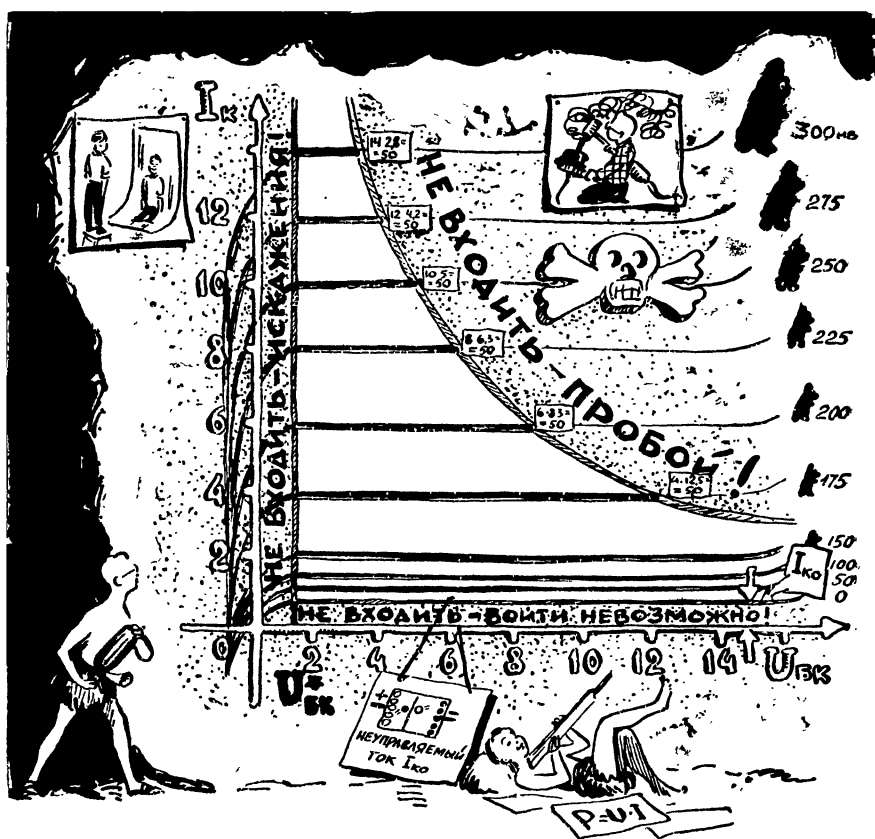


Рис. 59. На выходной характеристике можно отметить запрещенные области, то есть такие значения коллекторного тока и напряжения, которые по каким-либо причинам не должны (или не могут) появляться.

если превысить некоторую величину подводимой к нему мощности. Эта мощность — мы назвали ее допустимой мощностью, — как всегда, равна произведению тока на напряжение (Воспоминание № 4). У диода ей соответствует вполне определенное значение обратного тока и обратного напряжения.

У транзистора дело обстоит иначе: при одном и том же напряжении на коллекторе ток через *pn*-переход, то есть коллекторный ток, может иметь разную величину. Все зависит от числа зарядов, впрыскиваемых в этот переход из базы, то есть в итоге все зависит от управляющего напряжения $U_{эб}$. Вот почему одному и тому же значению допустимой мощности — у нас она равна 50 мвт — соответствуют разные комбинации коллекторного тока I_k и коллекторного напряжения $U_{бк}$. При небольшом коллекторном токе I_k можно допустить сравнительно высокое коллекторное напряжение $U_{бк}$, а при увеличении тока I_k напряжение $U_{бк}$ должно быть поменьше. Вычислив допустимое напряжение на коллекторе для разных управляющих напряжений $U_{эб}$ (а значит, для разных коллекторных токов), мы как раз и получим изогнутую пограничную линию, переступать которую нельзя «под страхом смерти».

И, наконец, еще одно, третье ограничение: коллекторный ток не должен быть меньше некоторой величины $I_{ко}$. Здесь, правда, мы выразились не совсем точно — коллекторный ток не то что не должен переступать границу $I_{ко}$, а он просто не может перейти эту границу. Запретная зона, которая лежит ниже линии $I_{ко}$, отличается от двух предыдущих запретных зон именно тем, что в нее просто невозможно попасть.

Действительно, допустив ошибку в выборе режима, вы можете уйти из рабочей области влево и сделать сигнал жертвой загиба. Вы можете нечаянно (например, повысив напряжение $U_{бк}$) уйти из рабочей области вправо и увидеть, как мощность, выделяемая на коллекторном переходе, в какие-то моменты становится больше допустимой (это, правда, будут не моменты, а всего один момент — транзистору достаточно один раз ненадолго перейти границу допустимой мощности, чтобы он уже навсегда перестал быть транзистором). А вот перейти нижнюю границу рабочей области даже при желании невозможно — коллекторный ток никаким разумным способом нельзя сделать меньше, чем $I_{ко}$. Именно поэтому ток $I_{ко}$ называют неуправляемым коллекторным током.

Как ни мал этот ток (он обычно в тысячи раз меньше средней величины I_k), а его влияние на работу транзистора огромно. Именно поэтому мы несколько подробнее остановимся на происхождении неуправляемого тока $I_{ко}$ и на той роли, которую он играет в транзисторном усилителе.

Вернемся к тем далеким временам, когда мы только научились создавать полупроводниковые кристаллы с разным типом проводимости, вводя в них донорные или акцепторные примеси (рис. 15). При введении донорной примеси в кристалле появлялись свободные электроны, и он становился полупроводником типа n , а при введении акцепторной примеси в кристалле появлялись свободные дырки, и он становился полупроводником типа p . Но еще до введения примеси в полупроводнике были свои собственные свободные заряды, причем в равном количестве и электроны и дырки. Эти собственные заряды, благодаря которым полупроводник обладал небольшой собственной проводимостью, появлялись потому, что в некотором количестве атомов, скажем, в одном атоме из нескольких миллионов, под действием тепловой энергии нарушалась связь одного из внешних электронов с ядром. Электрон уходил в межатомное пространство (отрицательный свободный заряд) и оставлял свой атом с одним свободным для других электронов местом, то есть с дыркой (положительный свободный заряд).

После введения примеси судьба собственных свободных зарядов оказывалась различной. Если, например, в полупроводник вводилась донорная примесь и в нем появлялось большое количество примесных электронов, то собственные электроны как бы присоединялись к ним и практически терялись на их фоне: ведь примесных зарядов всегда во много раз больше, чем собственных. Но в таком полупроводнике n -типа оставались еще собственные дырки — очень небольшое количество дырок в сравнении с огромным количеством свободных электронов. Учитывая эту разницу в количестве, свободные электроны в полупроводнике n -типа мы называли основными зарядами или основными носителями заряда, а собственные дырки — неосновными зарядами, неосновными носителями. Аналогично в полупроводнике p -типа (его создала акцепторная примесь) основными свободными зарядами являются дырки, а неосновными — свободные электроны.

Казалось бы, что не стоит обращать внимание на неосновные заряды — их очень мало и никакого влияния на работу pn -перехода они оказать не могут. В действительности же все обстоит иначе: неосновных зарядов действительно мало, но они начинают действовать, когда основные заряды «уходят от дел». И поэтому на фоне бездействующих основных зарядов малочисленный отряд неосновных становится чуть ли не главной действующей силой.

Так, в частности, когда мы прикладываем к pn -переходу обратное напряжение и основные заряды оттягиваются от гра-

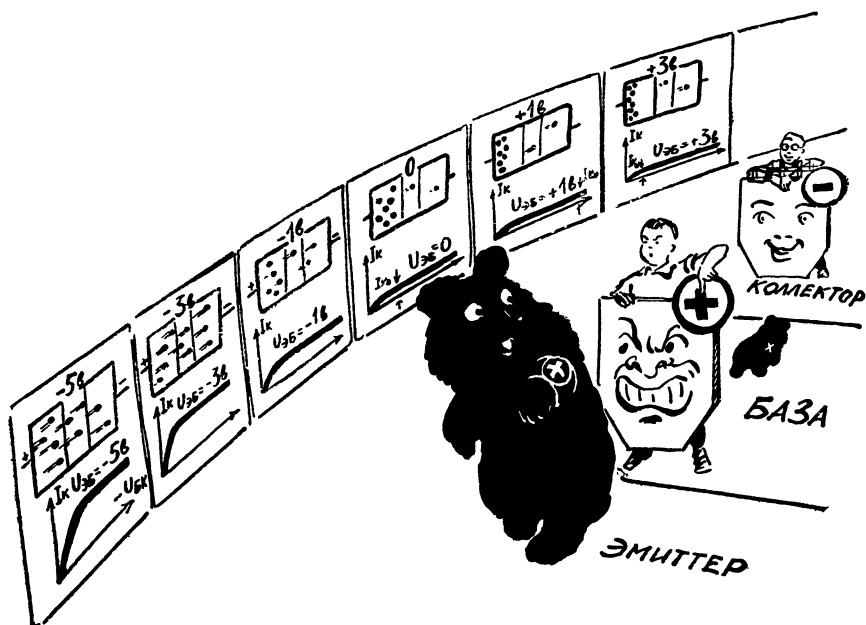


Рис. 60. Собственные (неосновные) свободные заряды базы создают небольшой коллекторный ток, который не управляется, то есть не подчиняется управляющему напряжению на базе.

ницы между зонами, неосновные, наоборот, устремляются к этой границе — ведь у них другой знак и они все делают наоборот. Именно за счет неосновных зарядов возникает в полупроводниковом диоде обратный ток $I_{обр}$. Именно из-за неосновных зарядов возникает в коллекторной цепи и неуправляемый ток $I_{к0}$ (рис. 60).

Сейчас настал момент сделать короткую остановку и обратить внимание на одну очень интересную особенность коллекторной цепи. До сих пор у нас не было случая поговорить об этой особенности, а сейчас как раз наступил удобный момент. Дело вот в чем. В коллекторной цепи транзистора работают только неосновные заряды. Действительно, заряды, которые попадают из эмиттера в базу, для базы оказываются неосновными. В транзисторе $p-n-p$, например, из эмиттера (зона p) в базу (зона n) поступают дырки, а в самой базе основные заряды — это электроны. Именно дырки — неосновные для базы заряды — уходят в коллекторный pn -переход и создают коллекторный ток I_K . Коллекторный ток, как мы уже

говорили, очень похож на обратный ток диода. Это видно хотя бы по тому, что ток возникает под действием обратного напряжения — к коллектору приложен «минус», запирающий *pn*-переход для основных зарядов — электронов базы. И поэтому создаваться такой ток может только неосновными зарядами базы, то есть дырками.

Но в базе, как вы сами понимаете, имеется два сорта дырок: собственные (тепловые) дырки и чужие, впрыснутые из эмиттера. Оба сорта дырок — и собственные, и впрыснутые — участвуют в создании коллекторного тока на равных правах, и, казалось бы, между ними нет никакой разницы. Но разница все же есть. Количество впрыснутых дырок мы можем менять по своему вкусу, изменяя напряжение $U_{эб}$. Можно вообще прекратить впрыскивание дырок в базу, подав на нее «плюс», достаточный для того, чтобы запереть эмиттерный переход. А вот изменить количество собственных дырок базы мы не можем — это не в нашей власти.

Количество собственных дырок базы определяется лишь свойствами кристалла и температурой. А поэтому ток $I_{к0}$, создаваемый собственными неосновными носителями базы (ее собственными тепловыми дырками), всегда протекает в коллекторной цепи и не подчиняется воздействию управляющего напряжения. Несколько забежая вперед, заметим, что ток $I_{к0}$ может сильно влиять на режим транзистора. А поскольку этот ток, так же как и обратный ток диода, сильно зависит от температуры (рис. 21), то приходится принимать решительные меры для того, чтобы обеспечить температурную стабильность транзисторного усилителя.

Семейство выходных характеристик — это своего рода сценарий, по которому можно было бы снять увлекательный фильм. Ведь за каждой характеристикой, за каждым ее изгибом и поворотом стоят интересные события, которые происходят в самом транзисторе. А поскольку характеристик много, то события эти сложным образом переплетаются, как в самом настоящем детективе.

Представьте себе, как из эмиттера в базу впрыскиваются свободные заряды (в триоде *p-n-p*, с которым мы все время имеем дело, из эмиттера в базу впрыскиваются дырки) и как эти заряды в результате диффузии проходят сквозь базу и попадают к коллекторному переходу. Здесь напряжение $U_{бк}$ «хватает» свободные заряды и с силой бросает их в коллекторную цепь, создав таким образом ток $I_{к}$. (Вы, очевидно, уже забыли о примечании на стр. 26? Сейчас как раз наступил момент еще раз обратиться к нему.)

При увеличении коллекторного напряжения $U_{бк}$ ток I_k немного увеличивается. Мы, к сожалению, не имеем возможности рассказывать обо всех причинах увеличения тока I_k под действием $U_{бк}$. Упомянем лишь об одной из этих причин. С увеличением $U_{бк}$ расширяется лишенная свободных зарядов область коллекторного перехода, и такое расширение происходит частично за счет территории базы. База становится чуть тоньше, силам диффузии тогда чуть легче проталкивать сквозь нее поступившие из эмиттера свободные заряды, и в итоге немножко возрастает коллекторный ток.

Слово «немножко» мы применили не напрасно — напряжение $U_{бк}$ очень слабо влияет на величину тока I_k . Как бы ни старалось коллекторное напряжение, оно не может двинуть по коллекторной цепи больше зарядов, чем их поступило из базы. Поэтому резко увеличить коллекторный ток можно только одним способом: нужно увеличить отрицательное напряжение на базе $U_{эб}$ (мы лишь для краткости говорим «напряжение на базе», фактически речь идет о напряжении между базой и эмиттером) и таким образом впрыскивать из эмиттера в базу большее количество свободных зарядов. При этом мы как бы поднимаемся на ступеньку выше, перескакиваем на более «высокую» выходную характеристику, снятую при более высоком входном напряжении $U_{эб}$.

В реальном случае, когда на входе транзистора появляется усиливаемый сигнал и напряжение на базе непрерывно меняется, подобное перескакивание с одной выходной характеристики на другую происходит непрерывно. Но одновременно с этим меняется и напряжение на коллекторе: мы уже говорили (рис. 38), что чем больше коллекторный ток I_k , тем больше напряжение на нагрузке $U_n = I_k \cdot R_n$, тем меньше напряжение на самом коллекторе $U_{бк} = E_k - U_n$.

Как же уследить за всеми этими перепутанными событиями, как определить истинный коллекторный ток и с учетом меняющегося $U_{эб}$, и с учетом меняющегося $U_{бк}$? Это помогает сделать нагрузочная прямая, или, как ее еще называют, линия нагрузки (рис. 61). Давайте посмотрим, как строится такая линия в следующем конкретном случае: $R_n = 1 \text{ ком}$ и $E_k = 12 \text{ в}$.

Чтобы построить линию нагрузки, введем в наш сценарий две фантастические ситуации: рассмотрим, что происходит в коллекторной цепи, когда коллекторный ток равен нулю (первая фантастическая ситуация) и когда коллекторный ток настолько велик, что все напряжение батареи теряется на нагрузке и на самом коллекторе вообще нет никакого напряжения (вторая фантастическая ситуация). Подобных ситуаций в реальном случае не бывает, и поэтому мы будем о них

говорить, применяя так называемую сослагательную форму «если бы да кабы».

Если бы коллекторный ток был равен нулю, то на нагрузке вообще не было бы никакого напряжения ($U_n=0$) и все

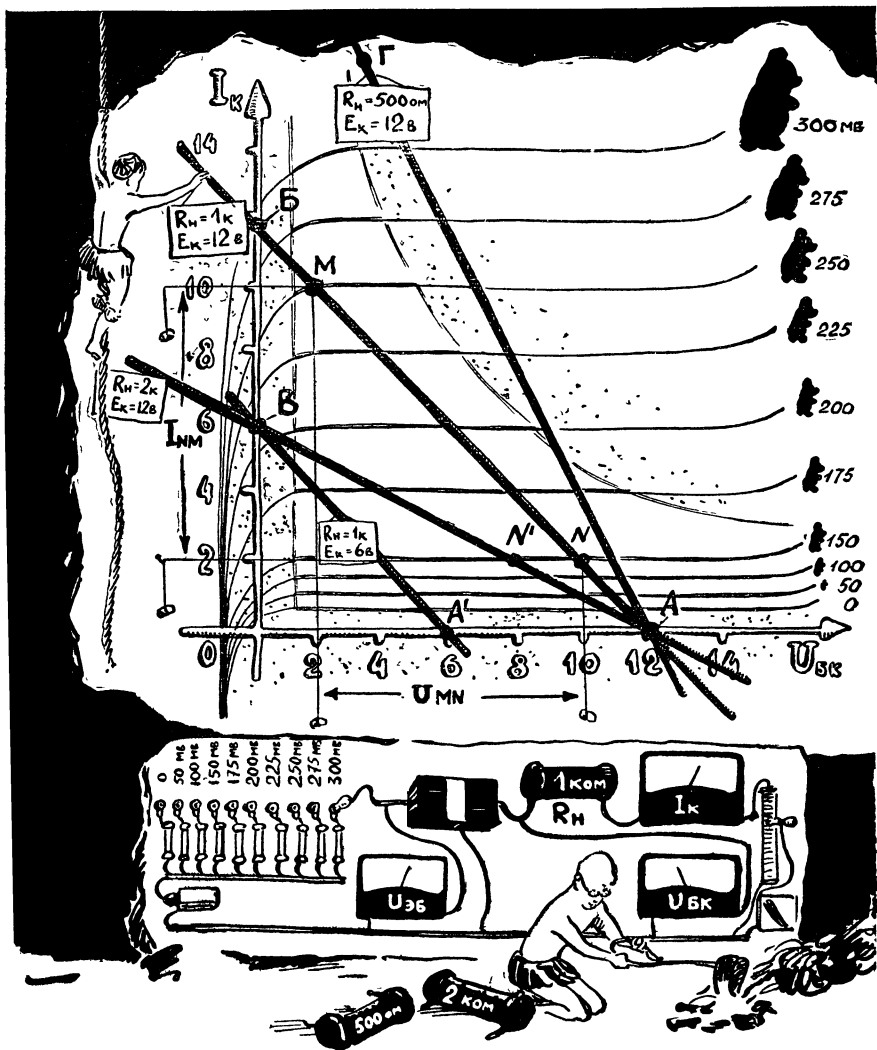


Рис. 61. Нагрузочная прямая показывает, как меняется коллекторный ток под действием входного сигнала и с учетом того, что напряжение на нагрузке (а значит, и на коллекторе) тоже меняется при изменении тока.

напряжение источника E_k было бы приложено к коллектору. На основании этого первого «если бы» поставим на нашей характеристике точку A ; она как раз соответствует $U_{бк}=E_k$, так как напряжение батареи E_k мы приняли равным 12 в.

Если бы напряжение $U_{бк}$ было равно нулю (это возможно, если довести сопротивление коллекторного перехода до нуля), то все напряжение E_k было бы приложено к сопротивлению нагрузки и ток через нагрузку (коллекторный ток I_k) был бы по закону Ома равен $I_k=E_k R_n$. На основании этого второго «если бы» сделаем еще одну отметку на нашей характеристике — поставим на ней точку B . Она как раз и соответствует напряжению $U_{бк}=0$ и току $I_k=12$ ма, который под действием напряжения $E_k=12$ в пойдет по выбранному нами сопротивлению нагрузки $R_n=1$ ком.

Теперь нетрудно провести и линию нагрузки. Она пройдет от точки максимального коллекторного тока и нулевого напряжения на коллекторе (точка B) до точки нулевого коллекторного тока и максимального напряжения на коллекторе (точка A). И хотя обе эти крайние точки мы не без оснований назвали фантастическими (ни I_k , ни $U_{бк}$ практически никогда не равны нулю), сама линия AB абсолютно реальна. Она как раз и рассказывает сразу о всех запутанных событиях, происходящих в работающем транзисторе: об изменении его токов и напряжений в живом, рабочем, динамическом режиме.

Каждая точка на линии AB говорит о том, как при выбранной нагрузке R_n и выбранном напряжении питания E_k связаны между собой входное напряжение $U_{эб}$, напряжение на коллекторе $U_{бк}$ и коллекторный ток I_k . Так, например, точка M говорит о том, что при $U_{эб}=250$ мв режим коллекторной цепи будет $U_{бк}=2$ в и $I_k=10$ ма; при $U_{эб}=150$ мв режим уже совсем иной: $U_{бк}=10$ в, $I_k=2$ ма (точка N). Разумеется, эти данные относятся лишь к $R_n=1$ ком и $E_k=12$ в. Если увеличить сопротивление нагрузки R_n , то нагрузочная линия пойдет более полого (AB), а если уменьшить R_n — более круто (AG). Это происходит потому, что с увеличением сопротивления нагрузки на нем теряется все большая часть питающего напряжения E_k и уменьшается напряжение на коллекторе $U_{бк}$. Так при одном и том же входном напряжении $U_{эб}=150$ мв получаем $U_{бк}=10$ в при $R_n=1$ ком (точка N); и $U_{бк}=8$ в при $R_n=2$ ком (точка N').

Уменьшение питающего напряжения E_k одновременно уменьшает и ток I_k , и напряжение $U_{бк}$ и таким образом смещает всю линию нагрузки в сторону нуля (линия $A'B$ при $E_k=6$ в).

Задавшись пределами изменения входного сигнала, можно

найти пределы изменения коллекторного тока и напряжения на коллекторе. Так, если входное напряжение меняется от 150 мв до 250 мв (наша входная характеристика говорит о том, что такие пределы изменений вполне допустимы), то все события в транзисторе будут происходить в пределах участка MN нагрузочной прямой. При этом коллекторный ток будет меняться от 2 ма до 10 ма, а напряжение на коллекторе — от 2 в до 10 в. Отсюда легко найти и амплитудные значения напряжения и тока выходного (усиленного) сигнала $I_{ампл} = I_{к(MN)} : 2 = 8 \text{ ма} : 2 = 4 \text{ ма}$. Мы делим $I_{к(MN)}$ на два потому, что в этом интервале должны «поместиться» две амплитуды («положительная» и «отрицательная»), а значит, на каждую из них придется только половина $I_{к(MN)}$. Аналогично находим и амплитуду переменного напряжения: $U_{ампл} = U_{бк(MN)} : 2 = 8 \text{ в} : 2 = 4 \text{ в}$.

Прежде чем двигаться дальше, нам нужно покаяться в грехах, рассказать о некоторых неточностях, которые мы допустили, пытаясь отделить суть дела от второстепенных подробностей, и, по возможности, избежать лишних названий, терминов и объяснений.

Так, например, мы назвали входными характеристиками все графики, приведенные на рис. 54, в то время как входной характеристикой официально называется лишь зависимость $I_э$ от $U_{эб}$. Более того, зависимость напряжения на нагрузке $U_н$ от напряжения $U_{эб}$ на входе транзистора попала в число входных характеристик совсем уже незаконно: все эти характеристики снимаются без нагрузки, при постоянном напряжении на коллекторе и поэтому называются статическими. Статическими, кстати, называются и все наши выходные характеристики. Они тоже снимаются без нагрузки, а влияние $R_н$ учитывается путем несложных вычислений и построений.

Мы не отметили на входной характеристике очень небольшой эмиттерный ток, возникающий при отсутствии входного напряжения, то есть при $U_{эб} = 0$, если при этом есть хотя бы небольшое напряжение на коллекторе. Этот начальный ток появляется благодаря тому, что коллекторный ток создает в самой базовой области на ее собственном, внутреннем сопротивлении некоторое внутреннее напряжение, отпирающее эмиттерный переход даже тогда, когда нет внешнего отпирающего напряжения.

Другой «странный ток» — довольно большой коллекторный ток $I_к$, который существует даже при отсутствии коллекторного напряжения, то есть при $U_{бк} = 0$. Он появляется из-за диффузии через базу зарядов, впрыснутых в нее из эмиттера.

Мы не будем продолжать перечисление подобных второсте-

пенных, но несомненно интересных подробностей. Во-первых, с некоторыми из них нам еще предстоит встретиться. Во-вторых, уже пора сделать какие-нибудь полезные выводы из долгого и трудного разбора входных и выходных характеристик транзистора.

УЧИТЕСЬ ДЕЛАТЬ ВЫВОДЫ

Первые несколько выводов мы, как говорится, можем «взять голыми руками», бегло взглянув на рис. 56 и 58. Выводы эти касаются параметров самого транзистора — он обладает очень небольшим входным сопротивлением, очень большим выходным сопротивлением и не дает усиления по току.

Другие выводы — они касаются режима транзисторного усилителя — будут сделаны на основании анализа входной и выходной характеристик, причем мы будем наблюдать за усилителем в динамическом режиме, то есть когда на его вход подан усиливаемый сигнал, а в коллекторную цепь включена нагрузка.

Чтобы легче представить себе то, что происходит в этом случае с транзистором, мы воспользуемся совмещенными графиками, пример построения которых понятен из рис. 62.

В левой части рис. 62 помещена входная характеристика транзистора, которая показывает, как меняется ток I_3 при изменении управляющего напряжения U_{36} . Само же напряжение U_{36} непрерывно меняется, так как ко входу усилителя подведен сигнал $U_{\text{сиг}}$. Кроме того, на входе действует еще и напряжение смещения $U_{\text{см}}$. Суммируясь, $U_{\text{см}}$ и сигнал дают меняющееся напряжение U_{36} . График этого напряжения (рис. 62—Б) мы «положили набок» и совместили его с входной характеристикой. «Совместили» — это значит, что деления на оси напряжения U_{36} графика Б совпадают с делениями на оси напряжения U_{36} графика А. Иными словами, одинаковые значения напряжений — 100 мВ, 200 мВ, 300 мВ и т. д. — лежат строго друг против друга, то есть совмещены.

Обратите внимание, что ось времени на графике Б размечена не в «законных» единицах времени — не в сек, мсек, мксек и т. д. На этой оси маленькими буквами а, б, в отмечены лишь три наиболее интересных момента. Так, например, от момента 0 до момента а входного сигнала нет, и на базе действует только одно смещение. Моменты б и в соответствуют положительной и отрицательной амплитудам усиливаемого сигнала. Суммируясь с $U_{\text{см}}$ или вычитаясь из него, эти амплитуды дают наибольшее $U_{36-\text{макс}}$ или наименьшее $U_{36-\text{мин}}$ напряжение на базе.

Попутно еще раз напоминаем, что наибольшим напряжением на базе мы будем считать наибольший «минус» на ней, именно тот самый «минус», который отпирает эмиттерный *pn*-переход и увеличивает эмиттерный ток. «Минус» напряжения $U_{эб}$ откладывается по оси напряжений вправо от нуля. Это непривычно, но зато удобно. Конечно, более привычным было бы откладывать вправо от нуля не «минус», а «плюс». Но для этого уже пришлось бы вести речь не о «минусе» на базе, а о «плюсе» на эмиттере. И хотя по существу здесь нет никакой разницы (если на базе — 2 в относительно эмиттера, то на эмиттере +2 в относительно базы; человек, живущий на первом этаже шестиэтажного дома, может сказать, что над ним пять этажей, а тот, кто живет на последнем этаже, может сказать, что под ним пять этажей), однако в интересах будущего лучше приучиться говорить о напряжении на базе относительно эмиттера, а не о напряжении на эмиттере относительно базы. Поэтому-то мы и откладываем вправо от нуля отрицательное напряжение $-U_{эб}$, то есть «минус» на базе.

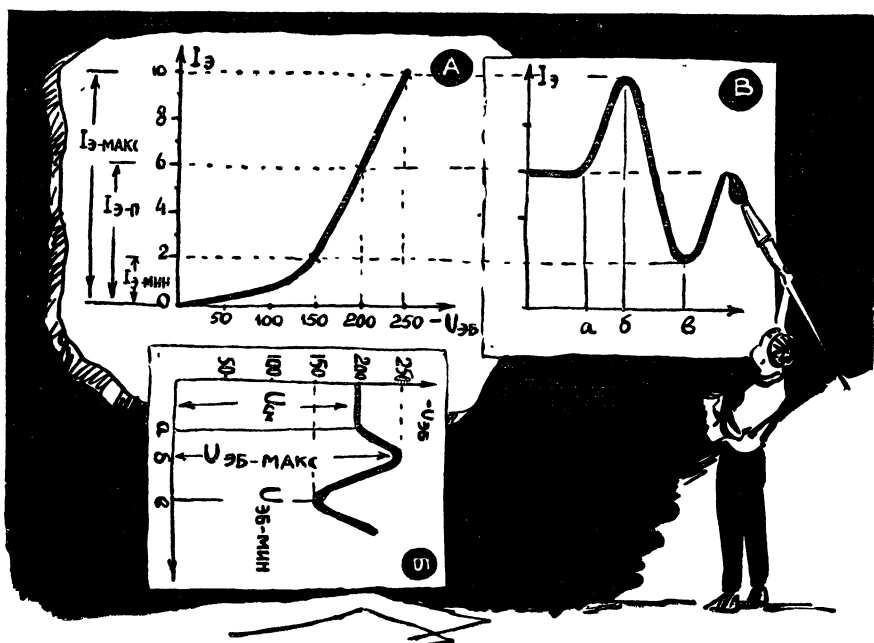


Рис. 62. Если известно, как меняется входное напряжение, то, пользуясь входной характеристикой, можно построить график входного (эмиттерного) тока.

Итак, мы совместили с входной характеристикой транзистора график, показывающий, как с течением времени меняется входное напряжение $U_{эб}$. Теперь можно быстро узнать, каким будет эмиттерный ток в тот или иной момент времени. Для этого достаточно определить $U_{эб}$, затем провести вспомогательную прямую линию на входную характеристику и, наконец, по входной характеристике определить, каким будет ток при данном $U_{эб}$. Так, например, легко находим, что в момент *a* на базе действует напряжение $U_{эб}=200$ мв и что этому напряжению соответствует ток $I_э=6$ ма. Аналогично для момента *б* находим $U_{эб}=250$ мв и $I_э=10$ ма, а для момента *в* определяем $U_{эб}=150$ мв и $I_э=2$ ма.

Определяя ток для разных моментов времени, можно построить еще один важный график — зависимость входного тока $I_э$ от времени t . Для удобства этот третий график (рис. 62—*В*) располагаем справа от входной характеристики и ось тока $I_э$ размечаем в том же масштабе, что и ось тока $I_э$ на входной характеристике. Это позволит упростить само построение третьего графика, так как необходимую величину тока можно будет откладывать на нем, протянув вспомогательную прямую линию от входной характеристики.

Как видите, совмещенные графики для входной цепи строятся очень просто и позволяют наглядно представить себе, что произойдет с эмиттерным током (не забывайте — от него зависит и коллекторный ток!) при тех или иных изменениях смещения или самого входного сигнала.

Несколько сложнее обстоит дело с построением совмещенных графиков, иллюстрирующих работу коллекторной цепи (рис. 63). Трудность состоит в том, что просто некуда приложить «самый главный» график, определяющий все поведение транзистора, в том числе и поведение коллекторной цепи. Речь идет о графике, который показывал бы, как меняется управляющее напряжение $U_{эб}$ (листок *Б*). По вертикальной и горизонтальной осям выходной характеристики (рис. 63—*А*) откладываются соответственно коллекторный ток и коллекторное напряжение, которые в очень сильной степени зависят от $U_{эб}$. А изменения самого управляющего напряжения $U_{эб}$ отражены лишь в том, что построена не одна, а целое семейство выходных характеристик и при изменении $U_{эб}$ следует переходить с одной из них на другую (стр. 165). Поэтому есть лишь один способ хоть как-нибудь отметить на выходной характеристике то, что происходит на входе транзистора. Нужно помечать тех «членов семейства», помечать те отдельные статические характеристики, которые соответствуют изменяющемуся входному напряжению.

Мы в дальнейшем будем помечать лишь три такие статические характеристики: одну — соответствующую наибольшему напряжению на базе $U_{эб-макс}$, другую — соответствующую наименьшему напряжению на базе $U_{эб-мин}$ и третью — соответствующую напряжению постоянного смещения $U_{см}$. По этим трем характеристикам можно определить наибольший коллекторный ток $I_{к-макс}$, наименьший коллекторный ток $I_{к-мин}$ и коллекторный ток покоя $I_{к-п}$ — постоянный ток в коллекторной цепи, когда сигнала нет. Попутно отметим, что этот ток очень часто определяет и энергию, потребляемую от источника питания, так как он говорит о том, что потребляется от этого источника не в самом трудном случае ($I_{к-макс}$, момент б), не в самом легком случае ($I_{к-мин}$, момент а), а в среднем за длительное время.

И еще одно попутное замечание: токи эмиттера $I_{э-п}$ и базы $I_{б-п}$ при отсутствии сигнала также называются токами покоя. Подсчитав $I_{к}$ для разных моментов времени, можно легко построить график изменения этого тока с течением времени

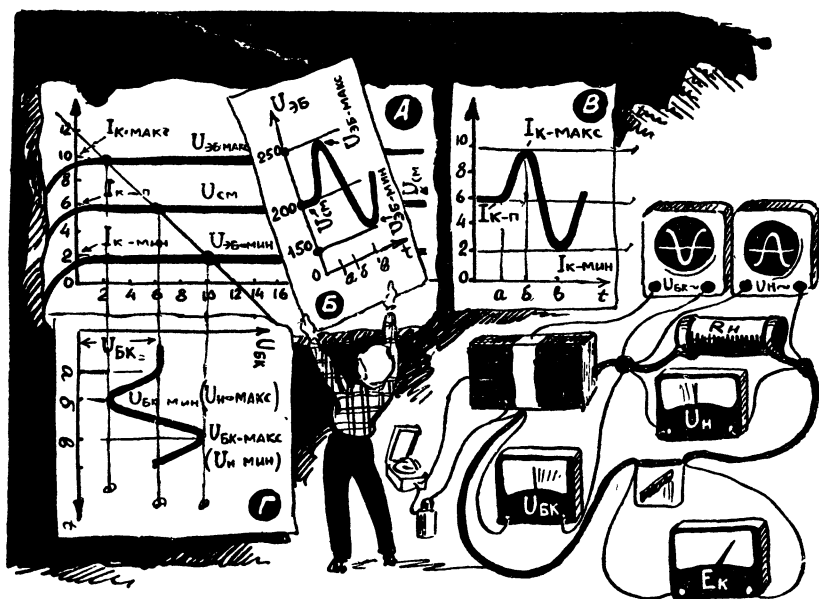


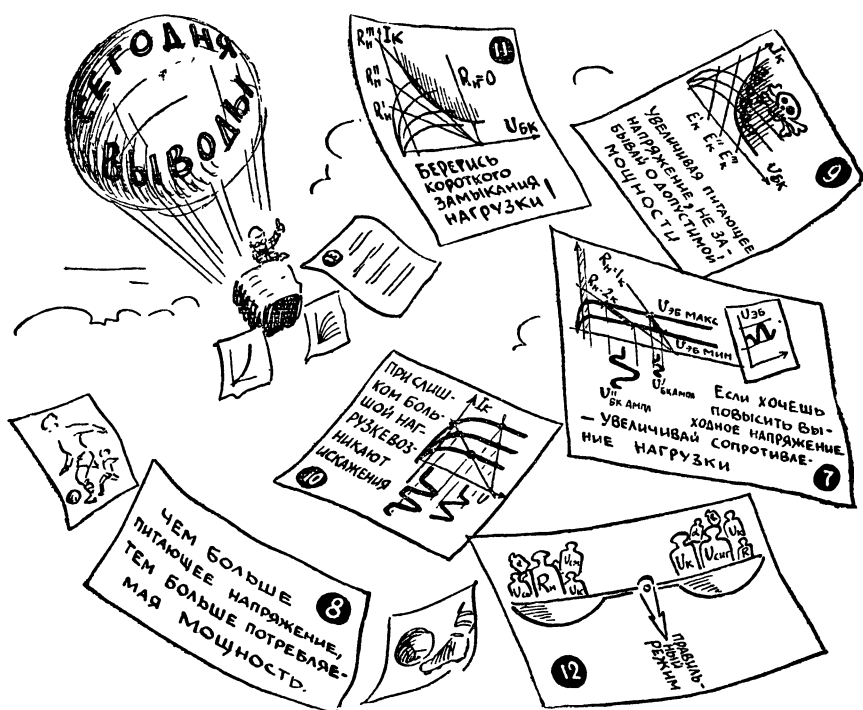
Рис. 63. Если известно, как меняется входное напряжение, и известно сопротивление нагрузки, то, пользуясь выходной характеристикой, можно построить график коллекторного тока и напряжения на коллекторе (на нагрузке).

(листок В). Для простоты построения график этот удобно расположить слева или справа от выходной характеристики, причем расположить так, чтобы оси I_k оказались совмещенными.

Отметив три статические характеристики, соответствующие наибольшему, наименьшему и среднему напряжению на входе транзистора, можно, пользуясь линией нагрузки, определить, как будет изменяться и напряжение $U_{бк}$ на коллекторе (точнее — между коллектором и базой). Для этого достаточно опустить на горизонтальную ось вспомогательные линии от точек пересечения линии нагрузки с соответствующими статическими характеристиками. Определив границы изменения $U_{бк}$, можно очень просто построить график, показывающий, как меняется это напряжение с течением времени (листок Г).

Мы все время считаем, что продукция усилителя — это переменная составляющая напряжения на нагрузке $U_{н\sim}$. Но можно легко доказать, что переменное напряжение на нагрузке меняется в тех же пределах, что и напряжение на самом коллекторе. Действительно, нагрузка и коллекторная цепь самого транзистора образуют делитель, к которому приложено напряжение E_k коллекторной батареи. В динамическом режиме сопротивление коллекторной цепи меняется, а сопротивление нагрузки, естественно, остается неизменным. Поэтому подводимое напряжение E_k непрерывно перераспределяется между этими двумя участками делителя, причем сумма напряжений $U_n + U_{бк}$ всегда остается неизменной и равной E_k . Это значит, что если напряжение на нагрузке увеличится, например, на 2 в, то на те же 2 в уменьшится напряжение на коллекторе, и наоборот: на сколько увеличится $U_{бк}$, на столько же уменьшится и U_n . Иными словами, в динамическом режиме напряжение на нагрузке меняется на ту же величину, что и напряжение на коллекторе, и можно с равным успехом называть выходным сигналом транзисторного усилителя и переменную составляющую $U_{н\sim}$, и переменную составляющую $U_{бк\sim}$. А поэтому по построенному нами графику изменения $U_{бк}$ можно в полной мере судить о выходном напряжении усилителя. Для удобства построения этот график «положен набок» и его ось $U_{бк}$ совпадает с такой же осью выходной характеристики.

Вот мы подготовились к тому, чтобы с помощью входной и выходной характеристик попытаться оценить влияние тех или иных факторов на режим транзисторного усилителя. Выводы, которые сейчас будут сделаны, мы пронумеруем, с тем чтобы в дальнейшем, при рассмотрении практических схем, проще было на них ссылаться. В соответствии с «порядковым



номером» того или иного вывода пронумерован и поясняющий листок на рис. 64.

Вывод первый. На работу усилителя в сильнейшей степени влияет постоянное отрицательное смещение $U_{\text{см}}$, проще говоря — «минус» на базе. При слишком малом смещении входное напряжение $U_{\text{вб}}$ попадает в область загибов входной характеристики, а то и в область положительного напряжения на базе. А если на базе появляется «плюс», транзистор просто запирается, то есть работает с отсечкой.

Слишком большое смещение может привести к другой крайности — к чрезмерному эмиттерному току и, значит, к перегреву транзистора и выходу его из строя. Не думайте только, что этот перегрев из тех, которые можно обнаружить на ощупь, а если надо, то и перетерпеть. Даже ненадолго превысив допустимый эмиттерный (или коллекторный) ток, вы выведете транзистор из строя настолько быстро и аккуратно, что даже заметить этого не успеете.

По характеристике можно определить режим, при котором на базе действует одно только смещение. Сама точка на ха-

Рис 64 Входные и выходные характеристики позволяют сделать ряд полезных практических выводов о работе транзисторного усилителя.

что на входной характеристике в том ее месте, которое соответствует выбранному смещению $U_{см}$, действительно ставит довольно жирную точку.

На входной характеристике можно выделить две крайние точки, соответствующие наибольшему допустимому току $I_{э-доп}$ и напряжению, при котором заканчивается загиб (у нас это 150 мВ). Участок характеристики, который лежит между этими крайними точками, называется прямолинейным участком. Для того чтобы полностью использовать этот участок, нужно подобрать смещение («рабочую точку»), соответствующее его середине.

Вывод второй. Увеличение смещения влечет за собой повышение токов покоя $I_{э-п}$ и $I_{к-п}$, а значит, увеличение мощности, потребляемой от источников питания. Поэтому не стоит увеличивать смещение без надобности, и наоборот, если это возможно, смещение следует уменьшать, повышая таким образом экономичность усилителя.

Вывод третий. Напряжение смещения $U_{см}$ следует устанавливать с учетом того, какой входной сигнал будет подводиться к усилителю. Если напряжение сигнала невелико, то незачем пользоваться всем прямолинейным участком входной характеристики и добиваться, чтобы ток покоя попадал на середину этого участка. В случае малого сигнала смещение может быть небольшим. При этом и токи покоя $I_{э-п}$ и $I_{к-п}$ будут небольшими.

Вывод четвертый. Выбор рабочей точки в середине прямолинейного участка позволяет подвести к усилителю входной сигнал, самый большой из всех возможных. Если же почему-либо окажется, что входной сигнал все равно выходит за пределы дозволенного, то в этом случае можно уменьшить его с помощью обычного потенциометра (например, регулятора громкости).

Здесь могут возникнуть серьезные опасения. С помощью потенциометра действительно можно менять входное напряжение и при достаточно большом $U_{см}$ выходить из прямолинейного участка или входить в него. Но не опасно ли пользоваться усилителем, который работает в подобном режиме? Ведь достаточно слегка повернуть ручку регулятора, чтобы напряжение на базе превысило допустимую величину.

Скажем прямо, такие опасения не лишены оснований — слишком большим напряжением сигнала действительно можно вывести из строя эмиттерный переход. Однако в усилителях, собранных по уже рассчитанным и проверенным схемам, до этого дело обычно не доходит. Напряжение на базе приходится ограничивать еще задолго до того, как наступает опас-

ность «теплового разрушения» эмиттерного перехода. Как правило, увеличение входного сигнала становится невозможным из-за искажений, возникающих в выходной цепи. Но это уже, как говорится, совсем другая история.

Вывод пятый. В коллекторной цепи имеются два главных героя, определяющих степень искажения сигнала, усиление и режим транзистора: это нагрузка и питающая батарея. Повышение напряжения питания E_k , как это ни странно, само по себе ничего не дает. Может оказаться так, что, повысив постоянное напряжение на коллекторе, вы ничего не выиграете и переменное выходное напряжение (а значит, и выходная мощность) каким было, таким и останется. Происходит это потому, что само повышение коллекторного напряжения практически не влияет на коллекторный ток — выходные характеристики идут очень полого. А поскольку повышение E_k не увеличивает I_k , то оно не увеличивает и напряжение U_n , которое, как известно, пропорционально коллекторному току.

Законный вопрос: если коллекторное напряжение так уж не влияет на коллекторный ток и, следовательно, на выходной сигнал, то, может быть, стоит понизить это напряжение? Зачем в карманном приемнике батарея с напряжением 9 в, если можно ограничиться 1,5 в или еще меньшим напряжением? Разумеется, вопросы эти возникают только потому, что о роли питающего напряжения было рассказано далеко не все. Увеличение E_k если само и не повышает выходную мощность, то дает возможность ее повысить — для этого нужно увеличить входной сигнал или сопротивление нагрузки или сделать и то и другое одновременно. Проще говоря, повышение E_k поднимает «потолок» выходной мощности.

Вывод шестой. Чем выше питающее напряжение, тем большим может быть «размах» управляющего напряжения $U_{эб}$ и тем, следовательно, больше будут меняться коллекторный ток и коллекторное напряжение.

Вывод седьмой. Чем выше питающее напряжение E_k , тем большую нагрузку можно включить в коллекторную цепь, не опасаясь ни попадания в область искажений, ни того, что $U_{бк}$ в какие-то моменты окажется слишком близким нулю. А это значит, чем больше E_k , тем большее усиление можно «выжать» из одного транзистора, увеличивая R_n . Здесь, правда, существует новая опасность — при чрезмерном усилении усилитель может превратиться в генератор (см. стр. 303), и поэтому всегда существует некоторый предел усиления, дальше которого продвинуться просто не удастся.

Вывод восьмой. Чудес не бывает. Нужно отдать себе отчет в том, что, пытаясь поднять усиление, увеличить

переменную составляющую коллекторного тока, переменную составляющую коллекторного напряжения, а значит, выходную мощность и повышая для достижения всех этих целей питающее напряжение, мы одновременно увеличиваем мощность потребляемую от источника питания.

Вывод девятый. Если, несмотря на все эти предостережения, вы все же захотите подвести к транзистору как можно большее питающее напряжение, то не забывайте, что существует граница — допустимая мощность — и что переходить эту границу можно только в том случае, если вы хотите избавиться от своего транзистора и не можете найти для этого более простой способ. Специалисты рекомендуют всегда иметь некоторый запас и считают, что разумный потолок коллекторного напряжения на 10—20% меньше допустимой величины.

Вывод десятый. Увеличивая сопротивление нагрузки в погоне за большим усилением сигнала, можно попасть в другую запретную зону — в область выходной характеристики, где происходит искажение формы сигнала. Это объясняется просто: чем больше сопротивление $R_{\text{н}}$, тем большая часть $E_{\text{к}}$ достается этому сопротивлению и тем, следовательно, меньшее напряжение остается на самом коллекторе. Увеличивая $R_{\text{н}}$, можно до того «доувеличить» $U_{\text{н}}$, что на коллекторе в некоторые моменты вообще ничего не останется и из-за этого сильно исказится форма выходного сигнала.

Вывод одиннадцатый. Чем меньше сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, тем круче идет нагрузочная прямая. И это вполне понятно: с уменьшением $R_{\text{н}}$ уменьшается теряемое на нем напряжение $U_{\text{н}}$ и, следовательно, растет напряжение на коллекторе. При отсутствии нагрузки, то есть когда $R_{\text{н}}=0$, нагрузочная прямая представляет собой вертикальную линию и говорит о том, что ток в коллекторной цепи меняется, а напряжение на коллекторе остается неизменным. (А с чего бы ему меняться, если теперь питающее напряжение $E_{\text{к}}$ не делится ни на какие части и целиком подводится к коллектору?) При коротком замыкании нагрузки ($R_{\text{н}}=0$) транзистор легче чем когда бы то ни было может перейти предельно допустимую мощность.

Вывод двенадцатый. Дать рецепт подбора правильного режима транзистора на все случаи жизни невозможно. Напряжение смещения $U_{\text{см}}$, напряжение питания $E_{\text{к}}$, сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, напряжение сигнала $U_{\text{сиг}}$ сложным образом связаны между собой и все вместе еще более сложным образом влияют на условия работы усилителя, на такие его показатели, как усиление, мощность усиленного сигнала, надежность и др. Поэтому, изменяя один из показателей ($U_{\text{сиг}}$,

$U_{см}$, E_k или R_n), подумайте, как при этом нужно и как можно изменить другие показатели и как в итоге изменится весь режим в целом.

Какими бы интересными и полезными ни показались все эти выводы о работе транзисторного усилителя, мы обязаны сделать еще один, по смыслу неприятный, а по счету тринадцатый вывод. Все характеристики мы строили и все выводы по ним делали только для одной главной схемы транзисторного усилителя, а таких главных схем существует три. Чем отличаются две другие схемы от той, с которой мы уже знакомы? Как выглядят для этих двух новых, неизвестных пока схем входные и выходные характеристики? Действительны ли для них сделанные нами двенадцать практических выводов?

Ответ на эти вопросы сможет быть дан лишь после того, как мы детально познакомимся со всеми тремя главными схемами транзисторных усилителей.

$$«2+2=3»$$

Предметом нашего дальнейшего разговора будет именно это странное равенство. Конечно, если бы мы занимались арифметикой, то здесь не о чем было бы говорить — ошибка слишком очевидна. Но в данном случае « $2+2=3$ » относится к схемам электронных усилителей и является попыткой в шутиливой форме отобразить такой факт: два провода, по которым слабый сигнал вводится в усилитель, и два провода, по которым усиленный сигнал выводится из усилителя, нужно подключить к трем выводам транзистора. То есть четыре провода нужно подключить к трем, « $2+2=3$ ».

Чтобы осуществить такое подключение, есть только один путь. Нужно к одному из выводов транзистора — к базе, эмиттеру или коллектору — подключить сразу два провода: один входной и один выходной. (Подключить к одному и тому же выводу транзистора два входных провода или два выходных бессмысленно — это равносильно короткому замыканию цепи.) Та зона транзистора, к которой подключаются сразу два провода, называется общей — она действительно является общей для входной и выходной цепи.

В принципе любой из трех электродов (эмиттер, коллектор и базу иногда называют электродами транзистора, а иногда его зонами) может быть общим, и поэтому существуют три основные схемы транзисторных усилителей: схема с общей базой, схема с общим эмиттером и схема с общим коллектором.

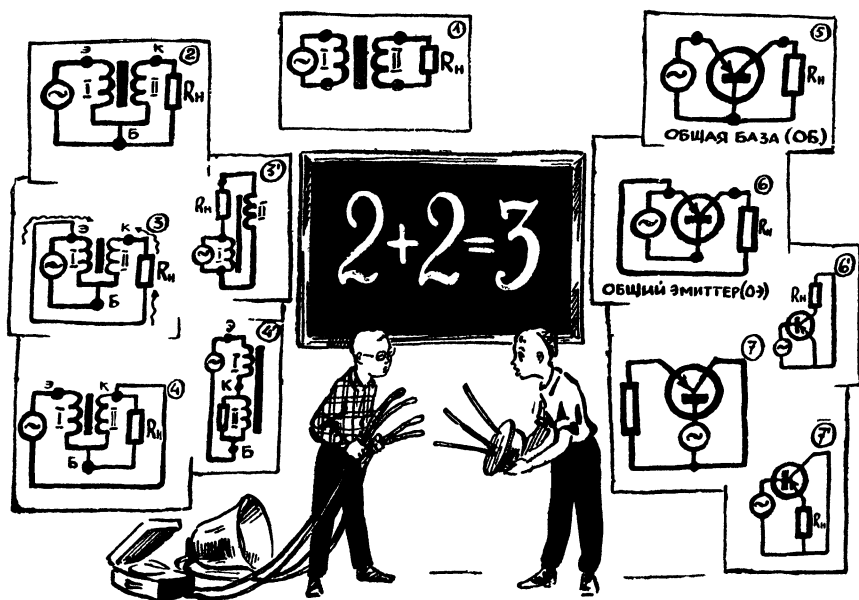


Рис. 65 Два вывода источника сигнала и два вывода нагрузки нужно подключить к трем выводам транзистора, и отсюда появляются три основные схемы включения транзисторного усилителя: с общей базой (ОБ), с общим эмиттером (ОЭ) и с общим коллектором (ОК).

Прежде чем разбирать достоинства и недостатки каждой из них, рассмотрим ситуацию « $2+2=3$ » применительно к обычному трансформатору (рис. 65, листки 1, 2, 3, 4).

Предположим, что у нас есть трансформатор, ко входу которого (первичная обмотка) подключен генератор, дающий переменное напряжение, а к выходу (вторичная обмотка) подключена нагрузка R_n . Нормальное подключение генератора и нагрузки к трансформатору (« $2+2=4$ ») показано на листке 1.

Теперь предположим, что один из выводов первичной обмотки соединен в самом трансформаторе с одним из выводов вторичной обмотки, и таким образом у трансформатора оказывается всего три вывода вместо четырех.

Самая простая и естественная схема подключения генератора и нагрузки к такому трансформатору с тремя выводами показана на листке 2. Мы называем эту схему естественной, потому что она очень напоминает схему 1 — между обмотками, по сути дела, нет непосредственной связи. Во всяком слу-

чае, входное и выходное напряжения друг от друга изолированы.

Однако эта схема не единственно возможная — на листках 3 и 4 показаны еще две схемы, позволяющие решить проблему « $2+2=3$ ». Эти схемы уже нельзя назвать ни простейшими, ни естественными. Каждая из них — это своего рода фокус, попытка вместо простого решения задачи выбрать сложное. Действительно, в этих двух последних схемах «смешались в кучу» токи и напряжения входных и выходных цепей. Так, в схеме 3, где общим является вывод «э» (мы обозначили три вывода трансформатора буквами «э», «б» и «к» лишь потому, что схемы 2, 3, 4 чем-то напоминают три основные схемы включения транзистора), во входной цепи циркулирует не только ток, создаваемый самим генератором, но еще и ток, протекающий через нагрузку. Это происходит потому, что в схеме 3 нагрузка оказывается включенной последовательно с генератором и участком эб, в котором находятся генератор и первичная обмотка трансформатора.

(Это особенно хорошо видно на схеме 3', которая является «двойником» схемы 3. На схеме 3' лишь несколько по-иному расположены детали на рисунке, сама же схема осталась без изменений. Благодаря такому «перемещению» элементов схемы их взаимное влияние стало более наглядным.)

При определенном включении обмоток в схеме 3 оба тока — входной и выходной — противофазны (во всех цепях протекает, разумеется, переменный ток, а стрелки показаны лишь для одного из полупериодов; см. стр. 77), и поэтому можно сказать, что схема отличается небольшим входным током, разностью двух встречных токов. Кроме того, напряжение, развиваемое на вторичной обмотке, теперь делится между нагрузкой и участком эб. Это хорошо видно на схеме 3', которая является «двойником» схемы 3. В схеме 3(3') нагрузке достается большая часть выходного напряжения лишь в том случае, если ее сопротивление значительно больше, чем у конкурента — участка эб (Воспоминание № 7).

В схеме 4 (4'), где общим является вывод к, напряжение, развиваемое генератором, делится между первичной обмоткой и участком бк, куда входит вторичная обмотка, поэтому выходное напряжение никак не может быть больше, чем дает генератор.

Мы не будем подробно разбирать, что происходит в двух последних схемах, и ограничимся лишь общим выводом. Ситуация там оказывается достаточно сложной и запутанной. Но подобная путаница, приводящая к искусственному увеличению или уменьшению некоторых токов или напряжений,

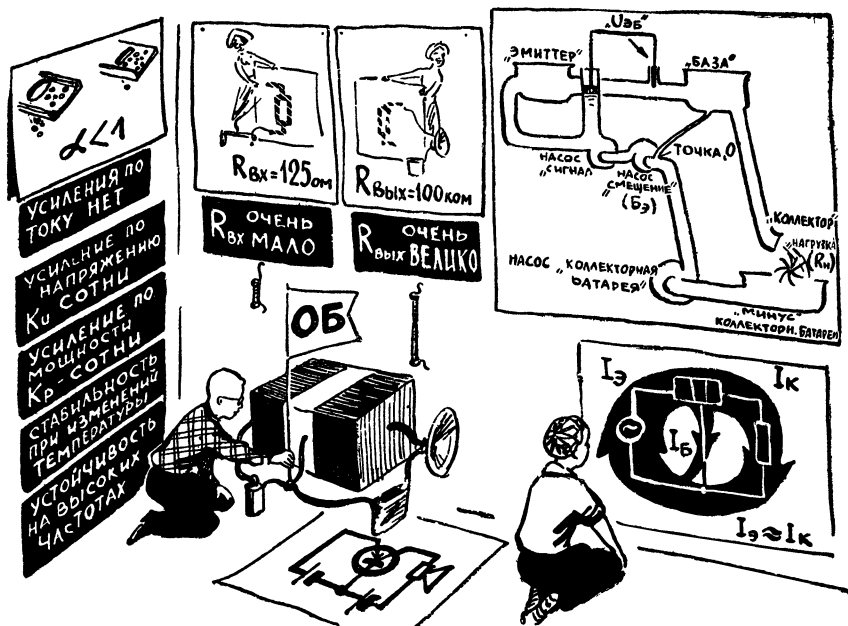


Рис. 66. Схема транзисторного усилителя, о которой до сих пор шла речь, — это схема с общей базой (ОБ).

в ряде случаев оказывается весьма выгодной. И мы в этом сейчас убедимся на примере трех основных схем транзисторных усилителей (рис. 65, листки 5, 6, 7).

Первая схема, с которой мы, собственно говоря, начали знакомство с транзисторным усилителем, — это схема с общей базой, сокращенно ОБ (рис. 66).

Главная особенность схемы ОБ в том, что источник усиленного сигнала и источник смещения включены в цепь, по которой проходит эмиттерный ток. («А разве бывает иначе?» — удивляетесь вы. Да, бывает — очень скоро будет показано, что в двух других схемах через источник сигнала и источник смещения может проходить ток базы I_6 , который во много раз меньше эмиттерного.) То, что источники напряжений $U_{\text{сиг}}$ и $U_{\text{см}}$, которые вместе создают управляющее напряжение $U_{\text{об}}$, находятся в цепи эмиттерного тока, приводит к нескольким очень неприятным последствиям.

Во-первых, эмиттерный ток (в схеме ОБ — это ток входной цепи) является «потолком» для коллекторного тока, а значит, схема ОБ в принципе не может давать усиление по току. Имен-

но к этой схеме (и, кстати, только к этой схеме) относится уже давно сделанный вывод: коэффициент усиления по току α всегда меньше единицы.

Во-вторых, в схеме ОБ источникам, создающим $U_{эб}$, достается не слишком легкая работа — они должны перемещать по входной цепи все заряды, которые создают довольно большой (по величине такой же, как и I_k) эмиттерный ток. И хотя сопротивление эмиттерного $p\bar{n}$ -перехода, включенного в прямом направлении, невелико, но все же от источника смещения и, что особенно неприятно, от источника сигнала требуется сравнительно большая мощность, чтобы продвинуть по своему участку довольно большое количество зарядов, образующих эмиттерный ток.

И, наконец, третье. Как мы уже видели, входное сопротивление транзистора в схеме ОБ (а мы до сих пор знакомились только с этой схемой и входное сопротивление определяли — рис. 56 — именно для нее) оказывается очень небольшим, всего несколько омов или в лучшем случае несколько десятков омов. Такое малое входное сопротивление как раз и получается потому, что в схеме ОБ по входной цепи идет сравнительно большой ток $I_э$. А, как известно из закона Ома (Воспоминание № 3), большой ток как раз и говорит о малом сопротивлении.

Схема ОБ имеет, разумеется, и немало приятных, положительных особенностей. Но сейчас речь не о них. Сейчас нам нужно, не теряя темпа, пока свежи в памяти все недостатки схемы ОБ, найти способ их устранения. Тем более, что сделать это довольно просто. Нужно перенести источники сигнала и смещения в цепь базы и получить таким образом схему с общим эмиттером, или сокращенно ОЭ (рис. 67).

Главная особенность схемы ОЭ в том, что источник сигнала (для краткости в дальнейшем мы будем говорить только об источнике сигнала, полагая, что вместе с ним включен и источник смещения) включен не в эмиттерную, а в базовую цепь и благодаря этому по входной цепи протекает уже не ток эмиттера, а во много раз меньший ток базы.

Прежде чем отмечать достоинства такого включения, поясним, что ничего принципиально нового для самого транзистора оно не дает. Включение транзистора по схеме ОЭ — просто схемный фокус. И хотя это очень интересный фокус, позволяющий улучшить важные показатели транзисторного усилителя, однако же самого принципа работы транзистора схема ОЭ не меняет.

Действительно, поставщиком зарядов для коллекторного тока в схеме ОЭ, так же как и в схеме ОБ, служит эмиттер —

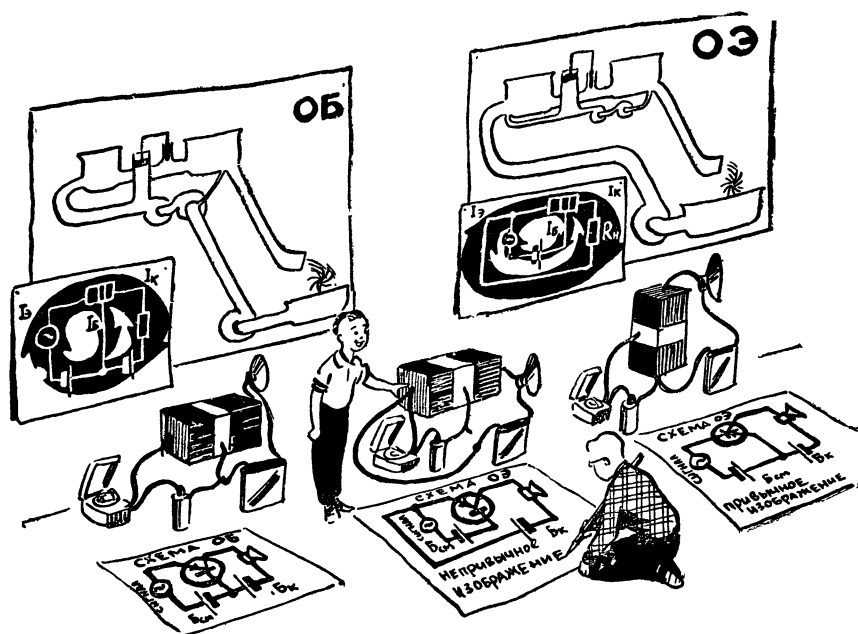


Рис. 67. Основное отличие схемы ОЭ от схемы ОБ в том, что источник сигнала переведен из цепи сравнительно большого эмиттерного тока в цепь небольшого тока базы.

в коллектор может попасть не больше зарядов, чем их вышло из эмиттера. В схеме ОЭ заряды проходят по коллекторной цепи, так же как и в схеме ОБ под действием коллекторного напряжения, и создают мощную копию усиленного сигнала на сопротивлении нагрузки R_n .

Правда, в схеме ОЭ напряжение делится уже не между двумя потребителями, как в схеме ОБ, а между тремя. Кроме самой нагрузки и коллекторного pn -перехода, часть напряжения E_k отбирает еще и эмиттерный pn -переход — ведь в схеме ОЭ коллекторная батарея действует не между коллектором и базой, а между коллектором и эмиттером. Однако появление у коллекторной батареи лишнего «едока» не должно нас смущать — сопротивление эмиттерного перехода очень мало и, как это было бы и в другом подобном делителе (Вспоминание № 7), на малом сопротивлении остается малая часть приложенного напряжения. Одним словом, можно смело считать, что коллекторная батарея в схеме ОЭ, так же как и в схеме ОБ, тратит свои основные силы только на то, чтобы

двигать заряды через коллекторный pn -переход и сопротивление нагрузки.

Теперь вернемся к главной особенности схемы ОЭ — к включению источника сигнала в цепь базы.

Подобный «фокус» на первый взгляд кажется очень подозрительным и вызывает целый ряд сомнений. Не прекратится ли в связи с таким переселением входного сигнала его влияние на эмиттерный pn -переход? А если не прекратится, то будет ли управляющее напряжение в такой же степени, как и в схеме ОБ, управлять эмиттерным, а значит, и коллекторным током? Не окажется ли эмиттерный ток брошенным на произвол? И, наконец, если даже переброска источника сигнала в цепь базы не нарушит работы транзистора, то что даст такая переброска усилителю, как она повлияет на его режим и улучшит ли его основные параметры?

Хочешь не хочешь, а придется отвечать на эти страшные вопросы...

Все, что происходит в любом pn -переходе, в том числе и в эмиттерном, прежде всего зависит от приложенного к этому переходу напряжения: — именно об этом говорит характеристика диода (рис. 19). В схеме ОЭ, точно так же как и в схеме ОБ, управляющее напряжение $U_{эб}$ полностью подводится только к эмиттерному переходу, так как и в той и в другой схеме один вывод источника сигнала подключен к эмиттеру, а второй вывод — к базе (через батарею смещения $B_{см}$). Таким образом, в обеих схемах управляющее напряжение $U_{эб}$ будет в равной степени влиять на величину эмиттерного, а значит, и коллекторного тока. А то, что, полностью сохранив влияние управляющего напряжения на эмиттерный ток, мы умудрились не пропускать этот ток по самой управляющей цепи, это просто наша заслуга. Именно в этом и заключается весь смысл «фокуса» с переброской источника сигнала в цепь базы.

Главное отличие схемы ОЭ от схемы ОБ может в какой-то степени пояснить их гидравлические аналогии, приведенные на рис. 40 и 67. В гидравлических системах ОБ и ОЭ (гидравлические системы названы так же, как и схемы транзисторных усилителей, только для того, чтобы их проще было сравнивать) роль источника управляющего напряжения $U_{эб}$ играют два небольших насоса «Сигнал» и «Смещение». Эти насосы создают давление, под действием которого поршень двигает заслонку «Управляющее напряжение» на пути воды из бака «Эмиттер» в бак «База». Действие этой заслонки уподобляется напряжению $U_{эб}$, которое и управляет эмиттерным током, то есть током, идущим из эмиттера в базу.

В гидравлической схеме ОБ насосы «Сигнал» и «Смещение» не только поднимают или опускают заслонку «Управляющее напряжение», но еще и перемещают весь поток жидкости на небольшом участке «Точка 0»—«Эмиттер».

В гидравлической схеме ОЭ насосы «Сигнал» и «Смещение» освобождены от этой работы — они лишь двигают заслонку «Управляющее напряжение», а всю работу по перемещению жидкости на всем ее пути — от «Эмиттера» до «Эмиттера» — выполняет только насос «Коллекторная батарея».

Именно в том, что насосы «Сигнал» и «Смещение» освобождены от работы по перекачиванию всей воды в бак «Эмиттер» и заняты лишь своим главным делом — регулированием потока из «Эмиттера» в «Базу», именно в этом главное отличие гидравлической системы ОЭ от системы ОБ. Во всем же остальном эти системы очень похожи. Во всяком случае, принцип работы обеих гидравлических систем одинаков.

Насос «Сигнал», затрачивая небольшую мощность (в ОБ она немного больше, в ОЭ немного меньше, но в обеих системах эта мощность невелика), управляет мощным потоком воды «Коллекторный ток». Этот поток создается благодаря тому, что насос «Коллекторная батарея» поднимает воду на высокий уровень. Мощный, падающий с большой высоты «коллекторный ток» вращает турбину «Нагрузка».

Если насос «Сигнал» бездействует, турбину вращает поток неизменной силы — поток покоя, который зависит только от «смещения». Но если ввести в систему слабый гидравлический сигнал и с помощью насоса «Сигнал» периодически перемещать вверх-вниз заслонку «Управляющее напряжение», то интенсивность мощного потока тоже будет меняться. При этом будет меняться и скорость вращения турбины «Нагрузка», создавая своего рода мощную копию всех изменений интенсивности «Сигнала».

Вернемся, однако, к нашим транзисторным усилителям.

О том, что принцип усиления слабого сигнала в схеме ОЭ остается таким же, как и в схеме ОБ, говорит сходство их входных и выходных характеристик. Входные характеристики схемы ОЭ (рис. 68) показывают, что ток эмиттера, ток базы и ток коллектора при изменении управляющего напряжения $U_{эб}$ меняются примерно так же, как и в схеме ОБ. Следует, правда, подчеркнуть, что для ОЭ главной характеристикой нужно и можно считать зависимость от $U_{эб}$ уже не эмиттерного тока, а тока базы $I_б$.

Эту характеристику нужно считать главной потому, что именно ток базы проходит по входной цепи (по цепи источника сигнала) и определяет все происходящие в ней события.

Эту характеристику можно считать главной потому, что ток базы — это часть тока эмиттера, который в итоге определяет события во всем транзисторе. И самое главное то, что ток базы I_b — это не просто часть тока эмиттера I_a , а строго определенная его часть. Так, например, при $\alpha=0,99$ ток базы составляет один процент тока эмиттера. Иными словами, ток эмиттера примерно в сто раз (точнее, в девяносто девять раз) больше тока базы. Если, например, I_b увеличился на 5 мка, то можно смело сказать, что при этом I_a увеличился примерно на 500 мка. А все это означает, что главная входная характеристика схемы ОЭ — зависимость тока базы I_b от управляющего напряжения $U_{эб}$ — одновременно рассказывает, как при изменении $U_{эб}$ меняется ток эмиттера I_a , ток коллектора I_k и в итоге — напряжение на нагрузке U_n .

Выходные характеристики транзистора в схеме ОБ и ОЭ также очень похожи, если не считать некоторых, как правило, второстепенных отличий. Одно из таких отличий — более резкий подъем выходных характеристик, который говорит о том,

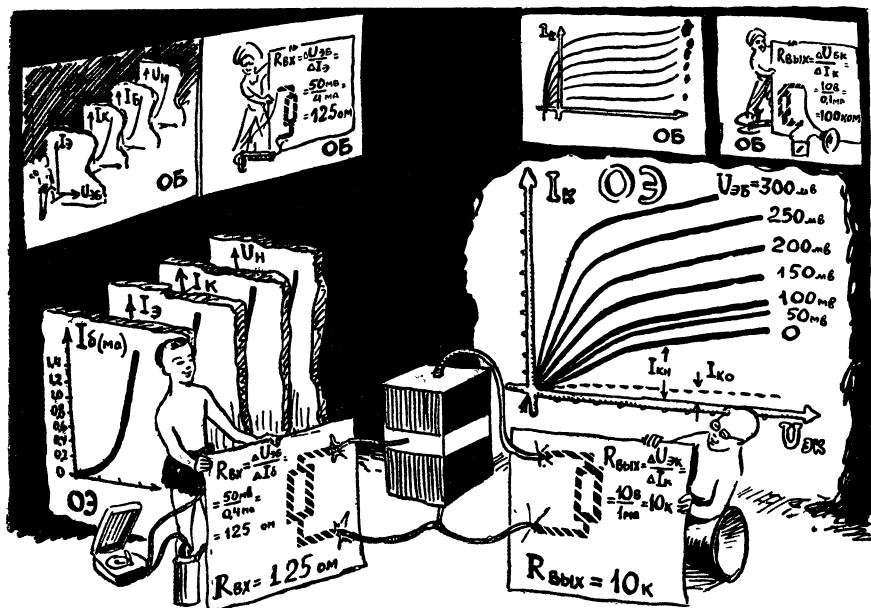


Рис. 68. Входная характеристика транзистора в схеме ОЭ относится уже не к току эмиттера, а к току базы, так как именно он протекает во входной цепи; выходная характеристика несколько круче, чем в схеме ОБ.

что I_k несколько сильнее зависит от коллекторного напряжения, чем в схеме ОБ. Поэтому-то с увеличением $U_{эк}$ (теперь выходные характеристики уже показывают зависимость I_k от напряжения между эмиттером и коллектором) коллекторный ток растет сильнее, чем в схеме ОБ он рос с увеличением $U_{бк}$.

И все же общее, результирующее влияние коллекторного напряжения на коллекторный ток остается очень небольшим, а выходные характеристики схемы ОЭ идут достаточно полого. А поэтому и выходное сопротивление транзисторов в схеме ОЭ хотя и меньше, чем в схеме ОБ, но также остается очень большим, достигая десятков и сотен килоом (рис. 68).

Вот другое отличие выходных характеристик схем ОЭ и ОБ. В схеме ОЭ коллекторный ток прекращается при нулевом напряжении на коллекторе, а чтобы прекратить коллекторный ток в схеме ОБ, нужно было подать на коллектор очень небольшой «плюс». Из-за того, что выходные характеристики в схеме ОЭ начинают загибаться при более высоком напряжении на коллекторе, запрещенная зона «Искажения» для этой схемы оказывается несколько больше.

И, наконец, третье отличие. При нулевом управляющем напряжении $U_{эб}$ коллекторный ток в схеме ОБ — он называется сквозным или начальным током коллектора и обозначается $I_{к-н}$ — значительно больше, чем неуправляемый ток $I_{к0}$ в схеме ОБ. Это опять-таки связано с тем, что некоторая часть коллекторного напряжения приложена к эмиттерному переходу и отпирает его, даже если внешнее управляющее напряжение равно нулю.

Все перечисленные отличия в принципе не меняют «взаимоотношений» между коллекторным током I_k , напряжением на нагрузке U_n и на коллекторе $U_{эк}$, эмиттерным током $I_{э}$, напряжением сигнала $U_{сиг}$, смещением $U_{см}$ и сопротивлением нагрузки R_n . А поэтому выводы, сделанные нами на основании анализа входных и выходных характеристик схемы ОБ (рис. 64), в основном остаются в силе и для схемы ОЭ.

Итак, наш «фокус» удался — перевод источника сигнала в цепь базы в принципе не изменяет работы транзистора. Теперь остается доказать, что игра стоит свеч, что включение транзистора по схеме ОЭ каким-то образом улучшает параметры усилительного каскада.

По сравнению со схемой ОБ у схемы ОЭ есть три основных достоинства. Все они связаны с тем, что по входной цепи схемы ОЭ (то есть через источник усиливаемого сигнала) протекает ток базы, который во много раз меньше эмиттерного тока во входной цепи схемы ОБ (рис. 69). Благодаря резкому уменьшению тока во входной цепи, во-первых, уменьшается



Рис. 69. Коэффициент усиления тока в схеме ОЭ— β , по сути дела, показывает, во сколько раз мы разгрузили входную цепь при переходе от схемы ОБ к схеме ОЭ.

потребляемая в ней мощность, то есть мощность, которую должен отдать усилителю не кто иной, как слабый усиливаемый сигнал. Во-вторых, благодаря уменьшению тока возрастает входное сопротивление, а это, как мы вскоре увидим, резко облегчает согласование усилителя с источником сигнала. И, наконец, третье: поскольку ток базы, который теперь должен создать источник сигнала во много раз меньше эмиттерного, а значит, и коллекторного тока, то схема ОЭ дает не только усиление по напряжению, как схема ОБ, но еще и усиление по току. А в итоге усиление по мощности у схемы ОЭ оказывается значительно больше, чем у схемы ОБ.

Чтобы количественно оценить все выгоды, которые дает схема ОЭ, вводят еще один параметр транзистора — коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером. Этот коэффициент обозначают буквой β (греческая «бета»; существует несколько разновидностей этого коэффициента: одни из них обозначают буквой B , другие — буквой β). Коэффициент β должен показать, во сколько раз мы разгрузили источник сигнала при переводе его из эмиттерной цепи в цепь базы, то есть коэффициент β показывает, во сколько раз при одном

и том же управляющем напряжении ток базы меньше, чем ток эмиттера, или, что почти то же самое (токи I_a и I_k примерно равны), во сколько раз I_b меньше, чем I_k . Определив, например, по входным характеристикам, что при $U_{ab}=200$ мв $I_b=600$ мка (0,6 ма), а $I_a=6$ ма (рис. 54), легко подсчитать, что $\beta=I_a:I_b=100$. Но это примерное, упрощенное определение коэффициента β .

Точное значение коэффициента усиления по току β можно получить, если при неизменном коллекторном напряжении U_{ak} изменять управляющее напряжение U_{ab} и одновременно следить за тем, как изменяются два тока — ток во входной цепи (то есть I_b) и ток в выходной цепи (то есть I_k). Затем, определив прирост того и другого тока ΔI_b и ΔI_k , находим β как их отношение $\beta=\Delta I_k:\Delta I_b$ (рис. 72).

Иными словами, точное (динамическое) значение β показывает, во сколько раз при одном и том же изменении управляющего напряжения U_{ab} изменения выходного тока ΔI_k оказываются больше, чем изменения входного тока ΔI_b . Так, например, определив по входным характеристикам (рис. 54), что при изменении U_{ab} от 200 мв до 250 мв ток базы увеличился на 400 мка (0,4 ма), а ток коллектора примерно на 4 ма, легко найти β как отношение этих приростов: $\beta=4:0,4=10$.

Упрощенное определение коэффициента β , как правило, очень близко к «официальной», измеренной по всем правилам его величине. И это вполне понятно. Во-первых, коллекторный ток почти равен эмиттерному, и с каким бы из этих токов мы ни сравнивали ток базы I_b , результат будет примерно одинаковым. Во-вторых, все токи транзистора «пляшут под дудку» управляющего напряжения — во сколько увеличится или уменьшится U_{ab} , во столько же раз приблизительно увеличатся или уменьшатся сразу все три тока I_a , I_b , I_k . Поэтому-то сравнивать приросты этих токов почти то же самое, что сравнивать и сами токи при одном и том же значении U_{ab} . На сравнении тока базы с током коллектора основано измерение коэффициента усиления по току β в простейших любительских приборах (рис. 70). Существуют простые приборы и для более точного определения β путем сравнения прироста ΔI_k с ΔI_b .

Хотя обычно при определении коэффициента усиления по току мы сравниваем ток базы с током коллектора, этот коэффициент, как уже было сказано, очень хорошо характеризует изменения, которые произошли во входной цепи при переходе от схемы ОБ к схеме ОЭ. Конкретно β показывает, во сколько раз уменьшился ток в цепи источника сигнала (входная цепь усилителя) после того, как по этой цепи стал проходить ток

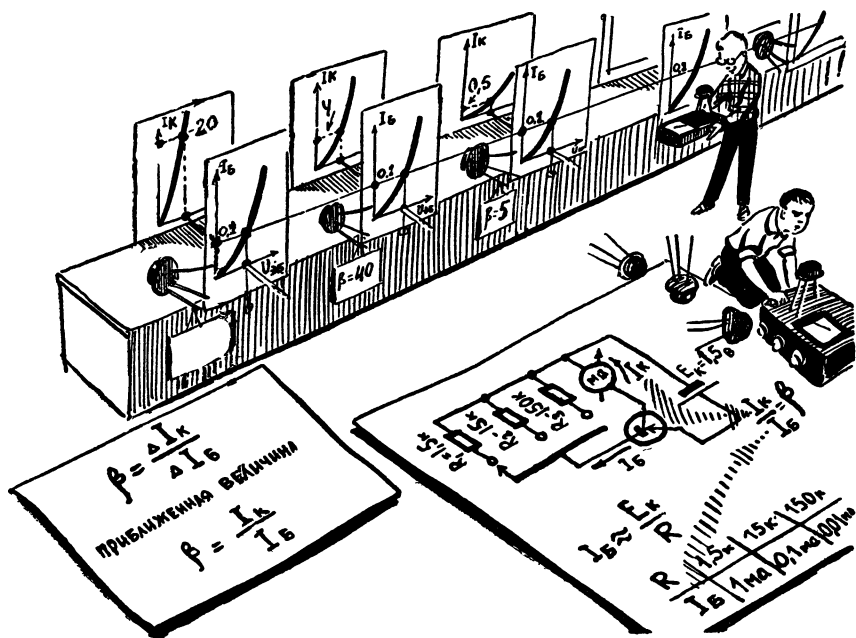


Рис. 70 Примерную величину коэффициента β можно определить с помощью простейших самодельных приборов.

базы вместо тока эмиттера. А показывая уменьшение входного тока, коэффициент β количественно определяет изменение параметров усилителя при переходе к схеме ОЭ.

Вот эти изменения (рис. 71).

Поскольку в β раз уменьшается входной ток, а выходной (коллекторный) остается без изменений, то можно сказать, что транзистор усиливает уже не только напряжение, но еще и ток в β раз. Отсюда и название — коэффициент усиления по току.

Входное сопротивление возрастает примерно в β раз (точнее в $\beta + 1$ раз) опять-таки потому, что в β раз уменьшается входной ток, который определяет это сопротивление. Ничего не поделаешь, закон Ома — $R = U : I$; чем меньше ток, тем, значит, больше сопротивление.

Для управления транзистором от сигнала требуется в β раз меньшая мощность. Опять же потому, что в β раз уменьшается входной ток, определяющий эту мощность. Чем меньше ток, тем меньше мощность — $P = U \cdot I$.

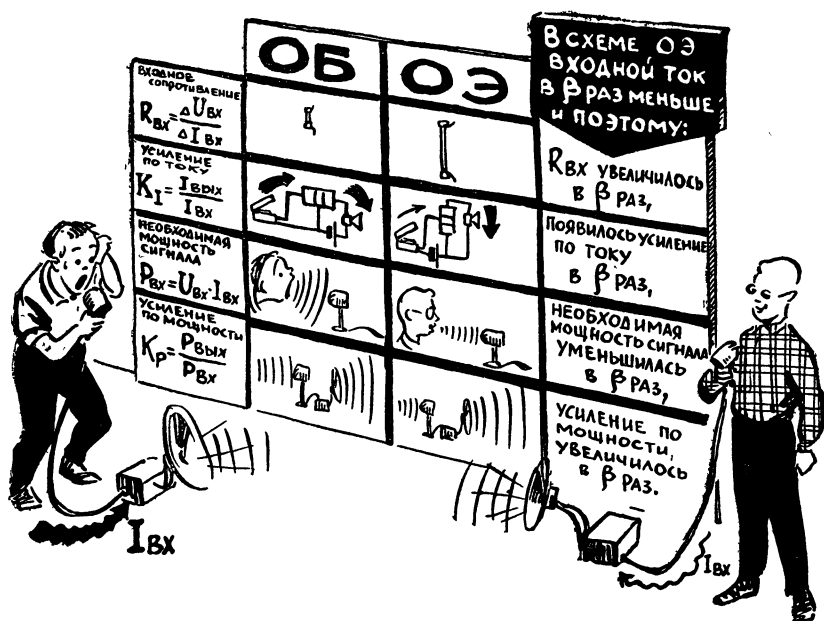


Рис. 71. Входной ток в схеме ОЭ значительно (в β раз) меньше, чем в схеме ОБ, и это приводит к появлению многих ценных качеств схемы с общим эмиттером.

А если в β раз уменьшается входная мощность при неизменной выходной мощности, то, значит, коэффициент усиления по мощности также возрастает в β раз.

Как видите, коэффициент β оказывает сильнейшее влияние на параметры усилителя, и не случайно при выборе транзистора для той или иной схемы любители прежде всего обращают внимание на его коэффициент β , стараясь выбрать транзистор, у которого этот коэффициент побольше.

Нужно сразу же предупредить, что выбирать транзисторы, руководствуясь только одним лозунгом «Дашь бету!», тоже неверно. Во-первых, транзисторы с более высоким β , как правило, стоят дороже, а многие из них не всегда легко достать. И может случиться так, что, применив транзистор с высоким β в схеме, где он не очень нужен или даже совсем не нужен, вы тем самым лишите своего товарища — это ведь неважно, знакомого или незнакомого — возможности применить такой транзистор в схеме, где он необходим.

Во-вторых (если вам еще не достаточно «во-первых!»), при включении транзисторов с высоким β в схему, которая на них

не рассчитана, может произойти не улучшение, а ухудшение параметров этой схемы, вплоть до ее полной непригодности. Это ведь только говорится, что маслом каши не испортишь. А попробуйте на полтарелки каши положить полтарелки масла. Вряд ли вам такое блюдо покажется вкусным, не говоря уж о том, что от него идет прямая дорога к врачу. Вот так и применение транзистора со слишком большим β может иногда привести к неприятным последствиям, превратив, например, усилитель в генератор.

В электронных схемах нужно применять транзисторы с таким коэффициентом β , на который эти схемы рассчитаны. Разумеется, применяя транзисторы с более высоким β , часто можно создавать более эффективные схемы, с лучшими параметрами. Но в то же время не менее интересно при разработке или совершенствовании схем получить хорошие результаты, применяя дешевые и доступные транзисторы с низким коэффициентом β .

Кстати говоря, коэффициент β так же, как и коэффициент α , говорит о том, какая часть эмиттерного тока используется для создания коллекторного тока, а какая часть уходит через базу. Но только α показывает, какую часть от I_e составляет I_k , а коэффициент β показывает, во сколько раз ответвляющийся в базу ток β меньше основного тока I_k . Поскольку коэффициенты α и β характеризуют один и тот же процесс разделения I_e на две части (примерно так же период колебаний и частота характеризуют один и тот же процесс), то эти коэффициенты связаны друг с другом, и, зная один из них, можно легко подсчитать другой (рис. 72).

Схема с общим эмиттером имеет серьезные достоинства (усиление по току, большое усиление по мощности и сравнительно высокое входное сопротивление) и серьезные недостатки. Однако ничего плохого о схеме ОЭ мы сейчас говорить не будем. И совсем не потому, что собираемся замалчивать ее недостатки — о них еще будет особый разговор. Мы не будем говорить о недостатках схемы ОЭ, потому что в большинстве случаев с ними удастся вести эффективную борьбу, и не стоит умалять поэтому важные достоинства схемы. Освобожденная от недостатков и не утратившая достоинств схема ОЭ является основной схемой транзисторных усилителей.

И все же схема с общим эмиттером — только основная практическая схема, но никак не единственная. В ряде случаев она уступает место уже хорошо знакомой нам схеме с общей базой или схеме с общим коллектором (схема ОК; рис. 73), с которой нам сейчас предстоит познакомиться.

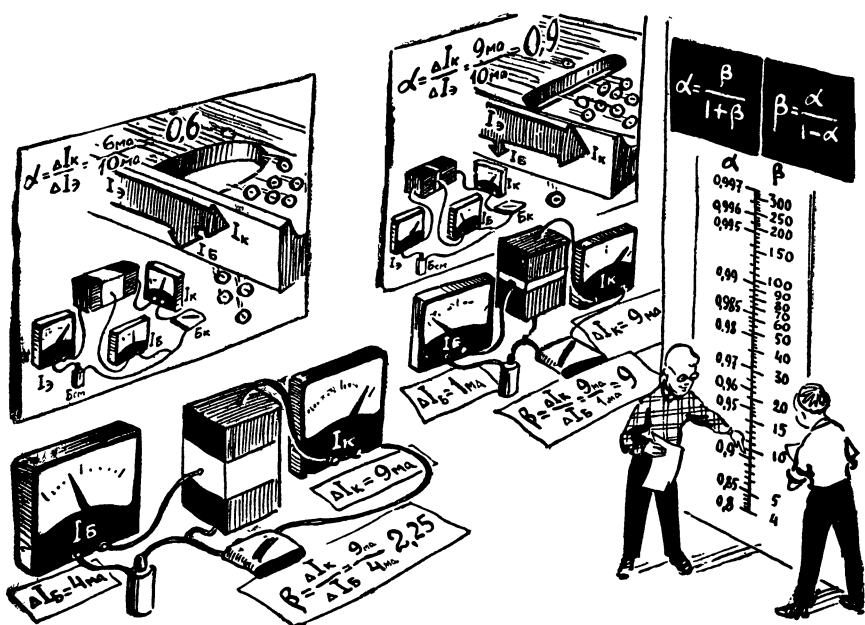


Рис. 72. Оба коэффициента — α и β — по-разному характеризуют одно и то же: ответвление части эмиттерного тока в базу.

Кстати, эту схему иногда называют «эмиттерный повторитель».

Привыкнув к тому, что в схемах ОБ и ОЭ усиливается напряжение, следовало бы прежде всего назвать усилитель, работающий по схеме ОК, не усилителем, а ослабителем. Действительно, в схеме ОК управляющее напряжение подводится к своеобразному делителю, в который входит сопротивление нагрузки R_n и эмиттерный pn -переход транзистора. Для того чтобы возникновение этого делителя стало более наглядным, на одном из листов рис. 73 база транзистора несколько вытянута и изогнута. Это, разумеется, лишь графический трюк, который никакого отношения к устройству транзистора не имеет. Этот трюк нужен для того, чтобы на самом рисунке поставить в один ряд эмиттерный pn -переход и нагрузку R_n , а затем наглядно показать их подключение к источнику сигнала в виде делителя напряжения. Напряжение входного сигнала $U_{вх}$, подведенное к делителю, делится между его участками — между эмиттерным pn -переходом и нагрузкой R_n .

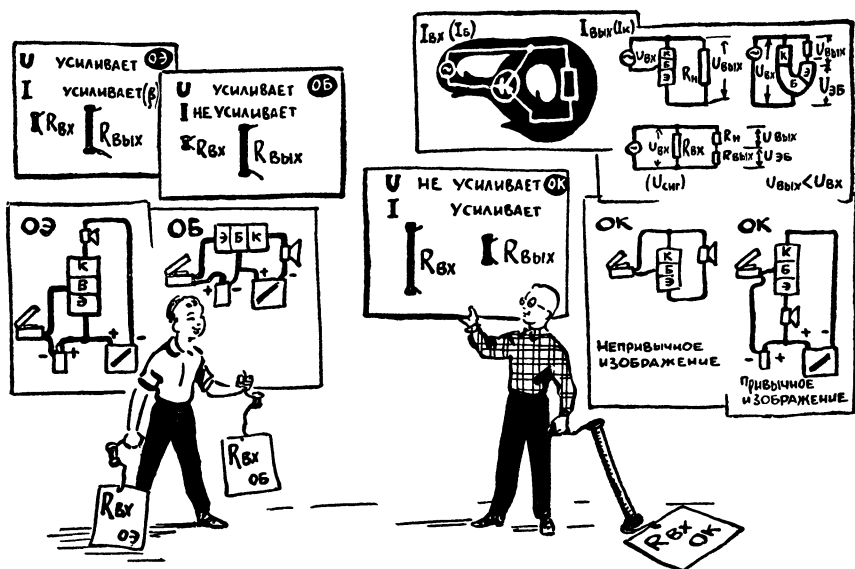


Рис. 73. Главная особенность схемы с общим коллектором (ОК) — высокое входное сопротивление.

Поэтому на долю нагрузки приходится переменное напряжение $U_{\text{вых}}$, которое никак не больше, чем $U_{\text{вх}}$, а напротив, даже меньше его. Именно так — часть напряжения сигнала остается на эмиттерном pn -переходе, выходное напряжение всегда меньше, чем входное напряжение, то есть схема ОК ослабляет напряжение. С этим как раз и связано название «эмиттерный повторитель» — схема не усиливает напряжение сигнала, а лишь повторяет его, оставляя неизменным (практически $U_{\text{вых}}$ лишь незначительно меньше, чем $U_{\text{вх}}$).

Так же как это было и при знакомстве со схемой ОЭ, сразу же возникает куча вопросов. Для чего нужен такой схемный фокус? Зачем подавать входной сигнал не на его законное место, не на эмиттерный переход, а туда, где входному сигналу вообще нечего делать, — на переход база-коллектор (вспомните в схему: именно между базой и коллектором включен источник сигнала). Как же в такой схеме входной сигнал может управлять коллекторным током, если этот сигнал лишен своего командного поста — эмиттерного pn -перехода? Для чего нужно превращать схемы, которые усиливают напряжение, в схему, которая его ослабляет? Если так уж

хочется ослабить сигнал, зачем для этого транзистор — достаточно делителя, составленного из двух резисторов!

Ответив на эти вопросы, можно прийти к выводу, что схема ОК работоспособна, что она обладает некоторыми достоинствами и в ряде случаев просто незаменима.

Внимательно познакомившись со схемой ОК, убедимся, что «с ходу» мы приписали ей лишний недостаток — схема действительно не усиливает напряжения, но и почти не ослабляет его. Все дело в том, что сопротивления участков делителя, на который работает источник сигнала, сильно различаются по величине. Сопротивление эмиттерного $p\text{-}n$ -перехода мало, во много раз меньше, чем сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$. Поэтому нагрузке достается почти все напряжение сигнала $U_{\text{сиг}}$, а значит — входное и выходное напряжения усилителя примерно равны.

А что же делает оставшаяся часть сигнала, что делает напряжение $U_{\text{эб}}$? Оно, как и всякое напряжение, приложенное к эмиттерному переходу, управляет эмиттерным, а значит, и коллекторным током. Таким образом, входной сигнал выполняет свои управляющие функции, хотя, конечно, направляет на это дело лишь небольшую часть своего напряжения.

То, что усилитель, работающий по схеме ОК, не усиливает напряжение, еще не дает оснований называть его ослабителем. Мы уже давно договорились (стр. 92), что об усилении можно судить, только сравнив входную и выходную мощность. А такое сравнение как раз говорит о том, что схема ОК имеет все права называться усилительной. Почти не уменьшая напряжения, схема ОК примерно в β раз усиливает ток, а значит, примерно в β раз усиливает мощность. Правда, нам еще остается доказать, что в схеме ОК ток действительно усиливается в β раз. Но это уже не сложно.

Источник сигнала в схеме ОК, так же, кстати, как и в схеме ОЭ, включен в цепь, по которой проходит ток базы $I_{\text{б}}$. А по нагрузке, как всегда, проходит ток коллектора $I_{\text{к}}$, который в β раз больше, чем $I_{\text{б}}$. Ток базы в схеме ОК проходит по довольно длинному пути (через источник сигнала, нагрузку и эмиттерный переход), но сути дела это не меняет — ток в выходной цепи больше, чем ток во входной цепи, а значит, происходит усиление по току.

Можно сказать, что «в общем плане» схема ОК, которая усиливает ток, но не усиливает напряжение, ничем не хуже схемы ОБ, которая усиливает напряжение, но не усиливает ток. Однако эта разница — ток вместо напряжения — приводит к резкому различию входного и выходного сопротивления

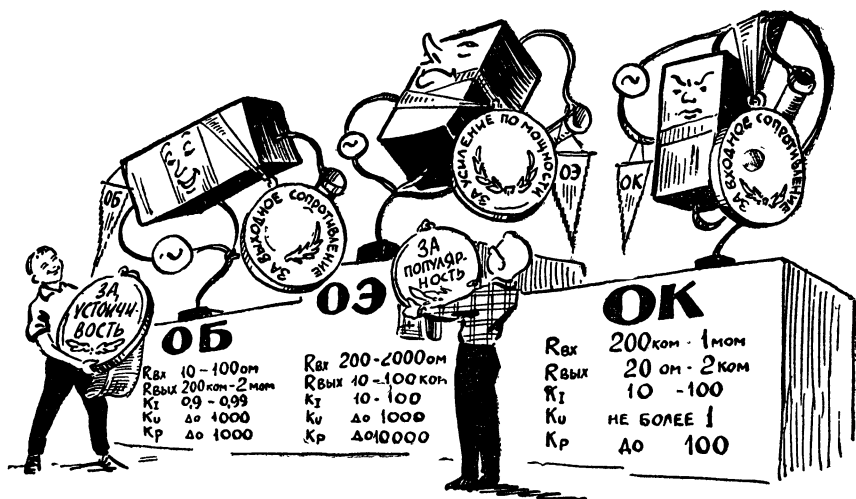


Рис. 74 Каждая из трех схем включения транзистора имеет свои достоинства, но в большинстве случаев отдают предпочтение схеме ОЭ за сочетание многих ценных качеств.

схем ОБ и ОК. Схема ОБ обладает очень низким входным и очень высоким выходным сопротивлением (рис. 56, 58), а схема ОК — очень высоким входным сопротивлением и сравнительно низким выходным.

То, что схема ОК имеет высокое входное сопротивление в упрощенном виде, объясняется так: ток базы, как обычно, мал, входное напряжение стало довольно большим, а это значит, что входное сопротивление схемы ОК велико. Практически оно составляет сотни килоом.

Значительно меньше оказывается выходное сопротивление, показывающее, как меняется в нагрузке сквозной ток при изменении напряжения между эмиттером и коллектором. Динамическое выходное сопротивление обычно составляет несколько сотен или десятков ом.

На этом, пожалуй, можно закончить рассказ о том, как в транзисторных усилителях решается проблема « $2+2=3$ » и как три разных ее решения дают разные, со своими достоинствами и недостатками, результаты (рис. 74). Сравнение трех основных схем транзисторных усилителей ОБ, ОЭ и ОК говорит о том, что, хотя «по сумме многоборья» на первое место выходит схема с общим эмиттером, две остальные имеют свои собственные, никем из конкурентов не побитые рекорды.

КАК ЧИТАТЬ РАДИОСХЕМЫ

Сейчас трудно определить, кто первый придумал этот заголовок — «Как читать радиосхемы», — но можно с уверенностью сказать, что ему уже не один десяток лет. Под таким заголовком вышло множество плакатов, статей и книжек, и, по-видимому, всякий, кто в итоге все же научился читать схемы, начинал именно с одного из таких пособий.

К сожалению, довольно часто попытка научить чтению радиосхем не идет дальше рассказов о самой азбуке — о тех условных обозначениях, с помощью которых на бумаге изображаются конденсатор, резистор или переключатель. Не зная азбуки, читать нельзя — это факт. Но знание азбуки, знание условных обозначений, представляется лишь ничтожно малой частью того, что нужно для чтения радиосхем.

Чтобы прочесть схему, чтобы по запутанному чертежу быстро представить себе сложное электронное устройство и все происходящие там процессы, нужно многое знать и уметь. И, конечно, прежде всего нужно знать законы электрических цепей и уметь применять их при разборе конкретных схем.

Прежде чем учиться читать конкретные, практические схемы, полезно познакомиться с некоторыми общими, абстрактными решениями, с некоторыми принципами построения схем. Один из таких принципов — это разделение цепей постоянного и переменного тока, которое осуществляется, например, для того, чтобы элементы этих цепей не оказывали вредного влияния друг на друга. Сейчас на примере входных и выходных цепей транзисторного усилителя мы попытаемся выяснить, чем вызвано, что дает и как осуществляется такое разделение. Но еще перед этим придется попутно решить небольшую задачу, связанную с питанием самого транзистора.

До сих пор в наших схемах работало два источника постоянного тока — коллекторная батарея B_k и батарея смещения $B_{см}$. Однако в реальных схемах этот «дуэт» встречается редко. При разработке схем всегда стараются выбросить батарею смещения и обойтись одной коллекторной батареей. О том, что так можно поступить, говорят цифры: напряжение на коллекторе обычно составляет 4—12 в, а напряжение смещения, как правило, лежит в пределах от 0,1 в до 0,5 в. Значит, задача сводится к тому, чтобы просто уменьшить напряжение и получить необходимое смещение от коллекторной батареи, не освобождая ее при этом от основных обязанностей.

На рис. 75 приведены три упрощенные схемы, показывающие, каким образом коллекторная батарея практически может

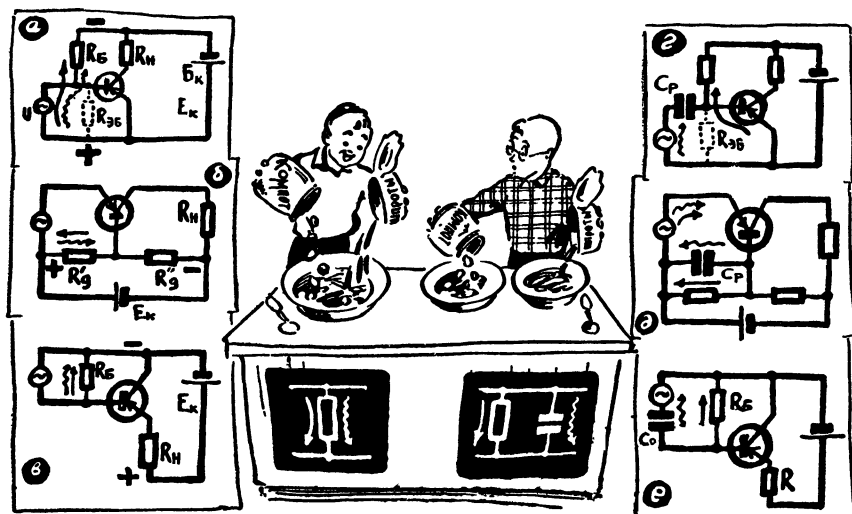


Рис. 75. Отрицательное смещение на базу можно подать от коллекторной батареи, разделив при этом постоянную и переменную составляющие входного тока.

выполнять работу по совместительству — как она может одновременно с питанием коллекторной цепи еще и создавать смещение в схеме ОЭ (листок *а*), в схеме ОБ (листок *б*) и в схеме ОК (листок *в*).

В схеме ОЭ проще всего получить смещение от коллекторной батареи, если ее «минус» через добавочный резистор соединить с базой. При этом резистор R_6 вместе с сопротивлением $R_{эб}$ эмиттерного pn -перехода образует делитель, на котором распределяется все напряжение коллекторной батареи E_k . На долю самого эмиттерного перехода приходится некоторая часть E_k , а именно — напряжение $U_{см}$, нужную величину которого можно установить подбором резистора R_6 . Чем больше сопротивление R_6 , тем меньшая часть общего напряжения достается эмиттерному переходу, тем меньше $U_{см}$ (рис. 76).

Итак, подбором резистора R_6 в цепи базы мы можем установить нужное по величине смещение. Но не напрасны ли будут наши старания? Попадает ли это смещение на базу в нужной полярности? Окажется ли на базе «минус» относительно эмиттера?

«Плюс» коллекторной батареи оказывается подключенным к эмиттеру, самой нижней точке делителя, образованного резистором R_6 и эмиттерным переходом. На всех более высоких

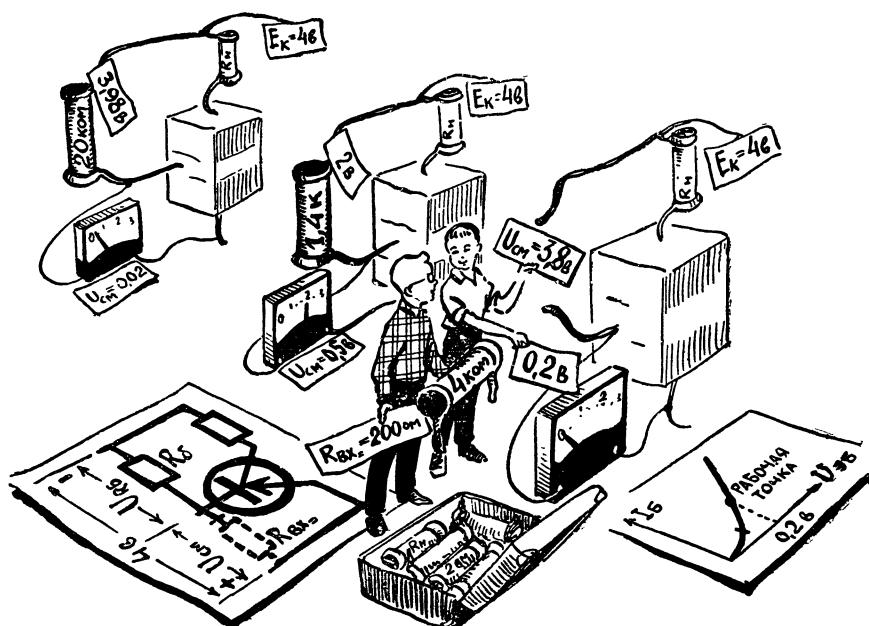


Рис. 76. Изменяя сопротивление резистора, через который на базу подается «минус», можно установить нужное начальное смещение.

точках этого делителя действует «минус» относительно этой самой нижней точки. А это, в свою очередь, означает, что напряжение $U_{см}$ приложено «плюсом» к эмиттеру и «минусом» к базе, то есть именно так, как должно быть приложено к эмиттерному переходу отпирающее его начальное смещение.

Примечание. При разборе схем часто пользуются выражениями «вверх», «вниз», «вправо», «влево», которые, разумеется, можно относить лишь к данному конкретному изображению. Эти выражения нужны для того, чтобы как можно проще и как можно короче рассказать о полярности тех или иных напряжений или направлений тех или иных токов. Однако найденные таким простейшим способом полярности напряжений и направления токов существуют в действительности. Если вы, например, определите на схеме-чертеже, что в точке *a* действует «плюс» относительно расположенной вправо от нее точки *b* и если вы в реальной, смонтированной схеме найдете эти точки, то *a* действительно будет иметь «плюс» относительно *b*, но уже, конечно, при любом их взаимном расположении. А если вы определите,

что в данной начерченной схеме ток идет налево от точки m к точке n , то и в монтаже ток будет идти в том же направлении — от m к n , но уже, конечно, независимо от того, где будет «право», а где «лево».

Итак, своеобразный делитель из R_6 и $R_{эб}$ позволяет подать часть коллекторного напряжения на базу в качестве начального отрицательного смещения. Аналогично с помощью делителя напряжения можно получить смещение от коллекторной батареи и в схеме ОБ (рис. 75, листок б). Только здесь элементом делителя, на котором образуется $U_{см}$, является уже не $R_{эб}$, а специально введенный в схему резистор $R'_д$. Меняя соотношение между элементами делителя — резисторами $R'_д$ и $R''_д$, можно менять и само смещение. Чем больше $R'_д$ по сравнению с $R''_д$, тем большая часть общего напряжения E_k достается участку база — эмиттер, тем, следовательно, больше $U_{см}$. В схеме ОБ полярность полученного смещения тоже станет такой, какой она и должна быть: «плюс» приложен к эмиттеру, «минус» — к базе.

Почти так же, как и в схеме ОЭ, может быть получено смещение и в схеме ОК (листок в). Здесь, правда, коллекторное напряжение E_k распределяется на делителе, состоящем уже из трех участков: из добавочного сопротивления R_6 , сопротивления эмиттерного pn -перехода $R_{эб}$ и сопротивления нагрузки R_n . Но это не меняет существа дела: участку эмиттер — база, так же как в схеме ОЭ, достается некоторое напряжение $U_{эб}$ нужной полярности («плюс» на эмиттере, «минус» на базе), которое и является смещением. Величину напряжения $U_{эб}$ можно установить, подбирая сопротивление R_6 . Однако в схеме ОК при этом возникают некоторые «побочные явления»: одновременно с изменением смещения меняется и постоянное напряжение на нагрузке, а значит, и напряжение $U_{бк}$, которое после дележа достается «хозяину» батареи B_k — коллектору. Точно так же при изменении самой нагрузки меняется и доля коллекторного напряжения, которая достается сопротивлению эмиттерного pn -перехода, то есть меняется смещение.

Все три схемы, о которых только что шла речь, — это упрощенные схемы, причем в них сделано несколько упрощений. Самое серьезное, пожалуй, заключается в том, что введение новых цепей смещения сделано без учета параметров источника сигнала. А может так получиться, что этот источник либо нарушит нормальную работу цепи смещения, либо, наоборот, сам окажется ее жертвой. Собственно говоря, нам и раньше следовало обратить внимание на то, как уживутся в общей

входной цепи источник сигнала и источник смещения. Ну, а сейчас выяснить возможность и, если понадобится, выработать условия их сосуществования просто необходимо.

Начнем со схемы ОЭ. Вполне вероятно, что источник сигнала обладает очень небольшим сопротивлением для постоянного тока (если, например, напряжение $U_{\text{сиг}}$ снимается с контурной катушки или тем более с некоторой ее части), сильно шунтирует сопротивление $R_{\text{эб}}$. При этом общее сопротивление нижней части делителя может уменьшиться во много раз, и для того, чтобы сохранить нужную пропорцию деления напряжения E_k , необходимо будет уменьшить и R_6 . В итоге общий ток, который пойдет через делитель $R_6 R_{\text{эб}}$, возрастет и это, естественно, сократит срок службы коллекторной батареи.

Еще хуже обстоит дело в схеме ОК, где источник сигнала шунтирует резистор R_6 , имеющий довольно большое сопротивление (чтобы $U_{\text{см}}$ было в несколько раз меньше, чем коллекторное напряжение, сопротивление резистора R_6 должно быть в несколько раз больше, чем $R_{\text{эб}}$). В результате такого шунтирования от большого сопротивления резистора не остается и следа (Воспоминание № 8), а напряжение смещения резко возрастает.

Совсем другого рода неприятность может возникнуть в схеме ОБ. Здесь источник сигнала оказывается включенным последовательно с резистором R'_d , и он «пожирает» значительную часть входной мощности, которая должна была бы стать достоянием только самого *pn*-перехода.

Все эти неприятности в принципе могут быть устранены довольно просто — достаточно с помощью простейших *RC* фильтров отделить источник сигнала от источника смещения, разделить во входной цепи переменный и постоянный токи. На рис. 75 (листки *г, д, е*) показано, как такое разделение может осуществляться.

В схеме ОЭ (листок *г*) источник сигнала подключается ко входу транзистора через разделительный конденсатор C_p . Его емкость выбрана с таким расчетом, чтобы даже на самой низкой из усиливаемых частот емкостное сопротивление конденсатора было небольшим (если x_c мало на низких частотах, то на высоких оно еще меньше. Воспоминание № 13) и чтобы на нем не терялось столь нужное нам напряжение сигнала. С другой стороны, для постоянного тока конденсатор обладает бесконечно большим сопротивлением, и поэтому цепочка источник сигнала — конденсатор C_p по постоянному току входную цепь практически не шунтирует. Цепь смещения как

бы существует сама по себе, а цепь переменного напряжения (сигнала) тоже сама по себе.

Аналогично в схеме ОК (листок *е*) резистор R_6 освобождается от шунтирующего влияния источника сигнала благодаря подключению его к транзистору через конденсатор C_p .

В схеме ОБ (листок *д*) разделительный конденсатор C_p соединяет источник сигнала с эмиттером помимо резистора R'_d . Емкость конденсатора выбирают так, чтобы его емкостное сопротивление (опять-таки на самых низких частотах) было очень мало, во всяком случае во много раз меньше, чем R'_d . Можно считать, что для переменного тока этого резистора нет вообще и нижний конец источника сигнала соединен непосредственно с базой. В то же время для постоянного тока в схеме все остается без изменений, так как для постоянного тока практически безразлично, есть конденсатор C_p в схеме или его нет совсем.

Убедившись на примере источников смещения и сигнала в том, что иногда просто невозможно обойтись без разделения цепей постоянного и переменного тока и что оно осуществляется довольно просто, перейдем к другим цепям усилителя, где также необходимо произвести операцию разделения.

Прежде всего подключим конденсатор фильтра C_Φ (рис. 77) параллельно коллекторной батарее B_k и освободим ее таким образом от переменной составляющей коллекторного тока. Правда, батарея B_k обладает очень небольшим внутренним сопротивлением $R_{вн}$, и переменный ток идет через нее довольно легко. Но, несмотря на это, конденсатор C_Φ во многих схемах необходим: когда батарея «стареет», ее внутреннее сопротивление растет, и во избежание неприятностей (самовозбуждение многокаскадного усилителя, см. стр. 303) переменную составляющую коллекторного тока лучше пропустить мимо батареи.

Следующий наш шаг будет таким: мы попытаемся выделить в чистом виде переменное выходное напряжение $U_{вых}$, которое возникает на нагрузке R_n .

По нагрузке R_n проходит коллекторный ток, меняющийся под действием входного сигнала, и неизменный, когда этого сигнала нет. Точно так же, когда сигнала нет, на нагрузке действует постоянное напряжение $U_{н=}$, а с появлением сигнала оно меняется «вверх» и «вниз» от постоянного. А это значит, что напряжение U_n содержит и постоянную $U_{н=}$ и переменную $U_{н\sim}$ составляющие. Но только одну из них — переменную составляющую — можно назвать выходным сигналом. Постоянная составляющая никому не нужна, даже если она

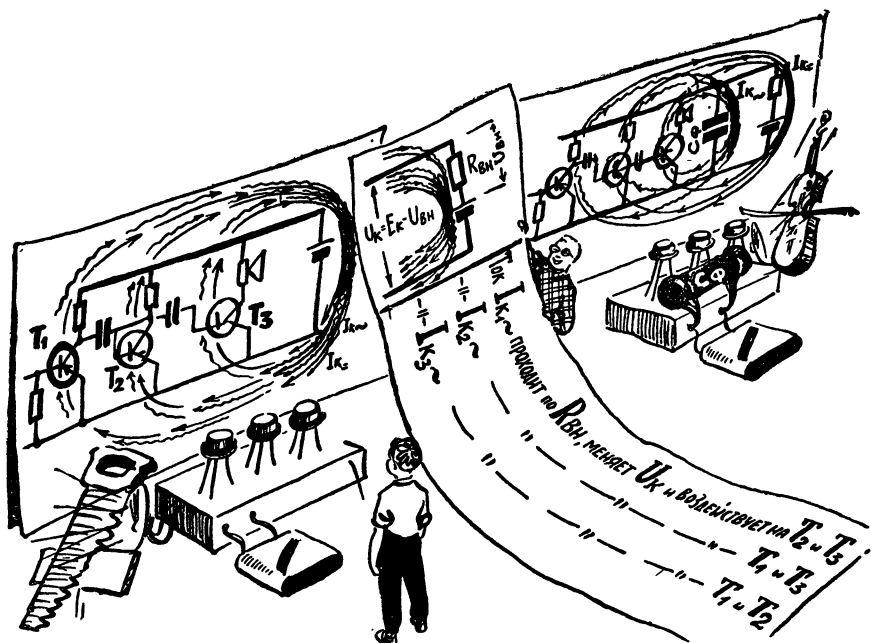


Рис. 77. Чтобы предотвратить взаимную связь каскадов через источник питания, необходимо зашунтировать его конденсатором, по которому будут замыкаться переменные составляющие коллекторных токов.

идет в виде бесплатного приложения. Мы хотим получить на выходе усилителя только переменное напряжение потому, что сам усиливаемый сигнал — это тоже только переменное напряжение, без всяких бесплатных добавок.

Выделить выходной сигнал в чистом виде можно с помощью простейшего фильтра, в который входит само сопротивление нагрузки R_n и цепочка $R_n \sim C_p$ (рис. 78). Эта цепочка подключена параллельно R_n , и осуществляется такое соединение следующим образом. Один конец цепочки $R_n \sim C_p$ соединен с коллектором, а другой — с эмиттером. Между коллектором и эмиттером включена и нагрузка R_n : ее верхний (по схеме) конец также подключен к коллектору, а другой — соединен с эмиттером для переменного тока (часто говорят «по переменному току») через конденсатор C_p .

Цепочка $R_n \sim C_p$ — это, по сути дела, делитель напряжения, возникающего на нагрузке. Некоторая часть этого напряжения достается конденсатору C_p , а другая часть — резистору R_n . Однако один из участков делителя, а именно конденсатор C_p

имеет разное сопротивление для постоянного и переменного тока. Поэтому постоянная $U_{н=}$ и переменная $U_{н\sim}$ составляющие напряжения $U_{н}$ на нагрузке распределяются на делителе $R_{н\sim} C_p$ неодинаково.

Постоянная составляющая полностью приложена к конденсатору, так как его сопротивление постоянному току бесконечно велико. А чем больше сопротивление какого-либо участка делителя, тем большая часть напряжения ему достается.

С переменной составляющей все наоборот: емкостное сопротивление конденсатора мало (именно так выбрана его емкость), и почти вся переменная составляющая $U_{н\sim}$ приложена к резистору $R_{н\sim}$. Это и есть переменное выходное напряжение $U_{вых}$ «в чистом виде».

Обо всем этом можно сказать и иначе. Под действием напряжения $U_{н}$, приложенного к цепочке $R_{н\sim} C_p$, в ней возникает ток. Но постоянный ток в этой цепочке под действием постоянной составляющей $U_{н=}$ не возникнет. Его не пропустит конденсатор C_p , который для постоянного тока представляет

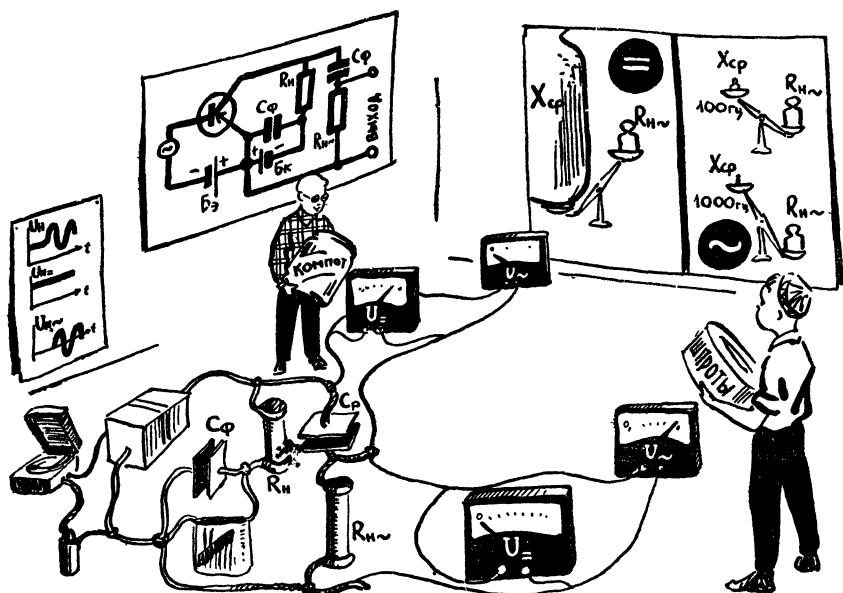


Рис. 78. Для того чтобы получить выходной сигнал в чистом виде, нужно с помощью простейшего фильтра отделить его от постоянного напряжения на нагрузке.

собой разрыв цепи. Поэтому по цепочке $R_{н\sim}C_p$ идет лишь переменный ток, созданный переменной составляющей напряжения $U_{н\sim}$. Предполагается, что емкость конденсатора достаточно велика и он не оказывает сопротивления переменному току. Таким образом, переменный ток встречает лишь сопротивление резистора $R_{н\sim}$ и именно на нем создает напряжение $U_{вых}$. Оно-то является выходным сигналом, очищенным от постоянной составляющей.

Разделение постоянных и переменных составляющих во входных и в выходных цепях приводит к появлению в нашем электронном государстве двух самостоятельных государств — в усилителе появляются самостоятельные цепи постоянного и переменного тока. И хотя они входят в единый электронный узел — транзисторный усилитель, — у каждой из этих цепей есть свои неприкосновенные территории и даже может быть своя «столица»: своя собственная общая (заземленная) точка.

Так, в частности, сказав, что усилитель выполнен по схеме ОБ, мы указываем лишь общую точку для входного и выходного сигнала, то есть общую точку для переменного тока. И совсем не обязательно, чтобы база была местом встречи выходных и входных цепей постоянного тока.

Как правило, большинство цепей электронного прибора сходится к одному из выводов источника питания — в транзисторном усилителе к «плюсу» коллекторной батареи. И волею большинства этот «плюс» оказывается общим проводом, на который удобно ориентироваться при монтаже схем и особенно при их изучении. Поскольку к «плюсу» коллекторной батареи подключается и заземление, если оно, конечно, предусмотрено в данной схеме, то общий «плюсовый» провод очень часто называют «землей». А если какой-нибудь элемент схемы соединен с этой «землей», то о нем так и говорят — «заземленный резистор», или «заземленный конденсатор», или, наконец, «заземленный коллектор».

Одна и та же точка схемы может быть заземленной по переменному току и не быть заземленной по постоянному или наоборот. При монтаже на металлическом шасси к нему всегда подключается этот самый общий, заземленный провод, и тогда заземлить ту или иную деталь — это значит просто соединить ее с корпусом. При монтаже на изоляционной пластинке часто прокладывают земляную шину — толстый оголенный провод, к которому удобно подключать детали, расположенные в разных концах монтажа (рис. 44—2).

Вы уже знаете, что соединение с общей «землей» (металлическое шасси, монтажная шина) имеет свое условное обо-

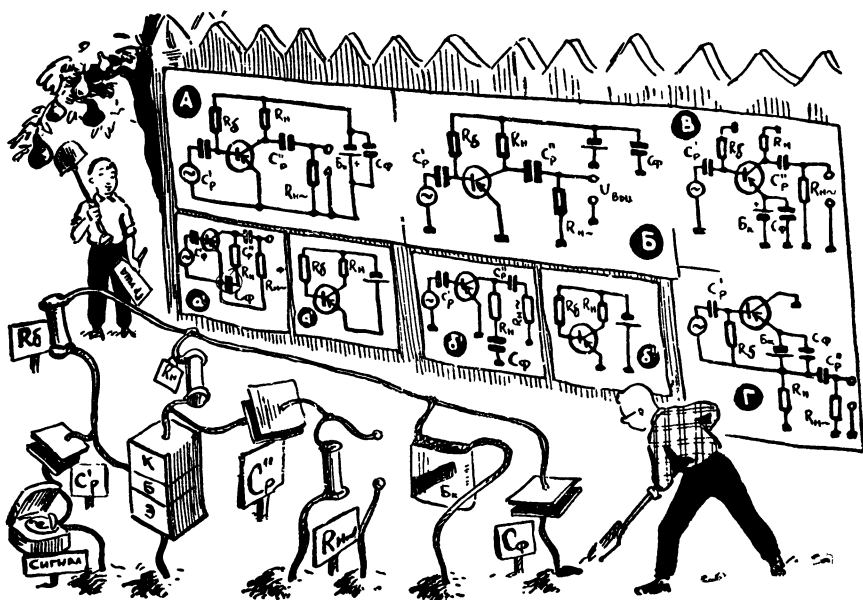


Рис. 79. Общий провод, к которому подключаются многие элементы схемы, часто называют «землей».

значение — небольшой черный прямоугольник. Разумеется, все прямоугольники «земля» на одной и той же схеме нужно представить себе соединенными единым, общим проводом. Научиться проследивать электрические цепи, которые проходят через «землю», может быть, и не очень просто, но научиться этому необходимо для всякого, кто хочет читать радиосхемы.

На листках А, Б, В, Г рис. 79 показано несколько вариантов одной и той же схемы. Первый из них (листок А) нам уже хорошо известен — это типичный усилитель по схеме ОЭ, элементы которого встречались на рис. 75 и на рис. 78. В качестве пояснения к схеме отдельно изображены цепи постоянного тока (листок а'') и переменного тока (листок а') этого усилителя. На листке Б вы видите другое изображение предыдущей схемы: вместо общего провода, соединенного с «плюсом» коллекторной батареи, изображено несколько соединений с корпусом, несколько заземлений.

На примере схем А и Б легко проследить пути перехода от

одного способа изображения общего провода к другому. Но, конечно, не в этом состоит наша главная задача. Она прежде всего сводится к тому, чтобы показать, как один и тот же элемент может быть заземленным по переменному току и не быть заземленным по постоянному.

На листке *В* приводится еще один вариант той же схемы, хотя на практике почти и не встречающийся, но для учебных целей очень удобный. В этом варианте заземлен не «плюс», а «минус» батареи, и поэтому эмиттер, который должен быть соединен с «плюсом», уже нельзя заземлить по постоянному току. Но по переменному току эмиттер по-прежнему остается заземленным — он соединен с «землей» («корпусом») через конденсатор C_{ϕ} . Поэтому, как и прежде, остаются заземленными источник сигнала и резистор $R_{н\sim}$. В схемах *А* и *Б* они соединялись с эмиттером непосредственно или через «землю» («корпус»), а в схеме *В* соединение этих элементов с эмиттером осуществляется через «землю» и через конденсатор C_{ϕ} .

Обратите внимание вот на что: вместо «плюса» батареи мы заземлили «минус», и это повлекло за собой целый ряд изменений. Пришлось заземлить верхние концы резисторов R_{ϕ} и $R_{н\sim}$, отключить от «земли» эмиттер. Но резистор $R_{н\sim}$ и источник сигнала как были заземленными, так и остались — постоянный ток по этим элементам вообще не идет, а переключение полюсов батареи касается только цепей постоянного тока.

Может быть, кому-нибудь наши опыты по распутыванию запутанных схем кажутся скучными. Не станем против этого возражать. Есть люди, которые считают, что самое интересное в мире дело — это раскладывание пасьянса, а другим расшифровка языка дельфинов представляется интересным занятием. Не будем открывать дискуссию по этому поводу, не будем спорить о том, от какой работы человек получает наибольшее удовлетворение. Отметим лишь со всей определенностью, что, не научившись разбираться в схемной путанице, вы никогда не освободитесь от страха перед электронной аппаратурой, не почувствуете, что электроника — это действительно очень просто.

В заключение еще один вариант нашей схемы (листок *Г*), где заземлен не «плюс» батареи и даже не ее «минус», а сам коллектор. Это, однако, не означает, что вместо схемы ОЭ мы получили ОК — источник сигнала как был включенным между эмиттером и базой, так и остался (его нижний вывод для этого пришлось отключить от «земли», куда теперь присоединен коллектор), в то время как в схеме ОК источник сигнала дол-

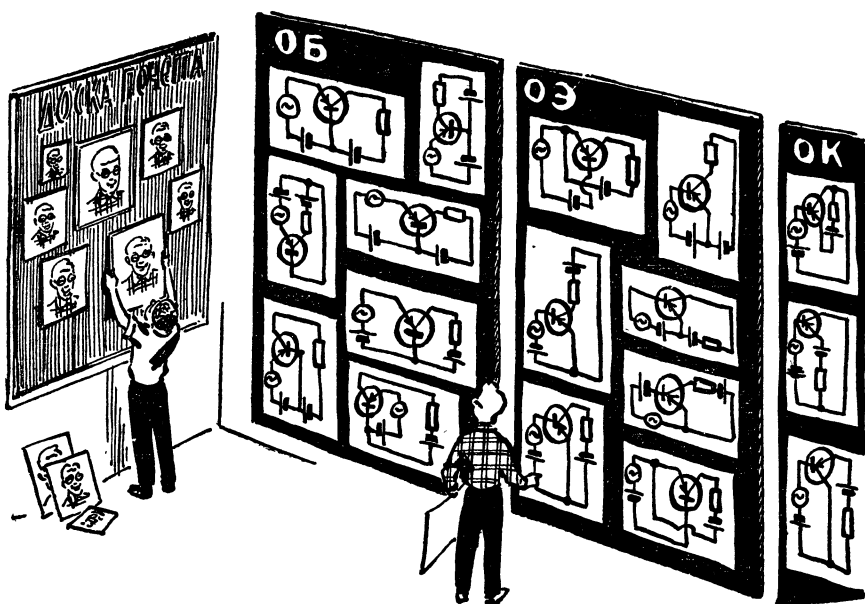


Рис. 80. Разное расположение деталей при вычерчивании одной и той же схемы может создать впечатление, что на рисунке разные схемы.

жен быть включен между базой и коллектором. Легко обнаружить сходство с двумя предыдущими схемами и для всех остальных цепей постоянного и переменного тока.

Если вы знаете буквы и умеете читать, то прочтете любое слово, как бы оно ни было написано — слева направо, сверху вниз или даже «вверх ногами». Разбирая радиосхемы, часто приходится решать задачи, напоминающие чтение «вверх ногами».

Существует множество вариантов размещения на схеме-чертеже деталей одной и той же электрической цепи. И не всегда просто узнать в том или ином начертании схем своих старых добрых знакомых. К сожалению, нельзя дать простые рецепты, как привести незнакомую, казалось бы, схему к знакомому виду, — это дело времени, опыта и сообразительности. В качестве первой и сравнительно легкой тренировки попробуйте рассмотреть три упрощенные схемы ОБ, ОЭ, ОК на рис. 80 несколькими разными способами. На этом рисунке отличие схем одного «семейства» только в том, как расположены детали на самом чертеже.

Освоившись с приемами, пусть самыми простыми, разделения и объединения цепей постоянного и переменного тока, мы сделали очень важный шаг в познании общих свойств, общих методов построения транзисторных усилителей. Очень важный шаг, но, к сожалению, еще не последний.

НАША ЦЕЛЬ — ОПТИМИЗАЦИЯ

Проблема, с которой приходится сталкиваться во всех без исключения транзисторных усилителях, и не только в транзисторных и даже не только в усилителях,— это проблема согласования генератора с нагрузкой. Здесь оба понятия — «генератор» и «нагрузка» — имеют самый широкий смысл. Генератор — это любое устройство, любая электрическая цепь, которая отдает энергию. Нагрузка — любое устройство, любая цепь, которая эту энергию потребляет. Генератором является, например, микрофон, а его нагрузкой — входная цепь транзистора, к которой этот микрофон подключен. Генератором является и выходная цепь транзистора, работающего на громкоговоритель или какую-либо другую нагрузку.

Количество энергии, которое генератор передает нагрузке, зависит не только от того, кто дает энергию, но и от того, кто ее берет. То, что генератор может в принципе отдать, например, 100 вт, еще совсем не означает, что нагрузка эти 100 вт сможет у него отобрать. И напряжение, которое генератор создаст на нагрузке, и ток в цепи, а поэтому и мощность, которую нагрузка получит от генератора,— все это зависит от того, насколько они будут согласованы, а конкретно — от того, насколько согласованы собственные сопротивления R_n и R_r нагрузки и генератора.

Проблема согласования генератора с нагрузкой, согласования источника энергии с ее потребителем, имеет весьма общий и, если хотите, даже философский смысл. Рассказывая об этой проблеме, можно было бы привести немало интересных примеров из самых разных областей. Можно было бы, например, вспомнить, что мощность, которую развивает автомобильный двигатель, используется тем лучше, чем больше грузов везет автомобиль, но что перегружать машину бессмысленно. Можно было бы вспомнить и о том, что польза, которую приносит человек-работник, зависит не только от его сил и способностей, но еще и от подобранной работы. Слишком легкое дело и делать неинтересно, и толку от этого мало. Но в то же время вы вряд ли принесете пользу, взвалив на себя

работу не по плечу, взявшись за дело, в котором ничего не понимаете.

Важность согласования генератора с нагрузкой можно было бы показать и на других примерах, взятых из техники, экономики, политики, взятых из самой жизни. Но мы не будем уходить в столь далекие области и обсудим проблему согласования на более простом примере — на примере обычной электрической лампочки.

Если вы спросите у продавца электромагазина, чем отличается лампочка на 60 *вт* от лампочки на 40 *вт*, то он хотя и обидится за праздный вопрос, но все же ответит (такая уж у продавца работа): лампочки отличаются тем, что одна горит значительно ярче другой. Но давайте попробуем не удовлетвориться таким ответом, а выяснить, почему лампочка на 60 *вт* горит ярче, чем лампочка на 40 *вт*, по каким своим характеристикам отличаются лампочки. И пусть об этом отличии расскажут не слова «ярче» или «слабее», а цифры.

Прежде всего договоримся, что к обоим лампочкам во всех случаях жизни подводится одно и то же напряжение, скажем для круглого счета, 120 *в*. Ясно, что, для того чтобы при одинаковом напряжении отобрать из электрической сети разную мощность, нужно пропустить через лампочки разный ток. Из известного выражения для мощности нетрудно вывести и формулу для подсчета этого тока $I = P : U$ (Воспоминание № 4).

Теперь подсчитаем, что через сорокаваттную лампочку идет ток около 0,33 *а* ($40 : 120 \approx 0,33$), а через шестидесятиваттную 0,5 *а* ($60 : 120 = 0,5$). А то, что при одном и том же напряжении через лампочки идет разный ток, может означать только одно: лампочки имеют разное сопротивление. Выполнив простейший расчет по одной из формул закона Ома ($R = U : I$), найдем, что сопротивление сорокаваттной лампочки около 360 *ом* ($120 : 0,33 \approx 360$), а сопротивление шестидесятиваттной лампочки 240 *ом* ($120 : 0,5 = 240$).

Итак, лампочки, отбирающие от источника энергии разную мощность, отличаются только сопротивлением: чем меньше сопротивление лампочки, тем больший ток по ней идет, тем большую мощность она отбирает от источника.

Не торопитесь, однако, на основании нашего примера делать общий вывод: «Чтобы повысить отбираемую от генератора мощность, надо уменьшать сопротивление нагрузки». Вывод этот будет справедлив лишь до некоторого предела. Если постепенно уменьшать сопротивление нагрузки, то неизбежно наступит момент, когда отбираемая ею у генератора мощность не только не будет расти, но даже, наоборот, начнет

уменьшаться. Чтобы понять, почему это происходит, придется вспомнить еще об одном герое, о котором мы пока умалчивали,— о внутреннем сопротивлении генератора.

В нашем примере генератор — это электрическая сеть, внутреннее сопротивление которой очень мало: практически оно составляет десятые и даже сотые доли ома. Чтобы не путаться со столь малыми цифрами и не потерять суть дела среди всех вычислений, перенесем все события в некоторую условную электрическую цепь, где действует генератор с более удобными для вычислений показателями, например, с внутренним сопротивлением $R_r = 2 \text{ ом}$ и электродвижущей силой $E = 6 \text{ в}$. Подключая к этому генератору разную нагрузку — например, лампочки с разным сопротивлением, — будем вычислять ток в цепи, напряжение, которое достается нагрузке, и отбираемую ею от генератора мощность.

Результаты таких вычислений, сделанных для семи разных сопротивлений нагрузки, приведены на рис. 81, и по этим результатам можно сделать исключительно важный и общий для всех систем генератор — нагрузка вывод: генератор передает в нагрузку наибольшую мощность, когда ее сопротивление равно внутреннему сопротивлению генератора, то есть когда $R_r = R_n$. Такой режим принято называть оптимальным, то есть наиболее выгодным, а сопротивление нагрузки, при котором получается этот наиболее выгодный режим, — оптимальным сопротивлением $R_{n-опт}$. Если сопротивление нагрузки сделать больше оптимального, то напряжение на ней возрастет, но уменьшится ток в цепи. При этом ток падает резче, чем растет напряжение, и в результате уменьшается мощность. Если сопротивление нагрузки сделать меньше оптимального, то ток в цепи возрастет, а напряжение на нагрузке упадет, и опять-таки в итоге уменьшается мощность на нагрузке.

Выбор сопротивления нагрузки зависит от того, что нужно потребителю: если, например, нужно большое напряжение, то следует включить R_n больше, чем $R_{n-опт}$, мирясь при этом с уменьшением полученной от генератора мощности. Если, наоборот, нужен большой ток, то сопротивление R_n нужно брать поменьше и опять-таки знать, что при этом отбираемая нагрузкой мощность будет меньше, чем могла бы быть при оптимальной нагрузке. Если сопротивление генератора значительно больше, чем сопротивление нагрузки ($R_r \gg R_n$), то говорят, что в цепи действует генератор тока. В этом случае ток в цепи мало зависит от R_n и при разных нагрузках оказывается примерно одинаковым. А если, наоборот, сопротивление генератора значительно меньше, чем сопротивление нагрузки ($R_r \ll R_n$), то говорят, что в цепи действует генератор напря-

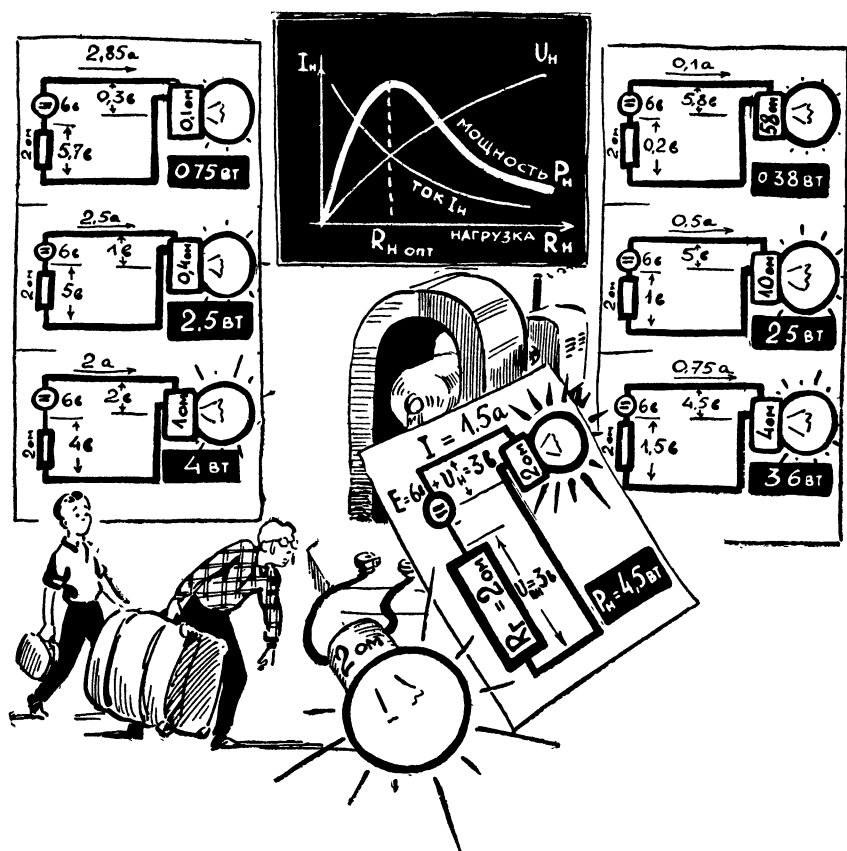


Рис. 81. Напряжение на нагрузке, ток в цепи и отбираемая у генератора мощность зависят от того, как нагрузка согласована с генератором.

жения, потому что почти вся э. д. с. достается нагрузке и напряжение на ней мало зависит от самого R_n .

Чаще всего мы будем стремиться к оптимальному режиму, к тому, чтобы передать от генератора в нагрузку наибольшую мощность. А для этого нужно согласовать нагрузку с генератором, сделать так, чтобы их сопротивления R_n и R_r были равны.

Но легко сказать «Добьемся согласования!», и не всегда легко его добиться. Особенно большие трудности возникают в транзисторном усилителе, где на каждом шагу встречаются в одной «упряжке» генератор и нагрузка с совершенно

разными характерами, с совершенно разными сопротивлениями $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{г}}$. Проблема согласования при этом становится чуть ли не самой важной, и от того, насколько успешно и насколько просто она решена, в огромной мере зависит решение главной задачи усиления сигнала. Сейчас мы познакомимся с несколькими типичными попытками примирения генератора с нагрузкой, попытками согласовать их сопротивления.

Если один транзистор не в состоянии обеспечить нужное усиление, то усилительные каскады соединяют, как говорят маленькие дети, «паровозиком» и усиливают сигнал в несколько этапов, передавая его, подобно эстафете, с одного каскада на другой.

Для простоты представим себе двухкаскадный усилитель (рис. 82), где сигнал передается из выходной цепи первого каскада во входную цепь второго каскада. Отвлекаясь от того, что происходит с сигналом до и после этого, можно считать выход первого каскада генератором сигнала, а вход второго каскада — нагрузкой. О том, насколько в данном случае велики трудности согласования, можно судить хотя бы по рис. 74, где в числе других данных указаны входные и выходные сопротивления разных усилительных схем. Вы видите, что для наиболее популярной схемы ОЭ выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ больше входного $R_{\text{вх}}$ в десятки и сотни раз. Еще хуже обстоит дело в схеме ОБ — здесь $R_{\text{вых}}$ может быть больше, чем $R_{\text{вх}}$ чуть ли не в миллион раз.

Итак, входное сопротивление транзистора в наиболее распространенной схеме ОБ сильно отличается от выходного сопротивления — такова сама природа схемы. А это, в свою очередь, означает, что в многокаскадном усилителе из предыдущего каскада в последующий передается меньше энергии, чем при оптимальной связи между ними. Это, конечно, неприятно, но, как говорится, не смертельно. Выигрыш от введения дополнительного усилительного каскада всегда можно сделать больше проигрыша, неизбежного при передаче энергии из одного каскада в другой.

(Если, конечно, не испортить дело каким-либо неудачным схемным решением. Например, неудачным выбором конденсатора связи C_p между каскадами. Емкость этого конденсатора должна быть достаточно большой. Настолько большой, чтобы на самой низкой из усиливаемых частот емкостное сопротивление конденсатора C_p было значительно меньше, чем входное сопротивление $R_{\text{вх}-2}$ транзистора. Потому, что конденсатор и входное сопротивление транзистора образуют своего рода делитель напряжения, на котором делится на две части сигнал, получаемый от предыдущего каскада. И чем меньше емкостное

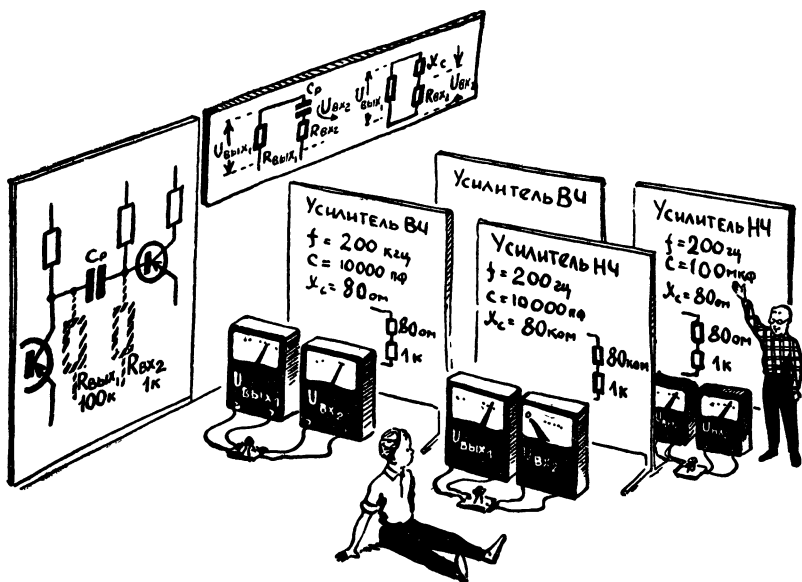


Рис. 82. Низкое входное сопротивление транзисторного усилителя трудно согласовать с высоким выходным сопротивлением предыдущего каскада.

сопротивление конденсатора C_p по сравнению с входным сопротивлением транзистора, тем большая часть сигнала достанется входной цепи транзистора и будет управлять его коллекторным током (рис. 82).

Теперь попробуем пойти по другому пути: попытаемся согласовать высокое выходное сопротивление транзисторного усилителя (часто говорят «высокоомный генератор») с нагрузкой, имеющей малое сопротивление (часто говорят «низкоомная нагрузка»), при помощи трансформатора. Согласующий трансформатор используют, в частности, в выходном каскаде усилителя низкой частоты (НЧ), который работает на динамический громкоговоритель с сопротивлением звуковой катушки 5—15 Ω (таблица 11). И хотя мы сейчас не пытаемся знакомиться с конкретными транзисторными усилителями, роль согласующего трансформатора все же удобно будет рассмотреть именно на этом примере.

Мы привыкли к тому, что трансформатор повышает или понижает напряжение и ток, а сейчас в этот комплект нужно будет включить еще и сопротивление.

Сам процесс передачи энергии из первичной обмотки транс-

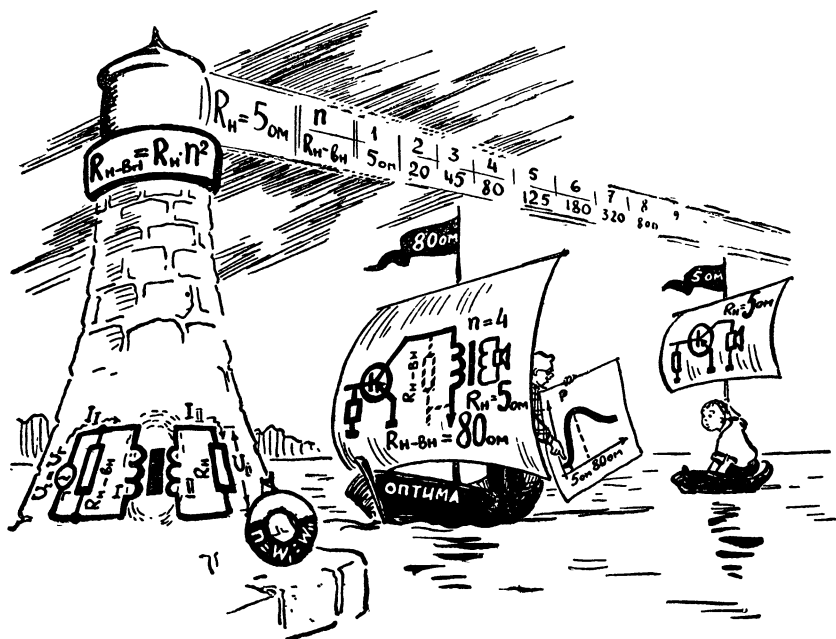


Рис. 83. Небольшое сопротивление громкоговорителя, включенное в коллекторную цепь через понижающий трансформатор, вносит в эту цепь достаточно большое сопротивление (нагрузку).

форматора во вторичную (рис. 83) можно представить в виде электротехнического варианта знаменитой сказки «Дом, который построил Джек». К первичной обмотке трансформатора подводится переменное напряжение, которое создает в этой обмотке переменный ток, под действием которого возникает охватывающее обе обмотки переменное магнитное поле, которое наводит во вторичной обмотке электродвижущую силу, которая создает во вторичной обмотке ток, величина которого тем больше, чем меньше включенное во вторичную обмотку сопротивление. Но это еще только половина сказки.

Во второй ее половине следовало бы рассказать, каким образом все, что происходит во вторичной обмотке, бумерангом возвращается обратно в первичную. Ток во вторичной обмотке создает свое собственное переменное магнитное поле. Оно наводит электродвижущую силу в обмотке I, а следовательно, создает в ней ток I_1 . Именно этот ток I_1 , наведенный из вторичной обмотки, является главным действующим лицом в первичной — разорвите цепь обмотки II, прекратите в ней

ток, и практически до нуля упадет и ток в обмотке I. А иначе и быть не может. Сам трансформатор для себя никакой энергии не берет (если не считать небольших потерь в сердечнике и в проводах), и потребляемый им ток I_1 зависит только от сопротивления нагрузки R_n , хотя она непосредственно в цепь генератора не включена.

Чтобы как-то отразить влияние R_n на потребляемый трансформатором ток, удобно считать, что из вторичной обмотки в первичную вносится некоторое сопротивление $R_{н-вн}$. Это своего рода «рука вторичной обмотки», определяющая величину тока I_1 в первичной обмотке. А поскольку этот ток I_1 в конечном итоге зависит от нагрузки R_n , то можно сказать, что вносимое сопротивление $R_{н-вн}$ также определяется сопротивлением R_n . Чем меньше R_n , тем больше ток I_{II} и, следовательно, ток I_1 . А увеличение тока в первичной цепи можно истолковать как уменьшение сопротивления $R_{н-вн}$. Иными словами, чем меньше R_n , тем меньше и $R_{н-вн}$. И наоборот, с увеличением R_n возрастает и $R_{н-вн}$.

Изучая события в цепи первичной обмотки, очень удобно, позабыв о всех подробностях, считать вносимое сопротивление $R_{н-вн}$ истинной нагрузкой генератора.

Для нас самое важное то, что это сопротивление вносится из вторичной обмотки в первичную не «так на так». В зависимости от коэффициента трансформации n , то есть в зависимости от соотношения витков в обмотках, сопротивление $R_{н-вн}$ может быть либо больше R_n , либо, наоборот, меньше его. Это легко понять и без строгого анализа. Напряжения и токи в первичной и вторичной обмотках могут быть разными, а где разные токи и напряжения, там жди и разных сопротивлений.

Соотношение между коэффициентом трансформации n и сопротивлениями R_n и $R_{н-вн}$ можно вывести довольно просто, выполнив несколько элементарных алгебраических операций. Мы же поступим еще проще — найдем соотношение между этими величинами из простого числового примера. Предположим, что в коллекторную цепь транзистора включен понижающий трансформатор с такими данными: число витков первичной обмотки $w_1 = 1000$, вторичной — $w_{II} = 250$. Будем считать, что коэффициент трансформации $n = 1000 : 250 = 4$. (Принято считать, что коэффициент трансформации n — это отношение $w_{II} : w_1$, а не наоборот, и поэтому для понижающих трансформаторов n всегда меньше единицы. Но поскольку пользоваться этой малой величиной при расчетах не очень удобно, мы допустим некоторую вольность, считая, что в нашем понижающем трансформаторе $n = w_1 : w_{II}$, а не $w_{II} : w_1$.)

Предположим, что на первичной обмотке действует пере-

менное напряжение $U_1 = 4$ в, а в цепь вторичной обмотки включен громкоговоритель с сопротивлением звуковой катушки $R_H = 5$ ом.

Зная коэффициент трансформации $n = 4$, нетрудно подсчитать, что $U_{II} = U_I : n = 4 \text{ в} : 4 = 1 \text{ в}$. При таком напряжении через R_H пойдет ток $I_{II} = U_{II} : R_H = 1 \text{ в} : 5 \text{ ом} = 0,2 \text{ а}$. А значит, ток в первичной обмотке $I_I = I_{II} : n = 0,2 \text{ а} : 4 = 0,05 \text{ а}$.

Теперь, если вы еще не забыли закон Ома, можно подсчитать и вносимое сопротивление: $R_{H-вн} = U_I : I_I = 4 \text{ в} : 0,05 \text{ а} = 80 \text{ ом}$. Оно оказалось в шестнадцать раз больше, чем R_H . На рис. 83 показаны результаты подобного расчета и для разных коэффициентов трансформации. Пользуясь этими результатами, легко прийти к выводу, что, включив сопротивление через понижающий трансформатор, мы как бы увеличили это сопротивление, причем увеличили его в n^2 раз, где n — коэффициент трансформации, равный $w_I : w_{II}$. А отсюда еще один вывод: понижающий трансформатор позволяет согласовать низкоомную нагрузку с генератором, имеющим высокое внутреннее сопротивление, и, в частности, согласовывать низкоомный динамический громкоговоритель с большим выходным сопротивлением транзистора.

Иногда согласующий трансформатор применяют и для межкаскадной связи — он позволяет идеально согласовать малое входное сопротивление транзисторного усилителя с большим выходным сопротивлением предыдущего каскада. А то, что во многих случаях конструкторы отказываются от межкаскадного согласующего трансформатора, часто связано лишь с его сравнительно высокой стоимостью. Поэтому оказывается выгодней применить вместо трансформатора пару резисторов и конденсатор, отказавшись от оптимального согласования.

Трансформаторная связь применяется для согласования низкоомного входного сопротивления транзистора с другим высокоомным генератором, колебательным контуром (рис. 84).

В радиоприемнике колебательный контур получает энергию непосредственно из антенны или из коллекторной цепи усилителя высокой частоты. Не задумываясь над тем, что происходит до контура, его можно считать генератором, который, как обычно, передает энергию потребителю — детектору или входной цепи следующего каскада. Давайте посмотрим, как в этом последнем случае осуществляется согласование генератора с нагрузкой.

Внутреннее сопротивление контура-генератора зависит от того, как к нему подключить нагрузку. Если подключить R_H параллельно контуру, то он ведет себя как генератор с очень большим эквивалентным сопротивлением — десятки, а иногда

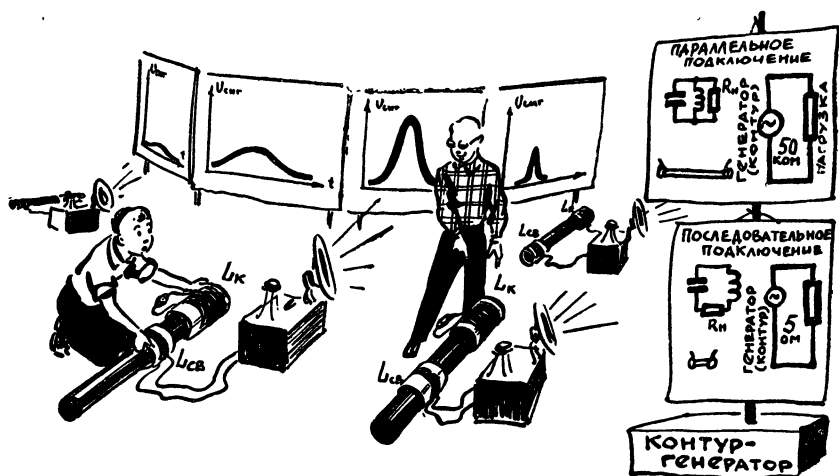


Рис. 84. Для того чтобы низкое входное сопротивление транзистора не шунтировало контур, приходится ослаблять связь между ними.

сотни *ком* (верхний листок). Если включить нагрузку в контур последовательно, то он уже представляется генератором с очень небольшим (буквально несколько *ом*) внутренним сопротивлением (нижний листок). Оба варианта для нас невыгодны — при параллельном подключении к контуру его сопротивление слишком велико, а при последовательном — слишком мало (Воспоминание № 19). А поскольку именно с этим сопротивлением нужно согласовывать нагрузку и поскольку такой нагрузкой является транзистор, можно сказать, что последовательно в контур можно включать входную цепь транзистора, если ее сопротивление очень мало, а параллельно контуру можно подключать входную цепь транзистора, если ее сопротивление очень велико.

Сравнение разных возможностей согласования входной цепи транзистора с колебательным контуром показало, что лучше всего подключать к нему параллельно усилитель по схеме ОЭ, входное сопротивление которого обычно составляет несколько килоом. Однако подключить такое сопротивление непосредственно к контуру нельзя, так как при этом мы не получим никакого согласования. Контур, имеющий эквивалентное сопротивление десятки килоом, отдаст транзистору намного меньше энергии, чем мог бы. Но это, пожалуй, еще не самое страшное — потери энергии можно как-нибудь восполнить, например, включив в усилитель еще один каскад.

Шунтирование контура малым входным сопротивлением транзистора влечет за собой еще одну неприятность, последствия которой устранить уже не так просто. При шунтировании контура ухудшается его добротность Q (Воспоминание № 19). А в результате уменьшения Q притупляется резонансная кривая, и контур почти совсем перестает выполнять свою основную работу — перестает выделять сигнал принимаемой станции. Иными словами, шунтируя колебательный контур, мы ухудшаем его избирательность.

Согласование колебательного контура с входной цепью транзистора чаще всего осуществляется с помощью понижающего трансформатора. При этом сопротивление $R_{н-вн}$, как мы уже знаем, оказывается больше, чем сопротивление $R_{н}$, и контур шунтируется в меньшей степени, чем это было бы при непосредственном его подключении к транзистору.

Роль первичной обмотки согласующего трансформатора прекрасно выполняет сама контурная катушка $L_{к}$. Рядом с ней располагают катушку связи $L_{св}$, которая представляет собой не что иное, как вторичную обмотку трансформатора. Чем меньше витков у катушки связи, тем больше коэффициент трансформации, тем больше сопротивление $R_{н-вн}$, шунтирующее контур, тем, следовательно, выше его добротность. Но, с другой стороны, уменьшая число витков катушки $L_{св}$, мы понижаем и напряжение на ней, то есть понижаем напряжение сигнала $U_{сиг}$ на входе транзистора.

В отличие от трансформатора, на стальном сердечнике в высокочастотном согласующем трансформаторе можно менять вносимое сопротивление еще одним способом — сближая либо раздвигая катушки $L_{к}$ и $L_{св}$. Именно таким способом, как правило, окончательно подбирают наивыгоднейшую, оптимальную связь. Раздвигание катушек равносильно увеличению коэффициента трансформации: если раздвигать катушки $L_{к}$ и $L_{св}$, то напряжение $U_{сиг}$ падает, а добротность контура Q растет. Что же касается мощности, поступающей от генератора к нагрузке, то есть от контура к транзистору, то при раздвигании катушек эта мощность сначала растет, а затем, после того как вы пройдете точку оптимальной связи, уменьшается.

Что же лучше потерять — добротность контура или уровень управляющего напряжения? Здесь все зависит от того, в чем вы больше нуждаетесь. Так, например, если в приемнике всего один контур, то, может быть, и стоит несколько поднять его избирательность, ослабив связь между катушками и смирившись с потерей, получаемой от контура мощности (это в итоге скажется на громкости приема). Однако, как правило, связь между катушками $L_{к}$ и $L_{св}$ подбирают так, чтобы получить

оптимальное согласование генератора с нагрузкой, то есть передать из контура на вход транзистора наибольшую мощность. При этом, кстати, и добротность получается достаточно высокой. Во всяком случае, если, добившись оптимальной связи, вы будете и дальше раздвигать катушки, то добротность повысится уже незначительно, в то время как мощность, поступающая на вход транзистора (а в итоге и громкость приема), резко уменьшится.

Наряду с согласующим трансформатором иногда применяют еще и автотрансформатор, сделав, например, отвод у контурной катушки (рис. 43). При этом уменьшение числа витков, к которым подключена нагрузка, равносильно раздвиганию катушек согласующего трансформатора.

В транзисторных усилителях проблема согласования — это, по сути дела, проблема межкаскадной связи, проблема передачи энергии от «начала» к «концу» усилителя, от предыдущего каскада к последующему. Но помимо этой прямой, нормальной связи в усилителях, в том числе и в транзисторных, может быть еще и обратная связь — передача энергии от «конца» усилителя к его «началу». Именно об этой обратной связи сейчас пойдет речь.

ФОКУСЫ С ФАЗАМИ

Обратная связь — сокращенно ОС — в транзисторных усилителях возникает тогда, когда часть мощности выходного сигнала по каким-то путям попадает во входную цепь. Из-за этой самой ОС во входной цепи уже действуют два сигнала, два управляющих напряжения — истинный сигнал $U_{\text{сиг}}$, поступивший, например, из предыдущего каскада, и собственный сигнал $U_{\text{ос}}$, поступивший из собственной коллекторной цепи транзистора.

Хотим мы этого или не хотим, но обратная связь существует в любом транзисторном усилителе. Она возникает, например, и из-за того, что входная и выходная цепи имеют некоторые общие участки в самом транзисторе. Так, в схеме ОЭ (рис. 67) коллекторный ток проходит по участку эмиттер — база, а этот участок, естественно, входит и во входную цепь. В итоге любое изменение коллекторного тока приводит к некоторому изменению управляющего напряжения, а это не что иное, как обратная связь.

Обратная связь может возникать и вне транзистора. Так, например, если в усилительном каскаде имеются два колеба-

тельных контура — во входной и в выходной цепи — то совсем не исключено, что катушка выходного контура своим электромагнитным полем наведет напряжение в катушке входного контура. И это тоже будет обратная связь, обратное влияние выходной цепи на входную.

Если напряжение U_{oc} обратной связи, попавшее во входную цепь, действует согласованно с ее основным жителем — напряжением сигнала $U_{сиг}$, иными словами, если $U_{сиг}$ и U_{oc} совпадают по фазе, то обратная связь называется положительной (рис. 85).

Если же напряжение обратной связи приходит во входную цепь, чтобы мешать ее основному сигналу, если напряжения $U_{сиг}$ и U_{oc} действуют в противофазе, то обратная связь называется отрицательной.

Не нужно долгих рассуждений, чтобы прийти к выводу, что положительная обратная связь, по сути дела, повышает усиление каскада: напряжения $U_{сиг}$ и U_{oc} складываются, общее управляющее напряжение становится больше, увеличиваются переменные составляющие эмиттерного и коллекторного токов, и в итоге растет напряжение на нагрузке. А от источника сигнала мы при этом никакой дополнительной помощи не просим. Выходной сигнал, а вместе с ним и усиление каскада увеличиваются «бесплатно», только за счет внутренних ресурсов, за счет положительной ОС.

При введении отрицательной обратной связи все происходит наоборот: напряжения $U_{сиг}$ и U_{oc} действуют в противофазе, общее управляющее напряжение с введением отрицательной ОС становится меньше, а в итоге становится меньше и выходной сигнал. Иными словами, отрицательная обратная связь в итоге уменьшает усиление каскада.

На основании сказанного так и хочется сделать вывод, что положительная обратная связь — это хорошо, а отрицательная — это плохо. Однако не стоит торопиться с выводами. Человек, как известно, «не хлебом единым жив», а от усилителя требуется не одно только большое усиление.

Положительная обратная связь действительно без дополнительных затрат повышает усиление. Этим достоинством положительной ОС пользуются, например, когда хотят как можно дешевле построить приемник с высокой чувствительностью (то есть без дополнительных транзисторов и практически без дополнительного расхода энергии батарей).

Если в погоне за усилением все больше и больше увеличивать обратную связь, то можно вообще потерять все на свете, подобно тому как это было с жадной старухой в «Сказке о рыбке и рыбке». Но жизнь старухи после того, как она пре-

О превращении усилителя в генератор мы еще поговорим (стр. 303). А пока лишь отметим, что самовозбуждение — это и есть главная неприятность, которую приносит с собой положительная обратная связь. И то, что в транзисторных усилителях не столько вводят положительную обратную связь, чтобы поднять усиление, сколько борются с паразитной, возникающей помимо нашего желания положительной ОС, которая делает работу усилителя неустойчивой, приводит к его самовозбуждению.

В то же время отрицательная обратная связь, которая неизбежно снижает усиление и от которой, казалось бы, ничего хорошего и ждать нечего, пользуется большой популярностью, потому что с помощью отрицательной ОС можно сделать много полезных дел, например — повысить входное сопротивление усилительного каскада и тем самым облегчить его согласование с предыдущим каскадом.

Увеличение входного сопротивления в этом случае объясняется довольно просто. Из-за отрицательной ОС переменная составляющая тока во входной цепи уменьшается, хотя источник сигнала какое давал напряжение $U_{\text{сиг}}$, такое и дает. А то, что при неизменном напряжении уменьшается ток, равносильно повышению входного сопротивления (рис. 56).

Вооружившись этой простой истиной, мы можем теперь совсем по-другому взглянуть на схему с общим коллектором (рис. 73). В этой схеме выходное напряжение полностью попадает во входную цепь — между базой и эмиттером действуют два напряжения $U_{\text{вб}}$ и $U_{\text{вых}}$. Иными словами, усилитель с общим коллектором охвачен очень глубокой обратной связью. Эта обратная связь оказывается отрицательной: когда сигнал $U_{\text{сиг}}$ увеличивает на базе «минус», выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ увеличивает «минус» на эмиттере. В результате такого противодействия со стороны $U_{\text{вых}}$ уменьшается переменная составляющая тока во входной цепи (при неизменном $U_{\text{сиг}}$), поэтому схема ОК обладает очень высоким входным сопротивлением. По этой же причине она не дает никакого усиления по напряжению.

Здесь, на самом интересном месте, мы прервем рассказ о достоинствах и недостатках обратной связи, о том, как сложно формируются понятия «хорошо» и «плохо», когда дело касается электронных схем. Мы прервем свой рассказ потому, что с некоторыми особенностями обратной связи удобней будет познакомиться в следующих главах, на примерах ее практического использования. А сейчас наступила очередь «последнего сказанья» об абстрактном усилителе, после чего мы сможем наконец перейти к конкретным усилительным схемам.

БРОСОК НА ЮГ

Даже не совершая длительных многодневных путешествий, можно почувствовать, как велики просторы нашей страны.

Можно, например, подсчитать, что на ее территории разместится пятьдесят тысяч таких гигантов, как Москва, и население получившегося при этом «супергорода» составит примерно триста миллиардов человек — в сто раз больше, чем на всем земном шаре. А еще можно представить себе, как жители Бреста, прогуливаясь после трудового дня по улицам своего тихого зеленого города, любят яркими красками заката и как в то же самое время солнце уже выплывает из-за горизонта с другой стороны земного шара и начинает новый день во Владивостоке. Можно, наконец, просто послушать по радио сводку погоды и убедиться, что в начале марта, когда официально начинается весна, в Норильске еще стоят двадцатиградусные морозы, а в Сухуми уже двадцатиградусная жара.

Если в такое время года вам понадобится пересечь страну с севера на юг, то наверняка придется положить в чемодан и теплую зимнюю шапку, и летние сандалии. А если захотите взять с собой в дорогу самодельный транзисторный приемник, то обязательно нужно будет принять меры, чтобы он без осложнений перенес столь резкое изменение климата. Потому что сами транзисторы очень чувствительны к изменению температуры, и если не принять мер, то приемник, сделанный и налаженный при средней комнатной температуре, может совсем не работать под жаркими лучами южного солнца.

Мы уже несколько раз говорили, что в полупроводнике при изменении температуры резко — примерно в два раза на каждые десять градусов — меняется число собственных (неосновных) зарядов. В диоде эти неосновные заряды создают обратный ток $I_{обр}$ (рис. 17, 21), а в транзисторе из них образуется обратный ток коллектора $I_{ко}$ (рис. 60).

При нагревании диода из-за увеличения $I_{обр}$ p - n -переход достигает границы допустимой мощности при более низком напряжении, и поэтому столь важная характеристика, как допустимое обратное напряжение диода, заметно понижается. Эта же неприятность происходит и при нагреве транзисторов. Так, например, если при температуре 20°C коллекторный переход транзистора спокойно выдерживает напряжение 50 в, то при температуре 60°C он может оказаться пробитым уже при напряжении 20 в. Но это еще не все.

Нагрев транзистора может привести к еще одной и притом очень серьезной неприятности — к резкому изменению режима и параметров транзисторного усилителя. И это опять-таки свя-

зано с ростом начального тока коллектора $I_{\text{к0}}$ из-за увеличения числа собственных (неосновных) зарядов.

Разные схемы усилителей по-разному меняют свой режим под влиянием температуры, даже если в этих схемах работают одинаковые транзисторы, с одним и тем же начальным током. Так, в частности, схема ОБ свой режим меняет в очень малой степени. Обратный ток коллектора $I_{\text{к0}}$ в этой схеме только и делает, что прибавляется к основному коллекторному току $I_{\text{к}}$. А поскольку $I_{\text{к}}$, как правило, значительно больше, чем $I_{\text{к0}}$, то, как бы ни менялся этот последний, он не может заметно повлиять на общий коллекторный ток.

Подтвердим это числовым примером. В реальном случае в усилительном каскаде с маломощным транзистором $I_{\text{к}}$ составляет 2 ма, а обратный ток $I_{\text{к0}}$ при комнатной температуре 20°C у средних транзисторов равен 10 мка. Допустим, что транзистор нагреется до 70°C и его обратный ток, увеличившись в 32 раза (при нагревании на 10°C ток $I_{\text{к0}}$ растет в два раза, а значит, при нагревании на 50° он увеличивается в $2^5=32$ раза), возрастет до 320 мка. При этом коллекторный ток увеличится до 2,32 ма (2 ма + 320 мка), то есть примерно на 16%. Таким сравнительно небольшим изменением коллекторного тока, как правило, можно пренебречь. Но, повторяем, вся эта картина относится только к схеме ОБ, где $I_{\text{к0}}$ только увеличивает коллекторный ток, и ничего больше.

Совсем по-другому развиваются события в схемах ОЭ и ОК, где коллекторный ток проходит по эмиттерному *pn*-переходу и поэтому оказывает влияние на режим транзистора через главный командный пункт — через входную цепь. В итоге получается, что всякое изменение неуправляемого тока $I_{\text{к0}}$ усиливается в β раз, то есть при нагревании изменение коллекторного тока оказывается в β раз больше, чем изменение самого $I_{\text{к0}}$.

Давайте прикинем, к чему приводит «усиление неустойчивости» — усиление тока $I_{\text{к0}}$. Так же как и в предыдущем примере, предположим, что при комнатной температуре 20°C ток $I_{\text{к0}}=10$ мка, а при температуре 70°C этот ток увеличивается до 320 мка. Кроме того, предположим, что коэффициент усиления по току у выбранного транзистора равен $\beta=50$. Теперь подсчитаем: в схеме ОЭ начальный ток $I_{\text{к-н}}$ (строго говоря, этот ток нужно называть сквозным током в цепи эмиттер-коллектор) будет равен при комнатной температуре $I_{\text{к-н}(20)}=\beta \cdot I_{\text{к0}}=50 \cdot 10=500$ мка. При нагревании транзистора до 70° коллекторный ток $I_{\text{к-н}}$, как и в предыдущем примере, увеличится в 32 раза (потому что в 32 раза возрастет $I_{\text{к0}}$) и станет равным 16 ма. Это большая, очень большая величина. Ведь нормальный,

управляемый ток коллектора, возникающий за счет впрыскивания зарядов из базы у маломощного транзистора обычно составляет 2—5 *ма*. Иными словами, в схеме ОЭ коллекторный ток при нагревании транзистора может увеличиться не на несколько процентов, как в схеме ОБ, а в несколько раз!

Так оборачивается для нас серьезной неприятностью одно из главных достоинств схемы ОЭ — усиление по току. Усиливая полезный ток — ток сигнала, — схема ОЭ «по инерции» усиливает нестабильный и неуправляемый ток $I_{к0}$, который вынужден проходить через эмиттерный *pn*-переход. (Другого пути для этого тока нет — неосновным зарядам, попавшим из базы в коллектор, проще всего вернуться обратно в базу, пробравшись через всю коллекторную цепь и через эмиттер.)

Из-за появления большого начального коллекторного тока все семейство статических характеристик при нагревании транзистора резко сдвинется вверх и рабочий участок нагрузочной прямой уменьшится (рис. 86, 87). В результате уменьшатся переменная составляющая коллекторного тока и переменное напряжение на нагрузке, меньше станет усиление каскада. Вот к каким неприятностям приводит в схеме ОЭ небольшое, казалось бы, увеличение обратного тока $I_{к0}$! Возможные масштабы этих неприятностей огромны. Практически усиление может уменьшиться до такой степени, что каскад вообще перестанет усиливать, не говоря уж о том, что с увеличением начального коллекторного тока резко сокращается срок службы коллекторной батареи.

Ясно, что изменение режима при нагревании будет меньше у тех транзисторов, у которых меньше сам неуправляемый обратный коллекторный ток $I_{к0}$. А величина этого тока уже зависит от свойств полупроводникового материала; например, от того, сколько в нем неосновных зарядов. В нашем примере обратный ток коллектора составлял 10 *мка*, и при сильном

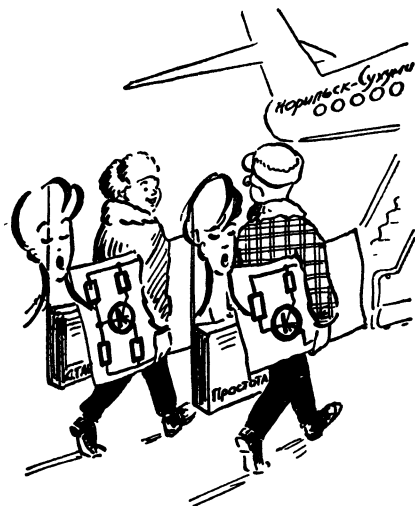


Рис. 86. Разные схемы по-разному ведут себя при изменении рабочей температуры.

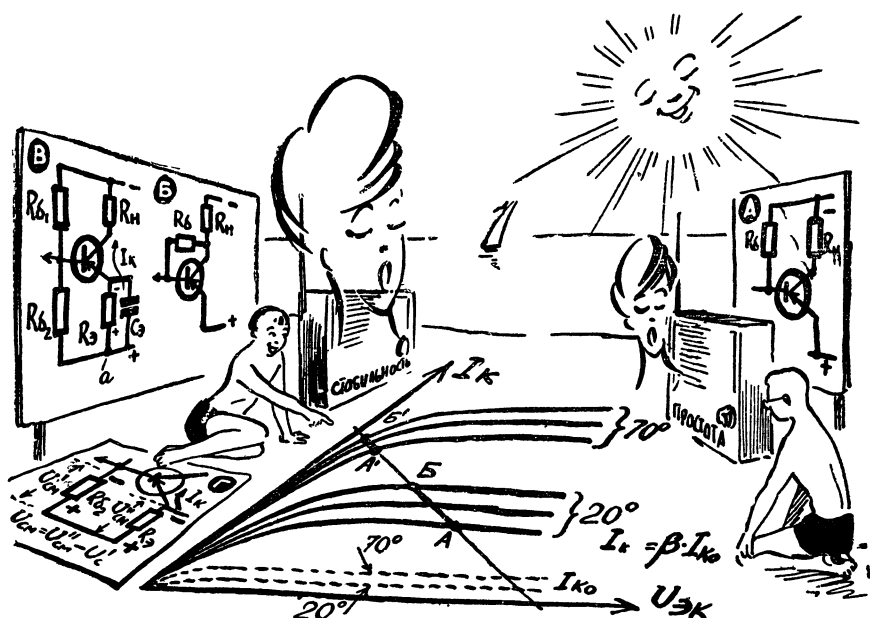


Рис. 87. Чтобы уменьшить влияние температуры на режим транзистора, применяют схемы, стабилизирующие начальное смещение на базе.

нагревании транзистора это привело к появлению начального, то есть неуправляемого, тока 16 ма . Если бы удалось снизить I_{K0} хотя бы в двадцать раз, то есть до $0,5 \text{ мка}$, то и начальный коллекторный ток при температуре 70°C тоже не превысил бы $0,8 \text{ ма}$. Это тоже немало, но с такой величиной начального коллекторного тока, пожалуй, уже можно было бы мириться.

Из всего сказанного, по-видимому, ясно, почему при выборе транзистора для той или иной схемы обращают серьезное внимание на обратный ток коллектора I_{K0} (рис. 88). Чем меньше I_{K0} у данного транзистора, тем стабильней он работает при изменении температуры, тем большим может быть рабочий участок нагрузочной прямой, тем, следовательно, больше выходное напряжение и переменная составляющая коллекторного тока, тем меньше потребление тока от коллекторной батареи. Обратный ток коллектора I_{K0} можно считать вторым по важности параметром транзистора после коэффициента усиления по току β . В таблице параметров обычно указывают величину I_{K0} с некоторым запасом, и для многих транзисторов этот ток оказывается значительно меньше.

Уменьшение обратного тока коллектора — трудная задача, над решением которой работают физики, химики, технологи, конструкторы, — словом, все, кто участвует в создании транзисторов. В решении этой задачи в последние годы заметен значительный прогресс. Так, в частности, для многих типов серийных транзисторов величина $I_{ко}$ не превышает 1—2 мка, в то время как еще несколько лет назад у лучших образцов транзисторов обратный ток редко был меньше 5—15 мка. (Учтите, что все эти цифры относятся к транзисторам неболь-

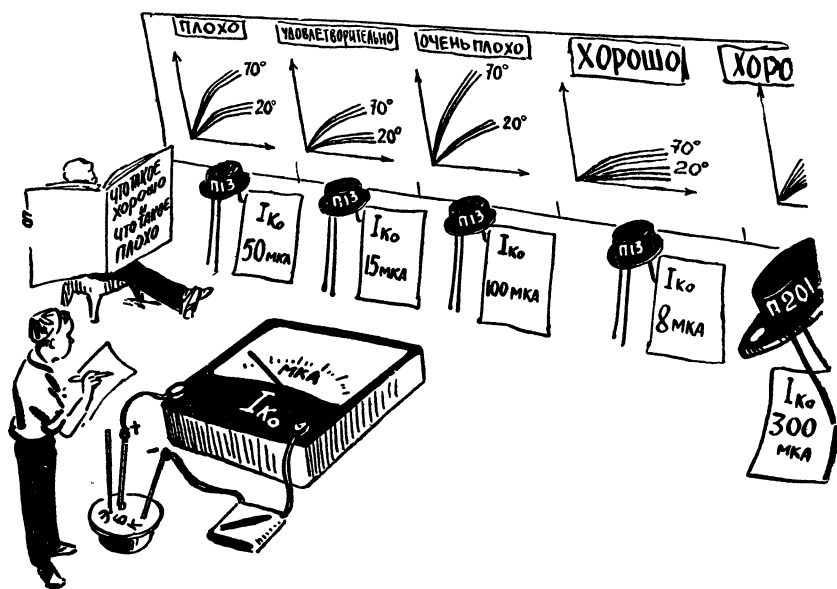


Рис. 88. Чем меньше неуправляемый начальный ток коллектора по сравнению со средним током транзистора, тем меньше температура влияет на режим.

шой мощности, для которых максимальный коллекторный ток не превышает нескольких десятков ма. У мощных транзисторов коллекторный ток во много раз больше — вплоть до нескольких ампер, — и поэтому приемлемая величина $I_{ко}$ также значительно больше.) Предполагается, что в будущем удастся настолько уменьшить $I_{ко}$, что его влиянием можно будет пренебречь. Ну, а пока, для того чтобы уменьшить влияние неуправляемого обратного тока на режим транзистора, пользуются схемами температурной стабилизации режима,

Когда мы говорим об автоматике и автоматах, то, как правило, представляем себе очень сложные устройства с огромным числом деталей, соединительных проводов, электронных ламп, электромагнитных пускателей и реле. Для такого представления об автоматах есть достаточно веские причины. Даже самый, казалось бы, простой из них, такой, например, как автомат для продажи газированной воды, если заглянуть вовнутрь, представляется очень сложной и замысловатой установкой.

В последние годы человеческий разум действительно создал изумительные по своей сложности, по своей «разумности» автоматы — устройства, которые умеют самостоятельно, без помощи человека, управлять различными процессами и аппаратами. Это автоматы, управляющие прокатным станом, огромной электростанцией, космическим кораблем. Это автоматы, которые умеют играть в шахматы, фотографировать с близкого расстояния поверхность Луны, поддерживать нормальный ритм больного сердца.

Но наряду с автоматическими установками, если можно так сказать, высшего ранга, на каждом шагу нам встречаются и очень простые автоматы, выполняющие самые разнообразные мелкие поручения человека. К таким автоматам можно отнести предохранитель, мгновенно разрывающий электрическую цепь при коротком замыкании, автомат для выключения проигрывателя, когда кончается пластинка, автоматический переключатель на елке. К числу простейших автоматов можно отнести и схемы, стабилизирующие режим транзистора.

Почти все схемы автоматической стабилизации работают на одном принципе: они следят за работой транзистора и автоматически компенсируют всякое изменение режима, которое происходит при нагревании.

Две наиболее распространенные схемы автоматической стабилизации делают это следующим образом: при малейшем увеличении постоянного коллекторного тока они как бы уменьшают начальное смещение на базу и тем самым стараются вернуть коллекторный ток к первоначальной величине.

Простейшая схема термостабилизации (рис. 87, листок Б) отличается от схемы, где никакой стабилизации вообще нет (рис. 87, листок А), только тем, что сопротивление R_6 , с помощью которого задается смещение на базу, подключено не к «минусу» коллекторной батареи, а прямо к коллектору. Это незначительное отличие приводит к весьма значительным последствиям, причем не только к хорошим, но и к плохим.

Дело в том, что при подключении R_6 к коллектору не

остается постоянным отрицательное смещение, которое поступает на базу. Чем больше коллекторный ток, тем больше падение напряжения на нагрузке $R_{\text{н}}$, тем меньше напряжение, которое остается на коллекторе, тем меньше и небольшая доля этого напряжения, которая достается эмиттерному переходу и является для него начальным смещением $U_{\text{см}}$.

С одной стороны, хорошо: когда из-за повышения температуры возрастет коллекторный ток, то одновременно уменьшится смещение $U_{\text{см}}$ и заставит коллекторный ток тоже уменьшиться. Этим, собственно говоря, и будет достигаться автоматическая стабилизация режима.

Но, с другой стороны, подключение R_6 не к «минусу», а к коллектору ухудшит усилительные свойства каскада. Всякое изменение коллекторного тока, в том числе и те изменения, которые возникают под действием усиливаемого сигнала, и являются его «мощной копией», будут через R_6 воздействовать на базу и будут пытаться сами себя уменьшить. Иными словами, сопротивление R_6 , подключенное к коллектору, становится элементом обратной связи, причем именно отрицательной обратной связи, которая, как известно, снижает усиление каскада. Вот почему схема температурной стабилизации, о которой идет речь, применяется там, где не жалко платить усилением за простоту.

Вторая схема термостабилизации (рис. 87, листок *В*) хотя и сложнее первой (для второй схемы нужны два дополнительных резистора и один конденсатор), хотя и потребляет от батареи некоторую дополнительную энергию, однако применяется значительно чаще. Ей отдают предпочтение, очевидно, потому, что эта схема позволяет во много раз ослабить влияние температуры на режим каскада и при этом не ухудшает его основных параметров. Прежде всего не снижает усиления.

Идея, на которой построена эта схема, довольно проста. Смещение на базу, то есть постоянное напряжение, действующее между базой и эмиттером, складывается в этой схеме из двух действующих последовательно напряжений. Одно из них — $U''_{\text{см}}$ — образуется на резисторе R_3 за счет проходящего по нему коллекторного тока. Полярность напряжения $U''_{\text{см}}$, как всегда в таких случаях, определяется направлением тока, который проходит по R_3 . А направление коллекторного тока таково, что «минус» напряжения $U''_{\text{см}}$ всегда направлен в сторону эмиттера, а «плюс» — в сторону базы. Иными словами, напряжение $U''_{\text{см}}$ стремится создать на базе положительное, то есть запирающее, напряжение — «плюс» на базе отталкивает дырки назад к эмиттеру.

Второе напряжение, которое участвует в создании смещения,— это $U'_{см}$. Оно образуется на резисторе $R_{б2}$, который представляет собой часть делителя $R_{б1}R_{б2}$. Этот делитель делит коллекторное напряжение, и часть его, а именно $U'_{см}$, подается «минусом» на базу, то есть напряжение $U'_{см}$ стремится создать на базе «минус» относительно эмиттера, стремится отпереть транзистор.

Если включить последовательно две батарейки, причем так, чтобы они действовали друг против друга, то результирующее напряжение будет равно разности напряжений, которые дают эти батарейки. Точно так же напряжение, которое получится в результате взаимодействия $U'_{см}$ и $U''_{см}$ в одной последовательной цепи, равно разности этих напряжений. При этом $U'_{см}$ больше, чем $U''_{см}$, и на базе оказывается «минус». (Иначе и быть не может — «плюс» запер бы триод и $U''_{см}$ вообще исчезло бы.) А если по каким-нибудь причинам будет меняться одно из этих двух напряжений, то одновременно будет меняться и их разность — результирующее смещение $U_{см} = U''_{см} - U'_{см}$.

При налаживании усилительного каскада его элементы выбирают так, чтобы $U'_{см}$ было несколько больше, чем $U''_{см}$, и чтобы их разность давала нужное отрицательное смещение на базу. Когда при повышении температуры возрастает коллекторный ток, то одновременно увеличивается и напряжение $U''_{см} = I_{к} \cdot R_{б}$. В итоге меньше становится разностное напряжение $U_{см}$, уменьшается «минус» на базе. А это приводит к уменьшению коллекторного тока, то есть к стабилизации режима.

Чтобы резистор $R_{б}$ не стал элементом отрицательной обратной связи по переменному току, его шунтируют конденсатором.

Эффект автоматической стабилизации проявляется тем сильнее, чем больше сопротивление $R_{б}$. Но, с другой стороны, увеличивать $R_{б}$ нежелательно, так как на нем теряется некоторая часть напряжения коллекторной батареи. Так, например, если батарея дает 4,5 в, а напряжение $U''_{см}$ равно 1 в, то «работающая часть» коллекторного напряжения, то есть то, что действует между нагрузкой и эмиттером, уменьшается до 3,5 в.

Второе ограничение эффективности схемы также связано с использованием коллекторной батареи. Дело в том, что схема стабилизирует режим тем лучше, чем меньше общее сопротивление делителя $R_{б1}R_{б2}$. В этом случае напряжение $U'_{см}$ в меньшей степени зависит от проходящих по делителю соб-

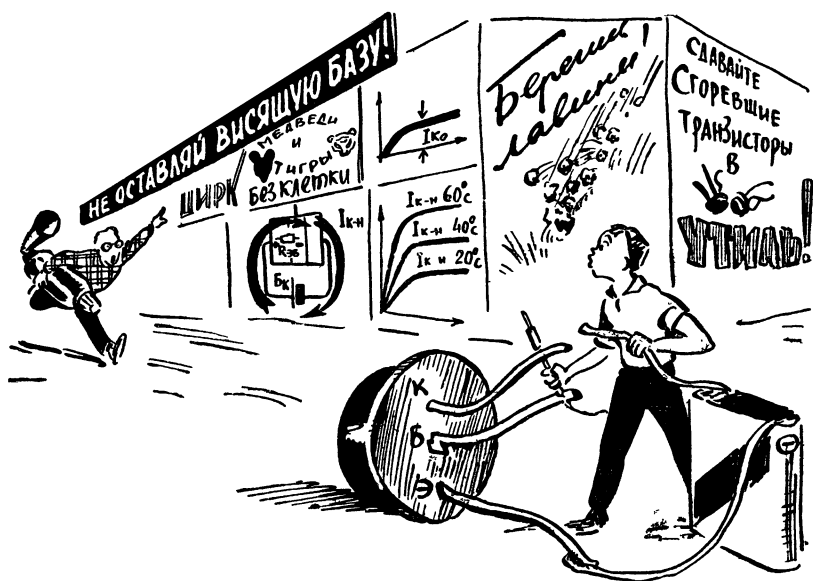


Рис. 89. Если подано напряжение на коллектор, а база никуда не подключена, то в транзисторе может произойти лавинообразное нарастание тока и в итоге — тепловой пробой.

ственных токов транзистора. Однако, чем меньше общее сопротивление делителя $R_{61}R_{62}$, тем больше ток, который потребляется этим делителем от коллекторной батареи. Вот и приходится искать «золотую середину» — выбирать элементы схемы так, чтобы и режим был стабильным, и перерасход энергии не оказался слишком большим.

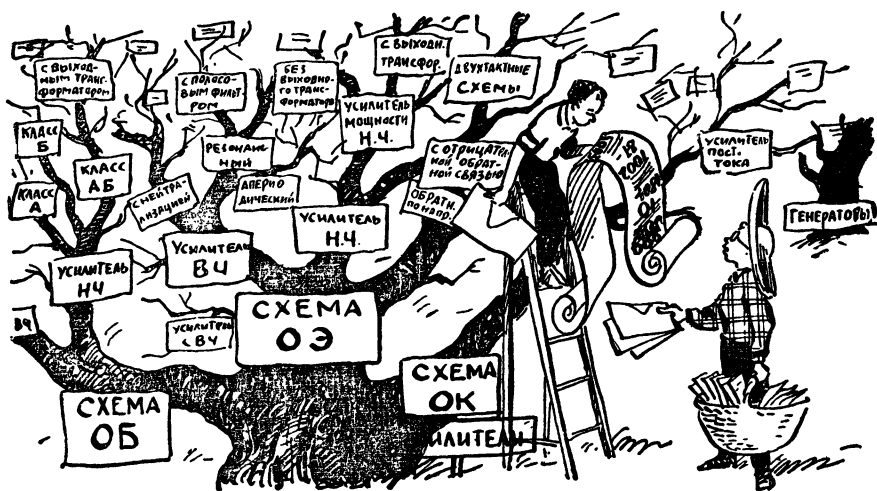
Вот примерные данные деталей и режим схемы, приведенной на листке В, рис. 87. В усилителе высокой частоты на транзисторе П420 детали могут иметь следующие данные: $R_{\text{н}} — 5,1 \text{ ком}$, $R_{\text{э}} — 1,5 \text{ ком}$, $R_{61} — 20 \text{ ком}$, $R_{62} — 5,1 \text{ ком}$ и $C_{\text{э}} — 0,05 \text{ мкф}$ (в низкочастотном усилителе эта емкость должна была быть во много раз больше, чтобы емкостное сопротивление конденсатора $C_{\text{э}}$ всегда было значительно меньше, чем $R_{\text{э}}$). При питающем напряжении коллекторной батареи 9 в на отдельных участках такой схемы в режиме покоя (когда нет сигнала) и при комнатной температуре получаются напряжения: на коллекторе $U_{\text{к}}$ равно 4,1 в; $U'_{\text{см}}$ на резисторе $R_{\text{э}}$ равно 1,4 в; $U_{\text{см}}$ на резисторе R_{61} равно — 1,5 в. Все напряжения

измерены относительно общего «земляного» провода, например относительно точки a . Поэтому все напряжения указаны со знаком «минус» — легко убедиться, что относительно точки a эти напряжения — $U'_{см}$, $U''_{см}$ и U_k — отрицательны. Таким образом, общее напряжение смещения $U_{см}$ равно $U'_{см} = U_{см} - U''_{см} = 1,4 \text{ в} - 1,5 \text{ в} = -0,1 \text{ в}$. Отрицательным оно оказалось потому, что $U'_{см}$ больше, чем $U''_{см}$, и таким образом на базе относительно эмиттера действует «минус».

Увеличение обратного тока коллектора при нагревании может вообще вывести транзистор из строя. Подобная опасность возникает в том случае, если к транзистору, включенному по схеме ОЭ или ОК, подведено коллекторное напряжение, а база при этом вообще никуда не подключена и «висит в воздухе». Появившийся начальный коллекторный ток создаст на эмиттерном pn -переходе небольшое напряжение, которое своим «минусом», приложенным к базовой области, слегка отогреет транзистор. При этом коллекторный ток слегка увеличится, кристалл немного нагреется, возрастет число неосновных зарядов. Это «цепная реакция». Ток лавинообразно нарастает, и за какие-нибудь доли секунды наступает тепловой пробой одного из pn -переходов.

Чтобы избежать этой разрушающей лавины, не нужно допускать появления «висящей базы». А для этого при монтаже или налаживании транзисторных схем рекомендуется базу подключить первой, а отключать последней (рис. 89).

Приведенные конкретные данные деталей и режимы транзистора, а также рекомендации относительно «висящей базы» знаменует для нас довольно важное событие. Мы завершаем знакомство с транзисторным усилителем в общем виде и от абстрактного усилителя переходим к конкретному. Переходим к практическим транзисторным схемам.



Глава IV

ТЫСЯЧА И ОДНА СХЕМА

Лет десять назад, когда в продаже появились первые серийные транзисторы, многие любители начали строить карманные приемники. К тому времени в журнале «Радио» были опубликованы две-три схемы таких приемников, и именно они послужили основой для развития «приемниковой лихорадки». Причем большинство любителей просто копировало журнальные схемы, не отступая от них ни на шаг и даже в точности повторяя расположение деталей на монтажной плате.

Но вот прошло два-три года, и в журналах, книгах, сборниках появилось множество других схем, чем-то похожих, а чем-то различающихся. И сегодня радиолюбитель, который хочет собрать приемник или усилитель, часто задумывается, какую схему из всего этого множества схем выбрать? Нужно сразу сказать, что, несмотря на большое разнообразие, все простые любительские схемы делятся на сравнительно

небольшое число основных групп. В пределах такой группы схемные решения зачастую очень похожи.

К основным группам схем, интересующих начинающего любителя, можно отнести собранные на двух-трех транзисторах приемники с головными телефонами (наушниками), схемы сравнительно простых, но уже на четырех—шести транзисторах приемников прямого усиления для громкоговорящего приема и схемы всеволновых супергетеродинных приемников. Усилители НЧ чаще всего разделяются на такие группы: усилители с выходной мощностью около $0,1 \text{ вт}$ (100 мвт) и с маломощными (типа П41) транзисторами в выходном каскаде и усилители с мощными транзисторами (типа П214) и выходной мощностью $1\text{—}2 \text{ вт}$. И в той и в другой группе встречаются схемы, где громкоговоритель подключается к выходному каскаду через трансформатор или без него. Начинающие любители проявляют также интерес к простейшим схемам электромузыкальных инструментов и к приборам автоматики.

В этой главе вы найдете схемы, представляющие каждую из названных групп, причем в некоторых случаях принципиальные схемы дополнены монтажными, показывающими один из возможных вариантов (но не единственный!) расположения деталей на монтажной плате. При отборе схем обращалось внимание на такое их качество, которое можно назвать «типичностью». Иными словами, в отобранных схемах используются схемные элементы, которые наиболее часто встречаются в любительской аппаратуре. Кроме того, при отборе схем учитывалась простота их налаживания и сохранение основных параметров при некотором отклонении деталей от указанных на схемах величин.

Все приведенные схемы можно назвать практическими, потому что они были построены в любительских условиях, а некоторые перед публикацией в книге специально проверялись, дорабатывались или разрабатывались заново. При желании можно в различных вариантах сочетать приведенные схемы (например, пристраивать усилитель НЧ от одного приемника к усилителю ВЧ от другого), менять отдельные схемные элементы (например, в качестве нагрузки включать в усилители ВЧ дроссели, намотанные на ферритовых кольцах вместо предусмотренных схемой резисторов) или даже менять целые схемные узлы (например, включив первый каскад усилителя НЧ по схеме ОК вместо схемы ОЭ). Можно также в некоторых пределах менять данные деталей схемы — уменьшать при необходимости сопротивление нагрузки, увеличивать емкость разделительных конденсаторов, вводить дополнительные развязывающие фильтры и т. п. В результате всех этих

«комбинаций» можно получить огромное множество схем, и некоторые из них могут оказаться лучше своих «родителей».

Знания, приобретенные в предыдущих разделах книги, вполне достаточны, чтобы разобрать приведенные в этой главе практические схемы. Однако, прежде чем приступать к описанию конкретных схем, нам нужно сделать еще один и, кстати, очень важный для будущей практической работы шаг. Нам нужно познакомиться с конкретными типами транзисторов.

«...МАМЫ ВСЯКИЕ ВАЖНЫ!»

Если заглянуть в справочник по полупроводниковым приборам, то прежде всего бросается в глаза огромное количество типов транзисторов и диодов — многие десятки диодов с разными названиями, многие десятки разных транзисторов. Нужно ли такое многообразие? Нельзя ли обойтись несколькими основными типами диодов и транзисторов или, может быть, каким-нибудь одним универсальным, пригодным на все случаи жизни прибором? На эти вопросы приходится отвечать уклончиво — и да и нет.

Одним универсальным типом прибора — одним диодом или одним транзистором — обойтись, конечно, нельзя. Потому что нет, в частности, идеального диода, который и большой ток пропускал бы, и высокое обратное напряжение терпел бы (напоминаем о примечании на стр. 26), и малой емкостью обладал бы, и еще ко всему имел бы незначительный обратный ток и слабую зависимость параметров от температуры. Такой диод изготовить невозможно, а по некоторым показателям принципиально невозможно. Вот и приходится создавать разные приборы, принося в одном случае в жертву выпрямленный ток ради уменьшения емкости, в другом случае жертвуя допустимым напряжением ради выпрямленного тока, в третьем случае снижая все предельные параметры для уменьшения габаритов и т. д. Так появляется в наших справочниках несколько типов диодов, каждый из которых имеет свои отличительные особенности и свои области применения.

То же самое можно сказать и о транзисторах. В некоторых случаях приходится жертвовать частотными свойствами триода, мириться со сравнительно низкой предельной частотой усиления ради того, чтобы получить большую мощность. В других случаях конструкторы умышленно разрабатывают приборы с малыми размерами *pn*-переходов, а значит, со сравнительно небольшой выходной мощностью, пытаясь тем самым уменьшить собственные емкости транзистора и ослабить

его влияние на высокочастотные цепи. В третьем случае приходится идти на ухудшение усилительных свойств транзистора, чтобы ослабить влияние температуры на его параметры. Одним словом, при разработке транзисторов, так же как и при разработке диодов, приходится в разных случаях приносить разные жертвы и создавать таким образом различные типы приборов для разных областей применения.

Есть еще два обстоятельства, определяющих ассортимент полупроводниковых приборов, в частности транзисторов. Одно из этих обстоятельств весьма неприятно, так как оно приводит к излишнему расширению ассортимента. Второе обстоятельство, наоборот, позволяет бороться с разбуханием ассортимента транзисторов, помогает создавать полупроводниковые приборы «без жертв», то есть обладающие сразу многими ценными свойствами.

То, что разработчики вынуждены создавать транзисторы нескольких разных типов, это, как говорится, еще полбеда. Разные типы транзисторов плодятся при самом их производстве, причем у каждого основного типа появляется сразу несколько подтипов. Давайте для примера посмотрим, как и почему размножается семейство простейшего сплавного полупроводникового триода со структурой *p-n-p*.

Сплавной транзистор с такой структурой получается в результате большого числа сложных и тонких технологических операций, некоторые из них названы на рис. 90. При вытягивании кристалла германия в него вводится донорная примесь, и во всем кристалле создается *n*-проводимость. Затем кристалл разрезают на плоские пластины, которые тщательно шлифуют и в свою очередь разрезают на мелкие кристаллики. Каждый такой кристаллик — основа транзистора, его будущая база, в которую нужно вплавить эмиттер и коллектор.

Для сплавления эмиттера основной кристаллик с проводимостью *n*-типа помещают в небольшую металлическую кассету (рис. 91) и туда же укладывают заранее приготовленную микроскопическую крупинку индия. Затем кассету закрывают и устанавливают в печь, температура в которой достигает 500 градусов. В этой печи индий вплавляется в кристаллик германия, и в месте сплавления образуется эмиттерный *pn*-переход.

Затем кассету вынимают, переворачивают и с противоположной стороны вводят вторую крупинку индия, несколько большей величины, чем первая. Еще одна установка в печь, еще одно сплавление индия в германий — и еще один, на этот раз коллекторный *pn*-переход готов. Мы расчленили весь процесс лишь для наглядности: обычно эмиттер и коллектор

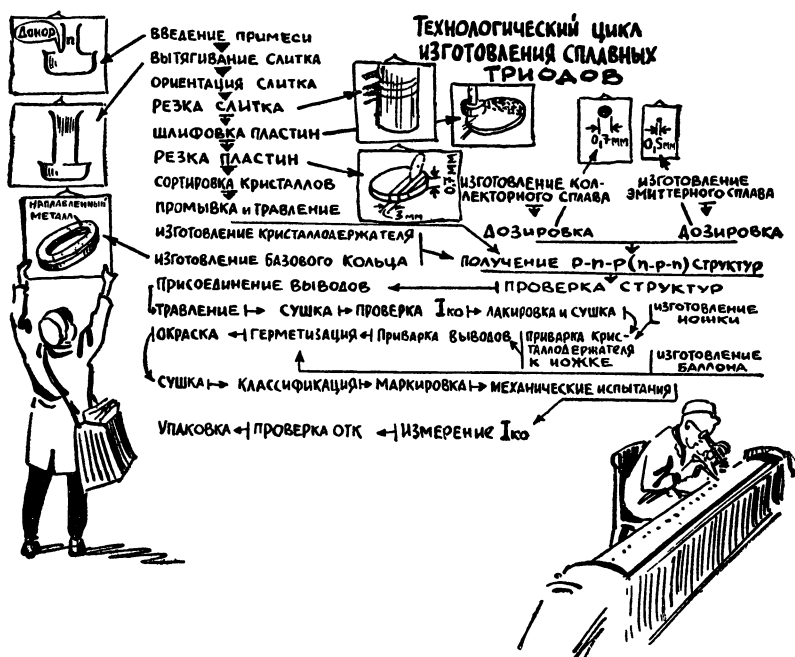


Рис. 90. Производство транзистора — это большой комплекс сложных технологических операций.

вплавляют одновременно, при этом в печь устанавливают сразу большое количество кассет.

Весь процесс вплавления описан нами крайне упрощенно. В действительности подготовка к вплавлению включает в себя ряд ювелирных операций, которые производятся под микроскопом. А само вплавление идет при строгом контроле температуры печи и времени пребывания в ней кристаллов с добавками.

Однако как бы точно ни производилась подготовка к вплавлению и как бы строго операторы ни следили за этим процессом, он, по сути дела, протекает «заочно» — никто не может точно сказать, что в тот или иной момент происходит в той или иной кассете, находящейся в печи. Кристаллики основного полупроводника и вплавляемые в них крупинки индия не бывают абсолютно одинаковыми, и в основном поэтому сам ход процесса при образовании *pn*-переходов в разных кассетах тоже несколько отличается. В итоге в одной и той же группе кассет образуются транзисторы с разными параметрами.

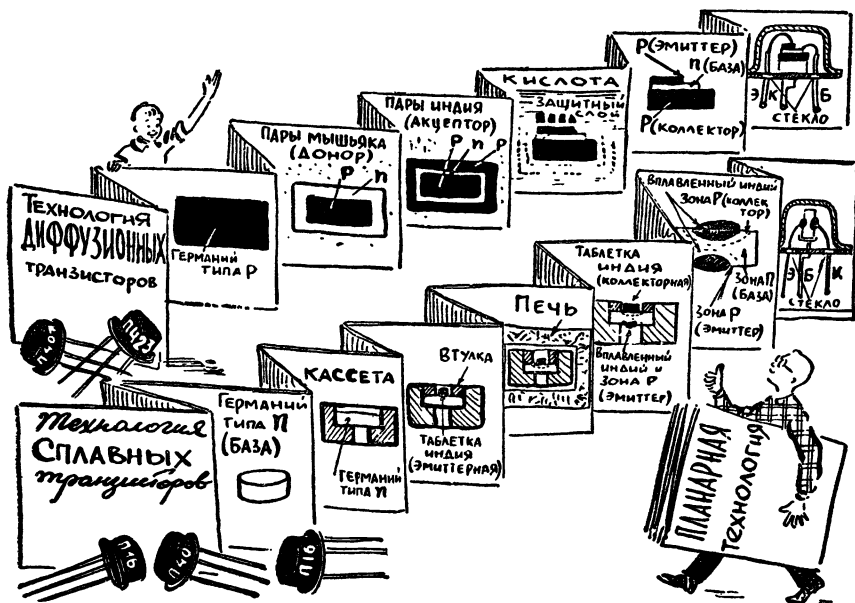


Рис. 91. Основные этапы производства сплавных и диффузионных транзисторов.

Например, с разным содержанием неосновных носителей в области базы, а значит, с различными обратными токами коллектора (рис. 17) или с разной толщиной базы, поэтому и с разным коэффициентом усиления по току (рис. 35). Кроме того, транзисторы, у которых получилась более толстая база, работают на более низких частотах, так как одно из препятствий для повышения частоты сигнала — это запаздывание зарядов при диффузии их через базу.

Заряды просто не успевают за быстрым изменением высокочастотного сигнала.

После установки кристаллика с двумя *pn*-переходами в корпус многие параметры получившегося транзистора измеряют и формируют несколько групп приборов со схожими параметрами. Так и появляется вынужденный широкий ассортимент транзисторов, которые, конечно, вполне могли бы быть одним типом, если бы все технологические процессы шли абсолютно одинаково. В частности, такие транзисторы, как П13, П13А, П13Б, П14, П15, П16, П16А, П16Б, получались в результате единого технологического процесса изготовления сплавных *pn*-переходов только за счет разброса их параметров.

Если трудности полупроводниковой технологии увеличивают число различных типов транзисторов, то совершенствование технологии, применение новых технологических принципов, позволяет уменьшить излишне богатый ассортимент приборов. Так, например, получение *pn*-переходов методом диффузии позволяет создавать транзисторы, одинаково хорошо работающие и на низких, и на высоких частотах, вплоть до нескольких сот Мгц.

Сущность диффузионной технологии отражена в самом ее названии. Основой транзистора *p-n-p* здесь, так же как и в сплавной технологии, служит кристаллик германия, но уже с проводимостью *p*-типа (рис. 91). Сначала этот кристаллик помещают в пары донора, например мышьяка. В результате диффузии донора в кристалл в нем создается тонкий поверхностный слой с проводимостью *n*-типа. Затем следует еще одна диффузия примеси — кристалл помещают в пары акцептора, например индия. Теперь в тонком слое с проводимостью *n*-типа создается еще более тонкий слой с *p*-проводимостью, и кристалл, точнее, его поверхностная область, приобретает структуру *p-n-p*. В дальнейшем верхний слой (*p*) будет эмиттером, средний слой (*n*) — базой, а сам кристалл (*p*) — коллектором. Остается лишь добраться до внутренних участков этой структуры, то есть подключить выводы к коллектору и базе будущего транзистора.

В самом упрощенном виде эта операция выполняется так: на один из участков кристалла наносят кислотоупорное покрытие, а затем производят травление кристалла в кислоте. В итоге обе «одежды», появившиеся в результате диффузии, исчезают почти со всей поверхности кристалла и нужная структура остается лишь на небольшом участке. Именно к нему и припаивают выводы эмиттера и базы коллектора.

Мы описали лишь один из нескольких способов производства диффузионных транзисторов, причем описали его очень упрощенно. В действительности диффузионная технология, так же, впрочем, как и любая другая технология производства транзисторов, включает в себя большую серию очень тонких и точных технологических операций. Диффузионная технология хотя и сложнее сплавной, но зато позволяет более точно направлять сам ход процесса и получать транзисторные структуры с меньшим разбросом параметров. При этом сами *pn*-переходы получаются с ровной, плоской границей между зонами и, что особенно важно, получается ровная и очень тонкая, вплоть до нескольких микронов, база. А чем тоньше база, тем большие частоты может усиливать транзистор (рис. 92). По-

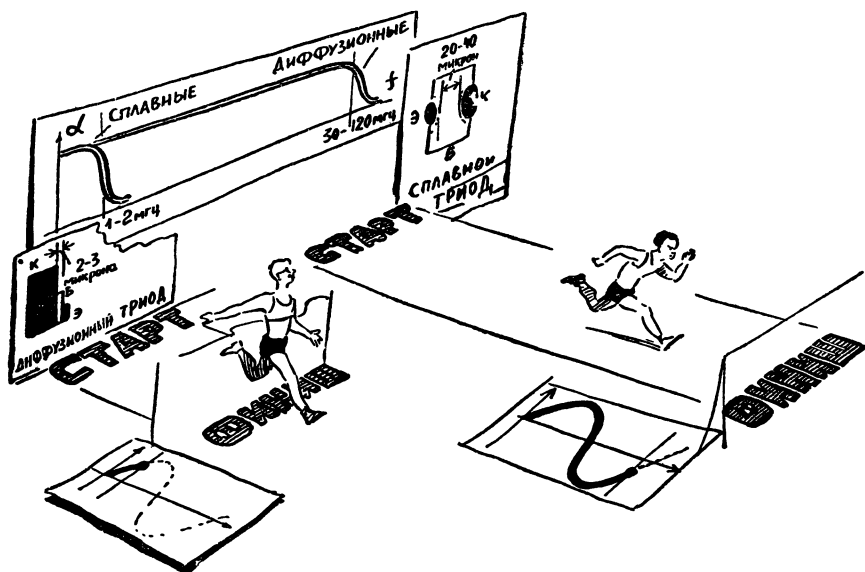


Рис. 92. Чем тоньше база, тем больше предельная частота, на которой может работать транзистор.

этому в основном все высокочастотные транзисторы изготовляют диффузионным способом.

Обратите внимание на расположение выводов у сплавного и диффузионного транзисторов малой мощности (рис. 91). В первом случае сам кристалл становится базой, а во втором случае — коллектором. Кристалл устанавливают на кристаллодержатель, и он оказывается электрически соединенным с корпусом. Поэтому у большинства сплавных транзисторов средний вывод, соединенный с корпусом, — это вывод базы, а у многих диффузионных транзисторов средний вывод — это вывод коллектора. Чтобы не перепутать эмиттер с базой (это может кончиться трагично, если, например, подключить коллекторную батарею между коллектором и эмиттером и оставить «висящую базу»; см. рис. 89), на самом корпусе возле вывода эмиттера ставят желтую или белую точку.

Если диффузионная технология позволяет получать лучшие транзисторы, работающие не только на низких, но и на высоких частотах, то почему вообще не отказаться от сплавных транзисторов, которые работают только на низких частотах и производство которых порождает ненужное разнообра-

ние типов приборов? Ответ на это наивное «почему» весьма прост: пока еще сплавные транзисторы делать проще и стоят они пока значительно дешевле. Представьте себе, что вы пришли в магазин, чтобы купить маломощный транзистор для усилителя НЧ, и вам предложили на выбор диффузионный триод стоимостью 2 рубля и сплавной — стоимостью 30 копеек. Конечно же, вы купите сплавной транзистор, который в низкочастотном усилителе работает не хуже диффузионного, а стоит во много раз дешевле.

Подобными соображениями руководствуются и разработчики радиоэлектронной аппаратуры, и специалисты, создающие сами полупроводниковые приборы. Задумываясь о том, нужно или не нужно производить какой-либо тип полупроводникового прибора, приходится учитывать не только его электрические характеристики, но и ту цену, которую за эти характеристики нужно заплатить. Потому что в итоге копейки и рубли стоимости транзистора, как, впрочем, любые рубли и копейки, пересчитываются во многие тысячи киловатт-часов электроэнергии, во многие тонны дорогостоящих материалов, во многие миллионы часов бесценного рабочего времени.

Сравнительная простота производства и невысокая стоимость — вот основные достоинства сплавных транзисторов, благодаря которым они остаются вне конкуренции во многих областях применения: в усилителях НЧ, ключевых схемах, генераторах импульсов и др.

Несколько слов еще об одном из многих методов производства транзисторов — о планарной технологии. Это новое направление, которое считается наиболее перспективным, используется для создания *pn*-переходов диффузией примесей.

Отличительная особенность планарной технологии в том, что все основные процессы создания *pn*-переходов в кристалле происходят с применением своего рода маски — тонкого защитного покрытия поверхности кристалла. Благодаря этому отпадает ряд трудных операций, а поверхность кристалла оказывается защищенной от всякого рода вредных воздействий. В результате получаются транзисторные структуры более высокого качества, в частности с меньшим поверхностным током, который суммируется с вредным обратным током коллектора $I_{ко}$. Существует мнение, что применение планарной технологии позволит настолько уменьшить величину $I_{ко}$, что во многих схемах вообще отпадет необходимость температурной стабилизации режима транзистора.

Еще каких-нибудь десять лет назад, когда транзисторов было очень мало, буквально пять — десять типов, их нетрудно было знать наперечет. Разобраться же в нынешнем ассорти-

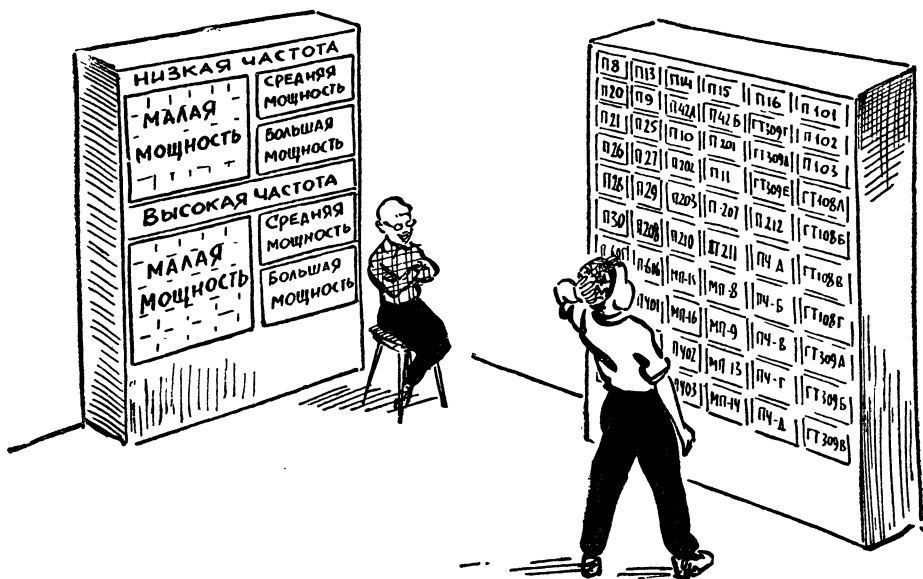


Рис. 93. Все многообразие транзисторов можно разбить на несколько основных групп.

менте полупроводниковых приборов уже не так просто. Чтобы облегчить эту задачу, можно прежде всего разделить все транзисторы на три группы малой мощности (наибольшая выходная мощность около 0,1 Вт), средней мощности (около 0,5 Вт) и большой (более 1,5 Вт) мощности (рис. 93). Часто применяют еще более простое деление транзисторов: на мощные (2 Вт и более) и маломощные (около 0,1 Вт). На эти три или даже две группы можно разделить все многообразие транзисторов широкого применения.

Внутри каждой группы целесообразно разделить транзисторы на низкочастотные (сплавные) и высокочастотные (диффузионные). И, наконец, для порядка следует ввести еще одно разделение транзисторов — в зависимости от их структуры ($p-n-p$ или $n-p-n$) и исходного материала (германий или кремний). Как видите, получилось сравнительно небольшое число основных групп, и среди них четыре главные группы — маломощные транзисторы ВЧ и НЧ и мощные транзисторы ВЧ и НЧ. Это, конечно, грубое деление, не учитывающее многих важных показателей, однако же внутри каждой из четырех групп даже разные транзисторы очень часто могут заменять друг друга.

О принадлежности транзистора к той или иной основной группе говорит само его название (исключение составляют лишь довольно старые транзисторы, такие, как П4).

В названии транзисторов, разработанных до 1964 года, первая буква «П» происходит от слова «плоскостной» и относится ко всем без исключения транзисторам. Затем следуют цифры, значение которых указано в таблице 8. Пользуясь этой таблицей, можно, например, определить, что П403 — это маломощный германиевый высокочастотный (диффузионный) транзистор, П201 — мощный германиевый низкочастотный (сплавной) транзистор, П501 — маломощный кремниевый высокочастотный транзистор и т. д. Аналогично формируются названия приборов, созданных после 1964 года (таблица 9).

Таблица 8

Обозначения некоторых типов полупроводниковых приборов, выпускавшихся до 1964 года. (Для некоторых приборов, выпускаемых после 1964 года, и по сей день сохраняются старые обозначения.)

Первый элемент обозначения: буква Д — диоды, буква П (или МП) — транзисторы. Второй элемент — цифра, обозначающая конкретный тип прибора. Третий элемент обозначения — буква — разновидность приборов данного типа, имеющая некоторое отличие в параметрах. Ниже приведены значения некоторых цифр во втором элементе обозначения.

Диоды:

Точечные германиевые	от 1	до 100
Точечные кремниевые	от 101	до 200
Плоскостные кремниевые	от 201	до 300
Плоскостные германиевые	от 301	до 400
Стабилитроны	от 801	до 900
Варикапы	от 901	до 1000
Туннельные диоды	от 1001	до 1100

Транзисторы

Маломощные германиевые низкочастотные	от 1	до 100
Маломощные кремниевые низкочастотные	от 101	до 200
Мощные германиевые низкочастотные	от 201	до 300
Мощные кремниевые низкочастотные	от 301	до 400
Маломощные германиевые высокочастотные	от 401	до 500
Маломощные кремниевые высокочастотные	от 501	до 600
Мощные германиевые высокочастотные	от 601	до 700

Обозначения некоторых типов полупроводниковых приборов, выпускаемых после 1964 года

Первый элемент обозначения: буква Г (или цифра 1) — германиевый, буква К (или цифра 2) — кремниевый. Второй элемент обозначения: буква Д — диоды, Т — транзисторы, В — варикапы, А — диоды для сверхвысоких частот, Ф — фотоприборы, И — туннельные диоды, С — стабилизаторы и т. д. Третий элемент обозначения — цифра — конкретный тип прибора. Четвертый элемент обозначения — буква — разновидность приборов данного типа, имеющая некоторые отличия в параметрах.

Значение некоторых цифр в третьем элементе обозначения:

Для диодов:

от 101 до 399 — выпрямительные диоды
от 401 до 499 — универсальные диоды

Для фотоприборов:

от 101 до 199 — фотодиоды
от 201 до 299 — фототранзисторы

Для туннельных диодов:

от 101 до 199 — усилительные
от 201 до 299 — генераторные

Для стабилизаторов:

мощность до 0,3 *вт*, напряжение стабилизации 0,1—9,9 *в* —
от 101 до 199
мощность до 0,3 *вт*, напряжение стабилизации 10—99 *в* —
от 201 до 299
мощность до 5 *вт*, напряжение стабилизации 0,1 — 9,9 *в* —
от 401 до 499

Для транзисторов:

малая мощность (до 0,3 *вт*), низкочастотные (до 3 *Мгц*) — от 101 до 199
малая мощность, среднечастотные (до 30 *Мгц*) — от 201 до 299
малая мощность, высокочастотные (до 300 *Мгц*) — от 301 до 399
средняя мощность (до 1,5 *вт*), низкочастотные — от 401 до 499
средняя мощность, среднечастотные — от 501 до 599
средняя мощность, высокочастотные — от 601 до 699
большая мощность (больше 1,5 *вт*), низкочастотные — от 701 до 799
большая мощность, среднечастотные — от 801 до 899
большая мощность, высокочастотные — от 901 до 999

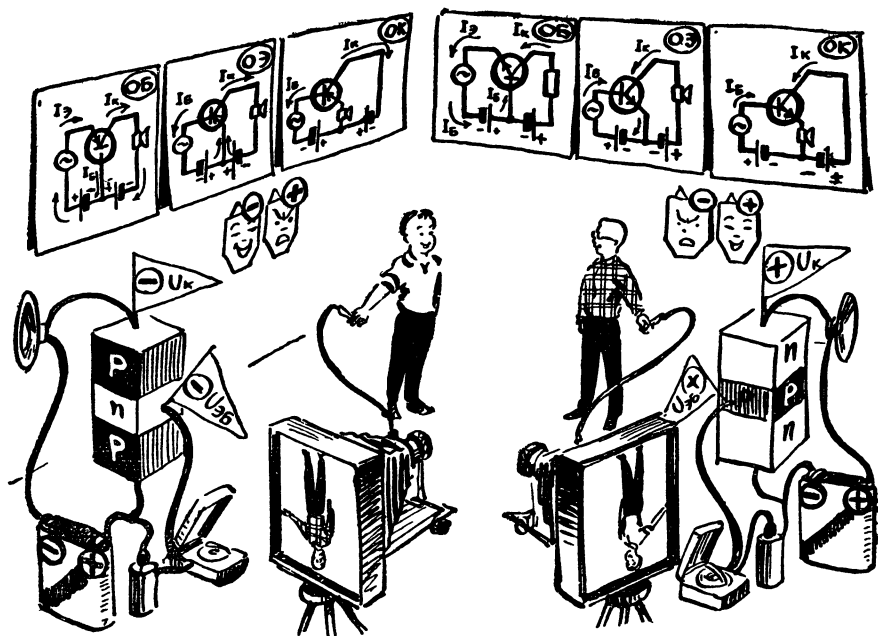


Рис. 94. Транзисторы разной структуры питаются напряжениями различной полярности.

Пользуясь приведенными в таблицах 8 и 9 «сотнями», можно по названию определить принадлежность прибора к той или иной основной группе. О различиях приборов внутри группы говорит конкретная цифра в названии прибора и следующая за ней одна из первых букв алфавита (А, Б, В и т. д.).

В названии транзисторов могут встречаться и некоторые еще не знакомые нам буквенные обозначения, характеризующие те или иные конструктивные особенности прибора. Так, например, буква «Э» в конце названия означает, что корпус транзистора сделан из алюминия. Буквы «МП» в начале названия (вместо «П») говорят о том, что соединение верхней части корпуса («колпачка») с его нижней частью («диском») осуществляется методом холодной сварки под давлением. Корпус транзисторов с обозначением «П» герметизируется менее совершенным способом — электроконтактной сваркой. Никаких отличий в параметрах транзисторов с обозначением «П» и «МП» не существует — транзистор МП41, например, полностью соответствует транзистору П41.

Данные некоторых типов транзисторов приведены в таб-

лице 10. В этой таблице вы найдете предельно допустимые режимы (коллекторный ток I_k , напряжение $U_{эк}$ между эмиттером и коллектором и мощность рассеивания на коллекторе P_k), которые превышать нельзя. Напряжение на коллекторе указано в таблицах со знаками «+» или «—». Это еще одно напоминание о полярности напряжения и направлении токов в транзисторах с разной структурой (рис. 94).

На коллекторе транзистора *p-n-p* должен быть «минус», на коллекторе транзистора *n-p-n* — «плюс»; транзистор *p-n-p* отпирается «минусом» на базе, а запирается «плюсом»; транзистор *n-p-n* наоборот — отпирается «плюсом» и запирается «минусом»; в транзисторе *p-n-p* ток идет от эмиттера через базу к коллектору (именно так движутся дырки), а в транзисторах *n-p-n* — от коллектора через базу к эмиттеру (не забудьте, речь идет только об условном направлении тока, о том, как нужно «водить пальцем» по схеме; см. стр. 142).

В наши таблицы входят некоторые параметры транзисторов, и прежде всего коэффициент усиления по току β . В официальных таблицах во многих случаях указывают коэффициент усиления по току α в схеме ОБ. Мы же пересчитали его в коэффициент β (рис. 72) и сделали наши таблицы хотя и не похожими на официальные, но зато более удобными.

В таблице 10 приводится величина обратного тока коллектора $I_{ко}$. Вы, конечно, помните, что всегда желательно, чтобы $I_{ко}$ был как можно меньше. Хотя бы потому, что чем меньше этот ток, тем в меньшей степени режим транзистора зависит от температуры (рис. 88). Приведенная в таблицах величина $I_{ко}$ официально называется наибольшей, фактически $I_{ко}$ бывает меньше, чем указано в таблицах.

В таблицу 10 включена также предельная частота усиления f_a . Этот параметр указывает, на какой частоте коэффициент усиления α падает примерно на 30%. На частотах, больших, чем f_a , усиление уменьшается еще резче, и транзистор перестает работать (рис. 92). Граничная частота f_a , как и сам коэффициент α , относится лишь к схеме ОБ; для схемы ОЭ граничная частота значительно (примерно в β раз) меньше.

Если внимательно присмотреться к таблицам с данными транзисторов, то можно заметить, что многие разные типы приборов имеют довольно близкие параметры и предельные режимы, в то время как даже в пределах одного и того же типа транзисторов параметры могут заметно различаться. Все это говорит о том, что в случае необходимости можно довольно широко заменять один тип транзистора другим. Так, почти

Таблица 10

**Предельно допустимые режимы (напряжения, токи, мощности)
и основные параметры транзисторов**

Название прибора	Схема выводов (рис. 92)	Предельно допустимый режим			Параметры		
		$U_{эк} (в)$	$I_K (ма)$	$P_K (мвт)$	β	$I_{к0} (мка)$	$f_a (Мгц)$
1	2	3	4	5	6	7	8
П4А	1	-50	5а	20/2 <i>вт</i>	5—20	500	0,15
П4Б		-60	5а	25/3 <i>вт</i>	15—40	500	0,15
П4В		-35	5а	25/3 <i>вт</i>	10—32	500	0,15
П4Г		-50	5а	25/3 <i>вт</i>	15—30	500	0,15
П4Д		-50	5а	25/3 <i>вт</i>	30—70	500	0,15
П8	2,3	+15	20	150	10	30	0,5
П9		+15	20	150	12	15	0,5
П9А		+15	20	150	15—45	30	1
П10		+15	20	150	15—30	30	1
П10А		+30	20	150	15—30	30	1
П10Б		+30	20	150	25—50	30	1
П11		+15	20	150	25—50	30	2
П11А		+15	20	150	45—90	30	2
П13	2,3	-15	150	150	12	30	0,5
П13А		-15	150	150	30	10	0,5
П13Б		-15	150	150	20—60	10	1
П14		-15	150	150	20—40	30	1
П14А		-30	150	150	20—40	30	1
П14Б		-30	150	150	30—60	30	1
П15		-15	150	150	30—60	30	2
П15А		-15	150	150	50—100	30	2
П16		-15	150	200	20—35	30	1
П16А		-15	150	200	30—50	25	1
П16Б		-15	150	200	45—100	25	2
П20	2,3	-20	300	150	50—150	50	1
П20А		-20	300	150	50—150	50	2
П20Б		-20	300	150	80—200	50	1,5

Продолжение табл. 10

1	2	3	4	5	6	7	8
П21	2,3	—35	500	150	20—60	50	1
П21А		—35	500	150	20—150	50	1
П21В		—35	300	150	20—100	50	1,5
П21Г		—30	300	150	20—80	50	1
П21Д		—30	300	150	60—200	50	1
П21Е		—35	300	150	80—150	50	0,7
П25		—40	400	200	10—25	150	0,2
П25А		—40	400	200	20—50	150	0,2
П25Б		—40	400	200	30—80	150	0,5
П26		—70	400	200	10—25	150	0,2
П26А		—70	400	200	20—50	150	0,2
П26Б		—70	400	200	30—80	150	0,5
П35	2,3	+15	20	150	10—125	30	0,5
П36А		+15	20	150	15—45	30	1
П37		+15	20	150	15—30	30	1
П37А		+30	20	150	15—30	30	1
П38А		+15	20	150	45—100	30	2
П39	2,3	—10	150	150	12	15	0,5
П39Б		—10	150	150	20—60	15	0,5
П40		—10	150	150	20—40	15	1
П40А		—30	150	150	20—40	15	1
П41		—10	150	150	30—60	15	1
П41А		—10	150	150	50—100	15	1
П42		—15	150	200	20—35	25	1
П42А		—15	150	200	30—50	25	1
П42Б		—15	150	200	45—100	25	1
П101	2,3	+10	20	150	9	1	0,2
П101А		+10	20	150	9	1	0,2
П102		+10	20	150	9	1	0,465
П103		+10	20	150	9	1	1
П104	3	—60	10	150	9—45	0,4	0,1
П105		—30	10	150	9	0,4	0,1
П106		—15	10	150	15—10	0,4	0,5

Продолжение табл. 10

1	2	3	4	5	6	7	8
П111	3	+20	20	150	10—25	3	0,5
П111А		+10	20	150	10—30	1	0,5
П111Б		+20	20	150	15—45	3	0,5
П112		+10	20	150	15—45	3	0,5
П113		+10	20	150	15—45	3	1
П113А		+10	20	150	35—105	3	1,2
П114	3	—60	10	150	9	10	0,1
П115		—30	10	150	9—45	10	0,1
П116		—15	10	150	15—100	10	0,5
П201	4	—30	1,5 а	10/1 см	20	0,4 ма	0,1
П201А		—30	1,5 а	10/1 см	40	0,4 ма	0,2
П202		—55	2 а	10/1 см	20	0,4 ма	0,1
П203		—55	2 а	10/1 см		0,4 ма	0,2
П210	5	—45	12 а	60/10 см	15	8 ма	0,1
П210А		—65	12 а	60/10 см	15	8 ма	0,1
П210Б		—40	12 а	45/2 см	10	15 ма	0,1
П201В		—40	12 а	45/2 см	10	15 ма	0,1
П213	6	—45	5 а	10/1,5 см	20—50	0,15 ма	0,15
П213А		—45	5 а	10/1,5 см	20	1 ма	0,15
П213Б		—45	5 а	10/1,5 см	20—150	1 ма	0,15
П214		—60	5 а	10/1,5 см	20—50	0,3 ма	0,15
П214А		—60	5 а	10/1,5 см	50—150	0,3 ма	0,15
П214Б		—60	5 а	10/1,5 см	20—150	0,15 ма	0,15
П214В		—60	5 а	10/1,5 см	20	1,5 ма	0,15
П214Г		—60	5 а	10/1,5 см		1,5 ма	0,15
П215		—80	5 а	10/1,5 см	20—150	0,3 ма	0,15
П216Б	6	—35	7,5 а	24/1,5 см	10	1,5 ма	0,1
П216В		—35	7,5 а	24/1,5 см	30	2 ма	0,1
П216Г		—50	7,5 а	24/1,5 см	5	2,5 ма	0,1
П216Д		—50	7,5 а	24/1,5 см	15—30	2 ма	0,1
П217	6	—45	7,5 а	24/1,5 см	18	0,4 ма	0,1
П217А		—45	7,5 а	24/1,5 см	20—60	0,4 ма	0,1
П217Б		—45	7,5 а	24/1,5 см	20	0,4 ма	0,1
П217В		—60	7,5 а	24/1,5 см	15—40	0,4 ма	0,1
П217Г		—60	7,5 а	24/1,5 см	15—40	0,4 ма	0,1

Продолжение табл. 10

1	2	3	4	5	6	7	8
П302	7	—35	500	7/1 <i>вт</i>	10	100	0,2
П303		—60	500	10/1 <i>вт</i>	6	100	0,1
П303А		—60	500	10/1 <i>вт</i>	6	100	0,1
П304		—80	500	10/1 <i>вт</i>	5	100	0,05
П306		—60	400	10/1 <i>вт</i>	7—30	100	0,05
П306А		—80	400	10/1 <i>вт</i>	5—50	100	0,05
П401	9,11	—10	20	100	16—300	10	30
П402		—10	20	100	16—250	5	60
П403		—10	20	100	30—100	5	120
П403А		—10	20	100	16—200	5	120
П410	8	— 6	20	100	27—120	2	200
П410А		— 6	20	100	80—250	2	200
П411		— 6	20	100	27—120	2	400
П411А		— 6	20	100	80—250	2	400
П414	11	—10	10	100	25—100	5	60
П414А		—10	10	100	60—120	5	60
П414Б		—10	10	100	100—200	5	60
П415		—10	10	100	25—100	5	120
П415А		—10	10	100	60—120	5	120
П415Б		—10	10	100	100—200	5	120
П416		—12	25	100	20—80	3	60
П416А		—12	25	100	60—125	3	90
П416Б		—12	25	100	100—250	3	120
П420		—10	10	50	12	10	30
П421		—10	10	50	15	10	30
П422		—10	10	50	30—100	5	60
П422А		—10	10	50	15	5	40
П423		—10	10	50	30—100	5	60
П423А		—10	10	50	15	5	80
П501	12	+20	10	150	9	100	10
П501А		+20	10	150	19	100	10
П502		+20	10	150	9	100	30
П502А		+20	10	150	19	100	30
П502Б		+20	10	150	9	100	30

Продолжение табл. 10

1	2	3	4	5	6	7	8
П503	12	+20	10	150	9	120	60
П503А		+20	10	150	19	120	60
П601	13	—25	1	3/0,5	20	0,2	30
П601АИ		—25	1	3/0,5	40—100	0,1	30
П601БИ		—30	1	3/0,5	80—250	0,1	30
П602И		—30	1	3/0,5	40—100	0,1	30
П602АИ		—30	1	3/0,5	80—250	0,1	30
П605	13	—40	1,5	3/0,5	20—60	2	
П605А		—40	1,5	3/0,5	40—120	2	
П606		—25	1,5	3/0,5	20—60	2	30
П606А		—25	1,5	3/0,5	40—120	2	30
П607	14	—25	0,3	1,5/0,5	20—80	0,3	60
П607А		—25	0,3	1,5/0,5	60—200	0,3	60
П608		—25	0,3	1,5/0,5	40—120	0,3	90
П608А		—25	0,3	1,5/0,5	80—240	0,3	90
П608Б		—40	0,3	1,5/0,5	40—120	0,5	90
П609		—25	0,3	1,5/0,5	40—120	0,3	120
П609А		—25	0,3	1,5/0,5	80—240	0,3	120
П609Б		—40	0,3	1,5/0,5	80—240	0,5	120
П701	7	+40	0,5	10/1	10—40	0,1	20
П701А		+60	0,5	10/1	15—60	0,1	20
П701Б		+35	0,5	10/1	30—100	0,1	20
ГТ108А	15	—10	50	75	20—50	10	0,5
ГТ108Б		—10	50	75	35—80	10	1
ГТ108В		—10	50	75	60—130	10	1
ГТ108Г		—10	50	75	110—250	10	1
ГТ109А	16	— 6	20	30	20—50	5	1
ГТ109Б		— 6	20	30	35—80	5	1
ГТ109В		— 6	20	30	60—130	5	1
ГТ109Г		— 6	20	30	110—250	5	1
ГТ109Д		— 6	20	30	20—70	5	3
ГТ109Е		— 6	20	30	50—100	3	5
ГТ109Ж		— 6	20	30	50—100	3	5

Продолжение табл. 10

1	2	3	4	5	6	7	8
ГТ308А	11	—12	50	150	20—75	5	90
ГТ308Б		—12	50	150	50—120	5	120
ГТ308В		—12	50	150	80—200	5	120
ГТ309А	17	—10	10	50	20—70	5	90
ГТ309Б		—10	10	50	60—180	5	90
ГТ309В		—10	10	50	20—70	5	60
ГТ309Г		—10	10	50	60—180	5	60
ГТ309Д		—10	10	50	20—70	5	30
ГТ309Е		—10	10	50	60—180	5	30
ГТ310А	16	—12	10	20	20—70	5	160
ГТ310Б		—12	10	20	60—180	5	160
ГТ310В		—12	10	20	20—70	5	120
ГТ310Д		—12	10	20	60—180	5	80
ГТ310Е		—12	10	20	20—70	5	80
ГТ311Е	18	+12	50	150	15—80	10	400
ГТ311Ж		+12	50	150	50—200	10	450
ГТ311И		+10	50	150	100—300	10	600
ГТ313А	18	—12	10	100	20—250	5	450
ГТ313Б		—12	10	100	20—250	5	650
ГТ320А	11	—12	150	200	20—80	10	120
ГТ320Б		—11	150	200	50—160	10	190
ГТ320В		—9	150	200	80—250	10	250
ГТ321Г	11	—40	2 а	160	20—60	500	90
ГТ321Д		—40	2 а	160	40—120	500	90
ГТ321Е		—40	2 а	160	80—200	500	90
ГТ322А	19	—10	5	50	20—70	4	120
ГТ322Б		—6	5	50	50—120	4	120
ГТ322В		—10	5	50	20—70	4	75
ГТ322Г		—10	5	50	50—120	4	75
ГТ322Д		—10	5	50	20—70	4	75
ГТ322Е		—10	5	50	50—120	4	75
ГТ403А	20	—30	1,25 а	4/0,65 см	20—60	50	8
ГТ403Б		—30	1,25 а	4/0,65 см	50—150	50	8
ГТ403В		—45	1,25 а	4/0,65 см	20—60	50	8

1	2	3	4	5	6	7	8
ГТ403Г	20	—45	1,25 а	4/0,65 см	50—150	50	8
ГТ403Д		—45	1,25 а	4/0,65 см	50—150	50	8
ГТ403Е		—45	1,25 а	4/0,65 см	30	50	8
ГТ403Ж		—60	1,25 а	4/0,65 см	20—60	70	8
ГТ403И		—60	1,25 а	4/0,65 см	50—150	70	8
ГТ701А	21	—55	12 а	50 см	10	6	0,05
КТ301	22	+20	10	150	20—60	40	30
КТ301А		+20	10	150	40—120	40	30
КТ301Б		+20	10	150	10—32	40	30
КТ301В		+20	10	150	20—60	40	30
КТ301Г		+20	10	150	10—32	40	45
КТ301Д		+20	10	150	20—60	40	45
КТ301Е		+20	10	150	40—120	40	45
КТ301Ж		+20	10	150	80—300	40	45
КТ312А	22	+15	30	225	10—100	10	120
КТ312Б		+30	30	225	25—100	10	180
КТ312В		+15	30	225	50—280	10	180
КТ315А	23	—25	100	150	20—90	1	330
КТ315Б		—20	100	150	70—350	1	330
КТ315В		—40	100	150	20—90	1	330
КТ315Г		—35	100	150	70—350	1	330
КТ601	24	+100	30	500	16	500	60
КТ801А	10	+80	2	5	13—15	2	15
КТ801Б		+60			20—100	2	15
					$I_{KH}=20$		
КТ802А	21	+150	5	50	15	60	15
КТ805А	21	+160	5	3/30	15	30	30
КТ805Б		+135	5	3/30	15		30

Примечания:

1. Жирным шрифтом выделены названия транзисторов обратной проводимости (п-р-п).

2. Величина тока, указанная жирным шрифтом, — это максимально допустимый импульсный ток. Средний ток в несколько раз меньше.

3. Величина предельно допустимой мощности, указанная над чертой, соответствует случаю использования транзистора с радиатором, под чертой — без радиатора.

4. Большинство транзисторов, имеющих схему выводов 2 (по рис. 92), могут иметь несколько иное конструктивное оформление (название начинается с букв „МП“ вместо „П“; см. стр. 257) и соответственно схему выводов 3.

5. Во многих случаях в таблицах приводятся приближенные параметры, с достаточной, однако, точностью для радиолюбительской практики.

во всех схемах, о которых будет рассказано дальше, вместо транзисторов П13 можно применить любые другие маломощные транзисторы. Лишь в некоторых случаях при этом придется подогнать режим, заменив, например, резистор в цепи базы, через который подается начальное отрицательное смещение.

Точно так же можно заменять высокочастотные транзисторы, например, вместо П416 применить П403, П402 или П401. При замене нужно, конечно, обращать внимание на частоту, которую должен и может усиливать транзистор, и представлять, насколько изменится усиление из-за различия в значении коэффициента β . Нужно также проверить, пригоден ли для нового транзистора существующий режим. Так, например, если транзистор П401 работает в схеме, где коллекторное напряжение составляет 9 в, то его уже нельзя заменить транзистором П411, для которого допустимое коллекторное напряжение составляет 6 в. Кроме того, нужно обязательно по справочнику проверить напряжение, допустимое для эмиттерного перехода.

Чтобы хорошо освоиться с транзисторами, полезно периодически просматривать таблицы их параметров, а также рисунки, где указано расположение выводов эмиттера базы и коллектора (рис. 95). Это, конечно, не самое веселое занятие, но зато оно через некоторое небольшое время даст очень важный результат: вы будете и без справочника знать, что собой представляют важнейшие типы полупроводниковых приборов, а значит, сможете легче разбирать транзисторные схемы.

И ВСЕ ЖЕ ПРИЕМНИК...

У начинающего радиолюбителя, который выбирает тему для своей первой практической работы и не преследует при этом каких-то определенных целей, есть много разных вариантов «начала». Можно, например, построить несложную радиолу, простейший прибор электронной автоматики, электронный музыкальный инструмент на одном транзисторе или, наконец, самую популярную транзисторную самоделку — миниатюрный приемник.

Правда, в последнее время, когда радиопромышленность буквально завалила магазины транзисторными приемниками — простыми и сложными, дешевыми и дорогими, — интерес любителей к самодельному приемнику заметно уменьшился. А зря. Во всяком случае, для начинающего любителя, делаю-

шего первые шаги, приемник, пожалуй, самый удачный объект самостоятельной практической работы.

Во-первых, приемник легко допускает усложнение — можно постепенно, шаг за шагом, переходить от простых схем к более сложным. Можно, например, собрать приемник на одном транзисторе, затем добавить к нему еще один усилительный каскад, затем еще один и т. д. (рис. 96).

Во-вторых, в приемнике вы встретитесь с многими популярными элементами, в известной мере общими для электронной аппаратуры: усилителем ВЧ, усилителем НЧ, согласующим трансформатором, разнообразными фильтрами, выпрямителем, детектором и др.

И, наконец, в-третьих, делая приемник, вы можете довольно быстро получить «плату за страх». Приняв несколько станций, услышав речь или музыку из своего собственного, своими руками сделанного приемника, вы испытаете неповторимое радостное чувство победителя, и электроника уже не будет казаться вам страшной и недоступной. Уже из-за одного этого — из-за возможности сравнительно быстро и просто получить практический результат и преодолеть чувство страха перед электронными схемами — есть прямой смысл отдать предпочтение простейшему самодельному приемнику и именно с него начинать свой путь в практическую электронику.

С практическими схемами простейших приемников мы уже встречались в начале книги (рис. 43, 44). Но в то время мы знали лишь одну схему усилителя — схему ОБ, — и это, конечно, очень ограничило ассортимент практических схем. Сейчас, используя знания, полученные при знакомстве с абстрактным усилителем, мы можем резко расширить набор практических схем приемника. Чтобы не повторяться, мы возьмем от старого приемника лишь входной контур (таблица 7) и именно его применим во всех конструкциях, о которых пойдет речь дальше.

Начнем с любопытного варианта приемника на одном транзисторе (рис. 97—1). Всмотревшись в схему, вы не обнаружите на ней источника питания — приемник питается энергией радиоволн. Дело в том, что вблизи мощных радиостанций напряженность электромагнитного поля настолько велика, что его можно использовать как источник питания. (На расстоянии нескольких сот метров от мощной станции радиоволны могут даже зажечь лампочку, включенную в цепь приемной антенны.) Высокочастотное напряжение из антенной цепи выпрямляется диодом D_1 и подается на коллектор транзистора T_1 , включенного по уже знакомой нам схеме три-

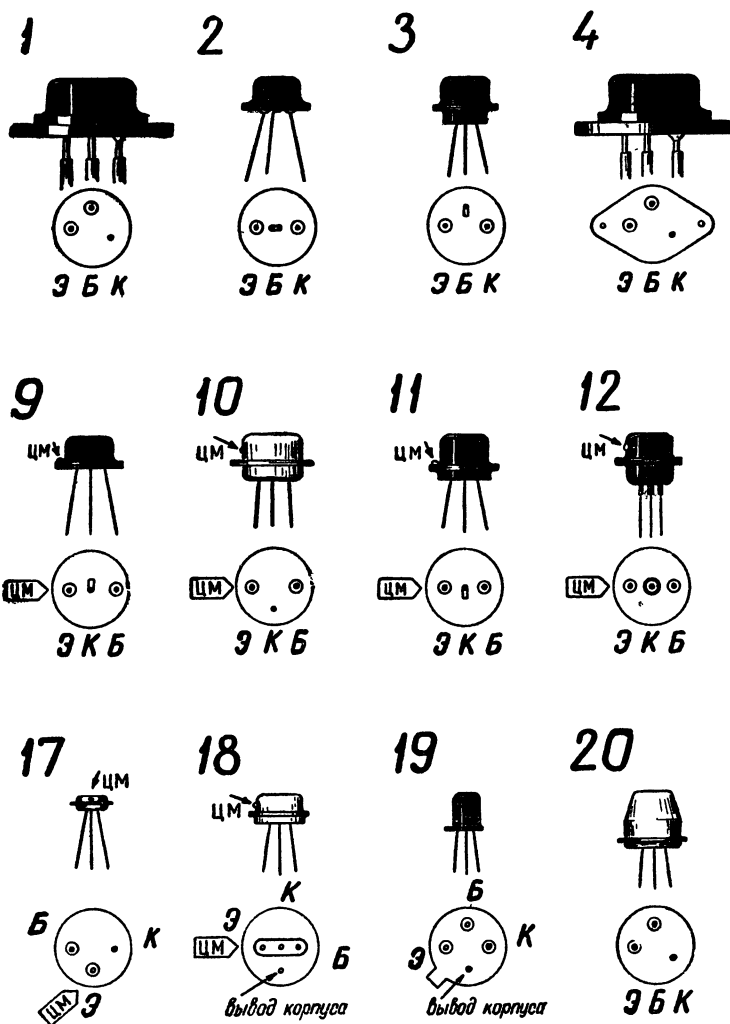
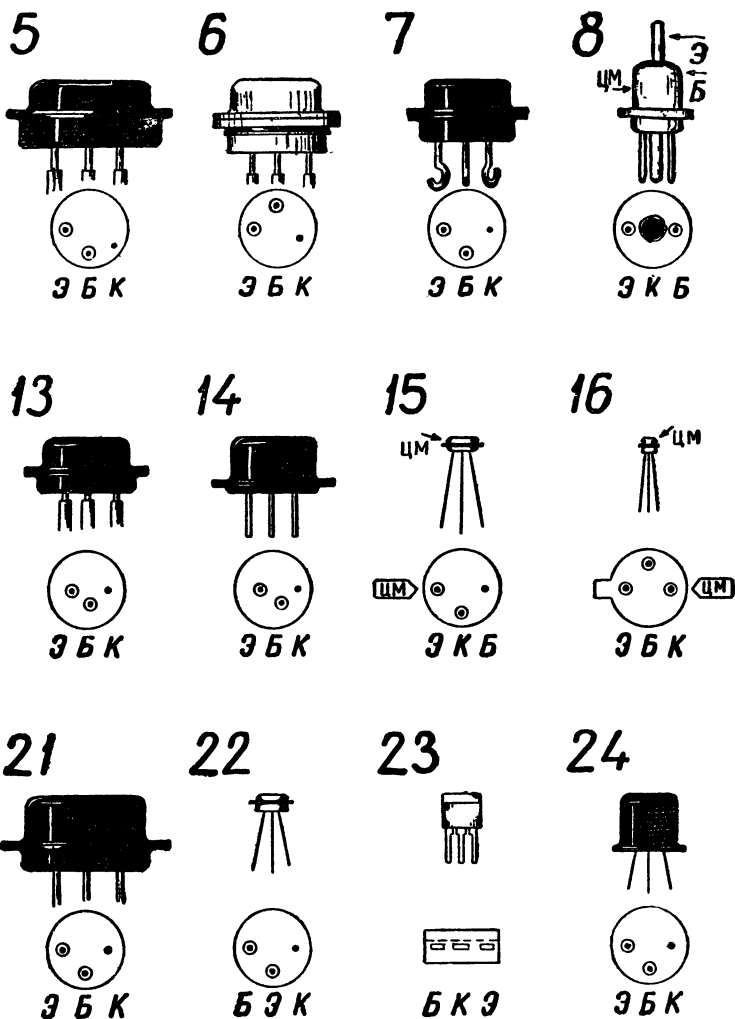


Рис. 95. Основные типы тран-

одного детектора (рис. 43—2). Конденсатор C_1 — фильтр выпрямителя. Отвод у катушки сделан, как и обычно, от небольшой части витков (стр. 123). Обратите внимание, в каком направлении включен диод, — только при таком включении выпрямленное напряжение будет попадать «минусом» на кол-



висторов (ЦМ — цветная метка).

лктор. Еще раз напоминаем: приемник, питаемый «свободной энергией», будет работать лишь на близком расстоянии от мощной станции, в пределах нескольких километров.

В качестве нагрузки в коллекторную цепь включен громкоговоритель Γp_1 . Ни в этом, ни в других приемниках мы не

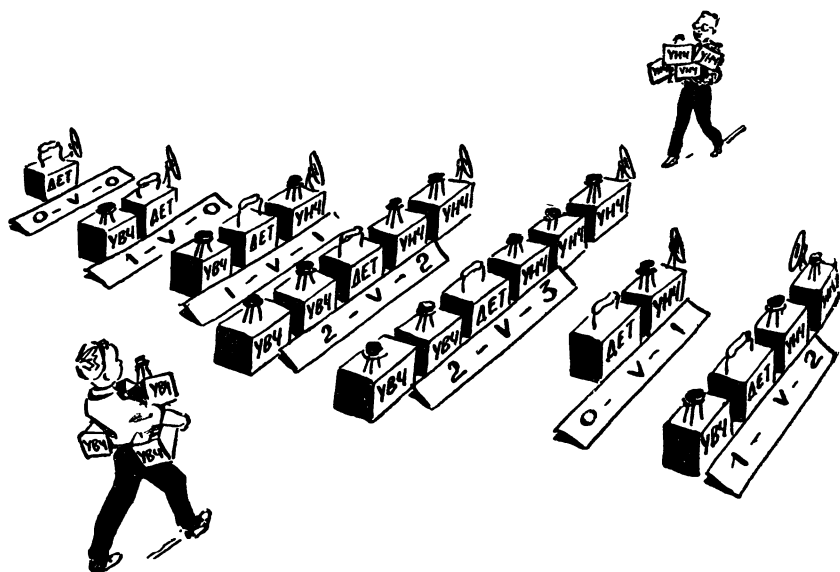


Рис. 96. Приемники прямого усиления прежде всего различаются числом каскадов усиления высокой и низкой частот.

будем указывать конкретный тип громкоговорящего устройства. Это может быть и телефонный капсиль ДМ-4, и известный капсиль ДЭМШ, и, наконец, один из динамических громкоговорителей (таблица 11) с выходным трансформатором (таблица 12). Лучше всего, конечно, использовать динамический громкоговоритель — он весьма эффективно преобразует электрические колебания в звуковые. И в то же время громкоговоритель не создает сильных искажений, как, например, телефонный капсиль ТК-60, который ко всему еще требует немалой мощности для создания более или менее громкого звука.

Вполне вероятно, что для простейших приемников громкоговоритель окажется непригодным — слишком мала будет мощность электрических колебаний, для того чтобы создать мощный звук. В этом случае вместо громкоговорителя, не меняя схемы, можно включить головные телефоны.

Следующий приемник (рис. 97—2) собран по схеме 0—V—1.

Эта сокращенная запись говорит о том, как построен усилительный тракт приемника. Буква «V» — условное обозначение детектора; цифра, которая стоит до буквы «V», указывает, сколько в приемнике каскадов усиления высокой частоты; цифра, стоящая после буквы «V», — сколько каскадов усиления

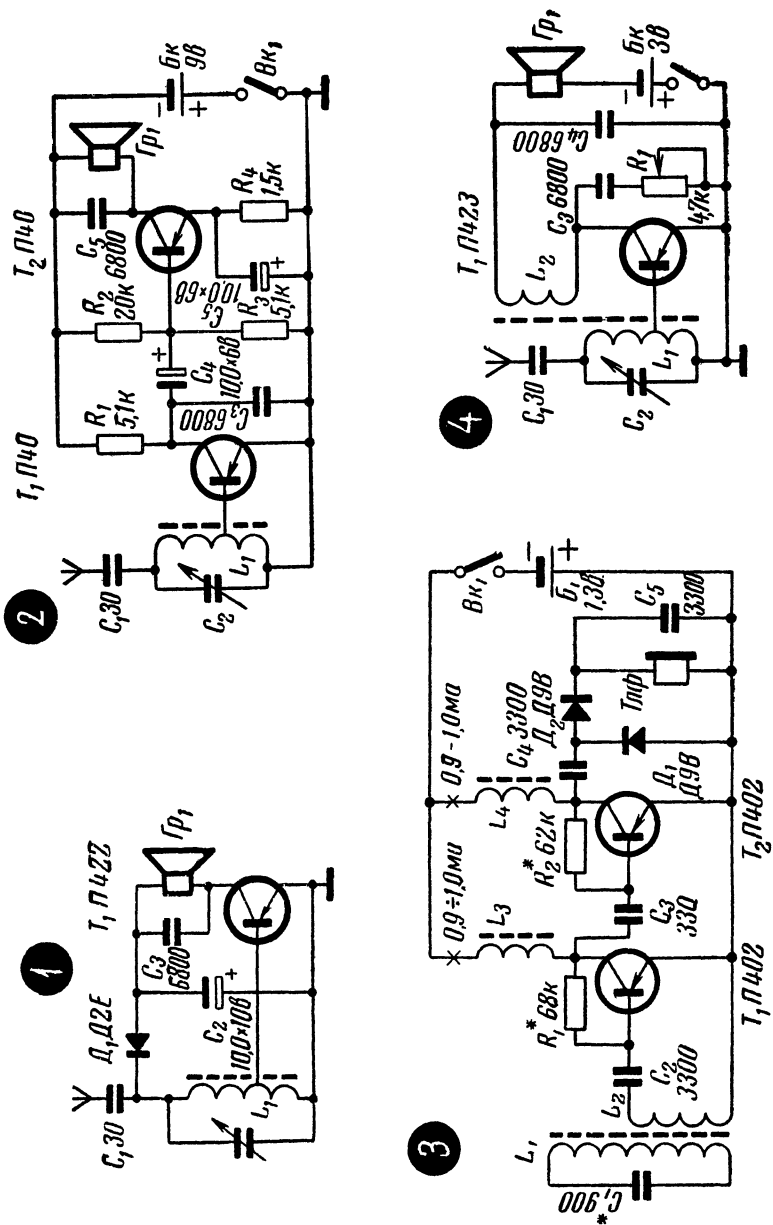


Рис. 97. Схемы простейших приемников.

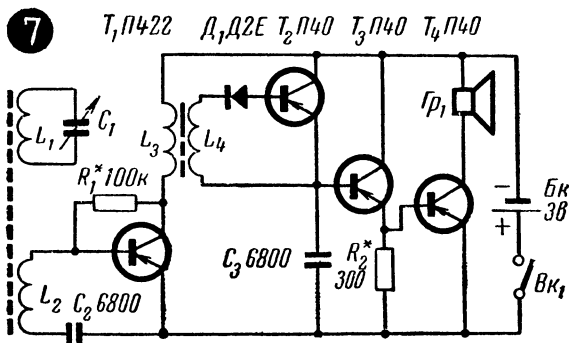
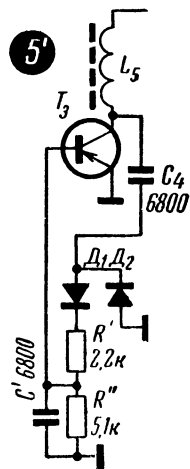
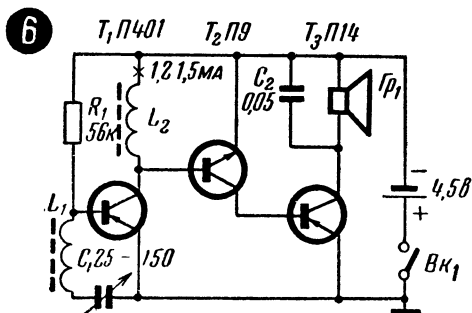
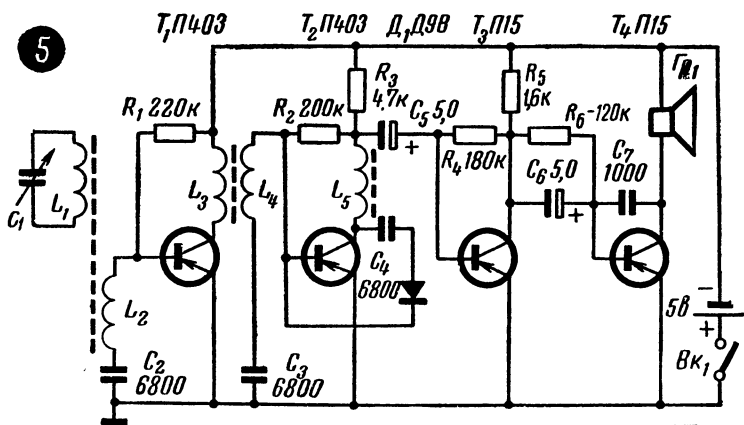


Рис. 97. Схемы простейших приемников (продолжение).

Громкоговорители

Тип громкоговори- теля*	Сопротивление звуко- вой катушки (ом)	Полоса частот (гц)	Габариты** (мм)
0,025ГД—1	6 ± 0,6	600—4000	40×16,5
0,1ГД—3	6,5 ± 0,7	400—3000	50×20,5
0,1ГД—8	10 ± 1,5	440—3000	60×21,5
0,15ГД—1	6 ± 0,6	400—8000	60×22
0,2ГД—1	6 ± 0,6	300—10 000	60×25
0,25ГД—1	8 ± 0,8	300—3000	72×34
0,25ГД—9	10 ± 1,5	300—3500	70×36
0,5ГД—11	5 ± 0,5	150—7000	105×36
0,5ГД—12	4,5 ± 0,7	150—7000	105×36
1ГД—28	6,5 ± 0,7	70—10 000	156× 98×41
2ГД—28	4,5 ± 0,5	70—10 000	152×55
3ГД—28	4,5 ± 0,7	80—8000	204×134×55
4ГД—28	4,5 ± 0,5	60—12 000	202×41
5ГД—18	4,5 ± 0,5	70—12 000	254×170×80
5ГД—28	4,5 ± 0,7	100—10 000	254×170×68

Примечания: *Первая цифра в названии громкоговорителя указывает его мощность в ваттах.

**Для круглых громкоговорителей указаны диаметр диффузора (первая цифра) и высота („толщина“), а для эллиптических громкоговорителей — размеры диффузора по осям эллипса и высота („толщина“).

низкой частоты; запись 0—V—2 означает, что в приемнике есть детектор (без него ведь приемника и быть не может!) и двухкаскадный усилитель НЧ, а усилителя ВЧ нет совсем (рис. 96).

Детектор выполнен на триоде T_1 , причем детектирование осуществляется в эмиттерной цепи. В коллекторной цепи появляется весь «букет» усиленных составляющих продетектированного сигнала, в том числе высокочастотная и низкочастотная составляющие. Нам, разумеется, нужна только низкочастотная составляющая (рис. 29), и поэтому в схему вводится конденсатор C_3 , который сразу же замыкает на «землю» высокочастотную составляющую коллекторного тока.

Мы уже подробно разбирали (рис. 79), каким образом

Выходные (ВТ) и межкаскадные (МТ) трансформаторы для транзисторных радиоприемников

Название приемника	Назначение трансформатора	Сердечник	Первичная обмотка	Вторичная обмотка
„Атмосфера“	ВТ	Ш 6,4×6	1 800 (0,1)	400+400 (0,1)
„Альпинист“	МТ	Ш 6,4×6	2 200 (0,1)	260+260 (0,1)
	ВТ	Ш 6,4×6	405+405 (0,12)	90+10 (0,38)
„Банга“	МТ	Ш 5×4	1 600 (0,08)	500+500 (0,08)
„Селга“	ВТ	Ш 5×6	225+225 (0,15)	66 (0,35)
„Космонавт“	МТ	Ш 6×12	800 (0,15)	200+200 (0,18)
	ВТ	Ш 6×12	120+120 (0,27)	60+4 (0,44)
„Спорт-2“	МТ	Ш 4×6	2 200 (0,09)	500+500 (0,09)
	ВТ	Ш 4×6	320+320 (0,15)	120 (0,35)
„Спидола“	МТ	Ш 8×8	2 200 (0,1)	480+480 (0,14)
	ВТ	Ш 8×8	350+350 (0,18)	184 (0,29)
„Сокол-4“	МТ	Ш 5×6,3	150 (0,09)	420+420 (0,09)
	ВТ	Ш 5×6,3	280+280 (0,14)	128 (0,25)

многие цепи усилителя встречаются на общем проводе, к которому подключено заземление и который поэтому для краткости называют «землей». В данном случае, замкнув высокочастотную составляющую на «землю», мы сразу же отправили ее на эмиттер транзистора T_1 . Коллекторный ток от коллектора в итоге всегда приходит к эмиттеру. Но при этом он должен еще обязательно пройти по сопротивлению нагрузки и поработать там, создавая мощную копию сигнала. Замкнув высокочастотную составляющую прямо на эмиттер, мы не пустили ее в нагрузку R_1 и поэтому получим в коллекторной цепи мощную копию одной только низкочастотной составляющей.

С резистора нагрузки R_1 через разделительный конденсатор C_4 (рис. 78) сигнал поступает на базу усилителя НЧ, собранного на транзисторе T_1 по схеме ОЭ. В этом каскаде используется знакомая нам схема температурной стабилизации. На базу подаются одновременно два напряжения: положительное с резистора R_4 и отрицательное с нижней части дели-

теля R_2R_3 . Отрицательное напряжение на 0,2 в больше положительного, и таким образом на базе действует небольшой «минус».

Сейчас уместно обратить внимание на еще одну деталь схемы — полярность включения электролитических конденсаторов C_4 и C_6 . Емкость электролитических конденсаторов определяется не только площадью их обкладок, свернутых в трубочку. Емкость электролитических конденсаторов в основном обусловлена некоторыми физическими процессами в расположенном между обкладками тончайшем слое окислов. Процессы эти возникают, когда через электролитический конденсатор идет постоянный ток определенного направления. При токе иного направления конденсатор может оказаться просто пробитым. В этом отношении электролитический конденсатор чем-то напоминает диод, который по-разному ведет себя при различных направлениях тока.

Вывод из всего сказанного такой: электролитический конденсатор можно включать в цепи, где наряду с переменным током присутствует еще и постоянный, причем включать конденсатор нужно так, чтобы указанный на схеме «плюс» (светлая обкладка) совпадал с обозначением на корпусе конденсатора (рис. 98).

На схемах, как правило, указывают полярность включения электролитического конденсатора. Если же полярность на схеме не указана, то ее нетрудно установить самому, проследив, как попадает к тому или иному участку схемы питающее напряжение. Трудности возникают лишь в том случае, если к обеим обкладкам конденсатора подводится напряжение одного и того же знака. Например, если к обеим обкладкам подводится «минус». Здесь нужно прикинуть, какой из этих «минусов» больше, и именно к нему подключить вывод конденсатора, на котором и стоит значок «минус». Так, например, на нашей схеме конденсатор C_4 включен между двумя «минусами», а своим минусовым выводом этот конденсатор подключен к коллектору транзистора T_1 , на котором отрицательное напряжение больше, чем на резисторе R_3 .

Несколько слов для тех, кого удивляет отсутствие смещения на базе транзистора T_1 . Дело в том, что этот транзистор работает в режиме детектирования и его эмиттерный переход должен «срезать» половину высокочастотного модулированного напряжения. А для этого на базе не должно быть смещения (рис. 36).

Следующий приемник выполнен по схеме 2—V—0, рассчитан на прием одной станции, работает на головные телефоны и питается от одного гальванического элемента на 1,5 в.

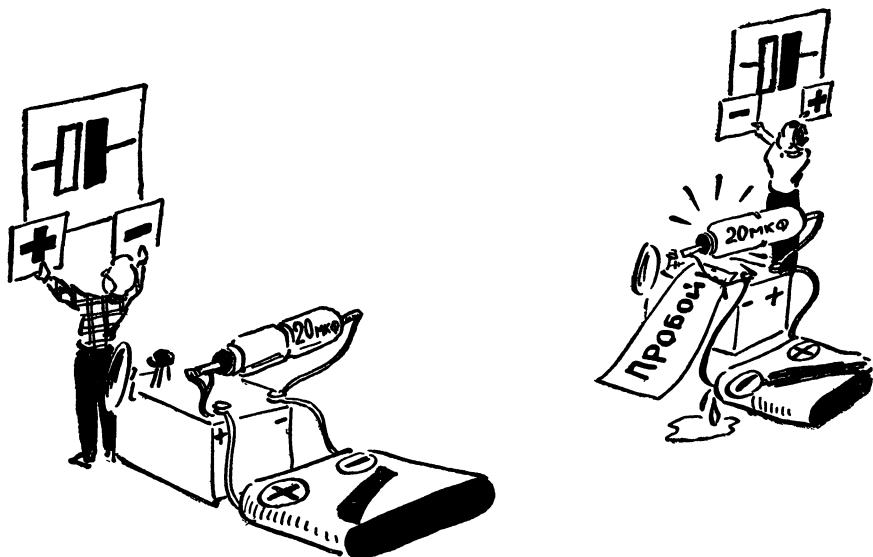


Рис. 98. Электролитический конденсатор обязательно должен находиться под постоянным напряжением, поданным в определенной полярности.

Применить столь низкое питающее напряжение оказалось возможным благодаря тому, что в качестве нагрузки в обоих каскадах используются катушки (L_3 и L_4). На них почти не теряется постоянное напряжение (рис. 38) и в то же время создается сравнительно большое напряжение усиленного сигнала (Воспоминание № 15).

Детектор выполнен по схеме с удвоением (рис. 27—17). Начальное смещение на базу каждого транзистора устанавливают подбором резисторов R_1 и R_2 с таким расчетом, чтобы коллекторный ток покоя составлял примерно 1 ма. Резисторы R_1 и R_2 , хотя они и подключены непосредственно к коллектору (рис. 87, листок Б), не являются элементами термостабилизации: на катушках L_3 и L_4 почти нет постоянного падения напряжения, и постоянное напряжение на коллекторе примерно такое же, как и на «минусе» батареи.

Обратите внимание, что емкость разделительного конденсатора C_3 во много раз меньше, чем емкость аналогичного разделительного конденсатора C_4 в предыдущей схеме. Как вы уже, очевидно, догадались, разница эта связана с тем, что первый из конденсаторов «работает» в усилителе ВЧ, а второй — в усилителе НЧ (Воспоминание № 13). Конденсатор C_2

вводится в схему для того, чтобы катушка L_2 не закорачивала входную цепь T_1 (эмиттерный переход) по постоянному току.

В заключение данные деталей. Катушки L_3 и L_4 намотаны на кольцах из феррита Ф-600 с внешним диаметром 8 мм и внутренним 5 мм. Каждая катушка содержит по 200 витков провода ПЭЛШО 0,12. Данные магнитной антенны: стержень из феррита Ф-600, диаметр 8 мм, длина 45 мм; катушка L_1 содержит 220 витков провода ПЭ 0,2, а катушка L_2 (она намотана поверх L_1) — 10 витков того же провода. Данные эти действительны лишь для фиксированной настройки на станцию «Маяк», работающую на волне 547 м. Если вы захотите настроиться на другую станцию, то придется менять не только данные катушки L_1 (или конденсатора C_1), но, возможно, еще и данные катушек L_3 и L_4 .

Прежде чем разбирать следующую схему (рис. 97—4), вернемся к предыдущей (рис. 97—2). Вы, очевидно, помните, что в коллекторной цепи нашего первого каскада — триодного детектора — мы сразу же замкнули на «землю» высокочастотную составляющую продетектированного сигнала. Она оказалась просто отходом производства. Но, как говорится, у хорошего хозяина ничего не пропадает, и этот высокочастотный «отход» тоже можно использовать для дела.

Входным элементом всех наших приемников является колебательный контур, настроенный в резонанс на частоту принимаемой станции. За счет резонанса контур сам повышает напряжение сигнала (Воспоминания №№ 18, 19, 20), причем повышает его тем сильнее, чем выше добротность этого контура. Кроме того, с увеличением добротности становится острее и резонансная кривая, приемник лучше отфильтровывает сигналы соседних мешающих станций.

Существует ряд мер, позволяющих повысить добротность контура, и это прежде всего — уменьшение разного рода потерь. Но можно повысить добротность входного контура и иначе — ввести в него положительную обратную связь (рис. 85, 99).

Поддерживая колебания в контуре, положительная обратная связь вносит в него дополнительную энергию и, по сути дела, уменьшает собственные потери в контуре. Результат действия положительной обратной связи удобно представить себе как внесение в контур некоторого отрицательного сопротивления $R_{вв}$, которое не отбирает энергию, как обычное (положительное) сопротивление R_k , а, наоборот, отдает ее. Общее сопротивление потерь в контуре определяется суммой своего собственного сопротивления R_k и вносимого отрицательного

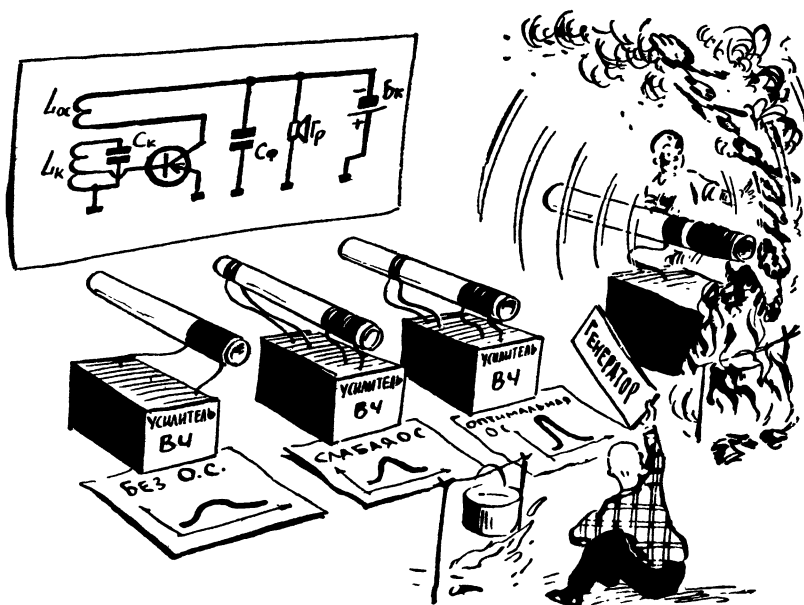


Рис. 99. Положительная обратная связь компенсирует потери энергии в контуре.

сопротивления — $R_{\text{вн}}$. Чем сильнее обратная связь, тем больше отрицательное сопротивление, тем меньше потери в контуре и выше его добротность.

Отрицательное сопротивление — это, разумеется, условность, удобный прием для описания сложного процесса. Для тех, кого эта условность коробит, напоминаем, что введенный в нашу схему резистор $R_{\text{к}}$ — это тоже условность. Никакого резистора в контуре нет, и величина $R_{\text{к}}$ определяется потерями в проводах, в диэлектрике конденсатора, в каркасе катушки, потерями на излучение и т. п.

Схема простейшего приемника с положительной обратной связью приведена на рис. 97—4. Данные катушки L_2 такие же, как и катушки связи в предыдущих приемниках. Расположена она также рядом с контурной катушкой. Эта катушка L_2 включена в коллекторную цепь, по ней проходит усиленная высокочастотная составляющая продетектированного сигнала (в коллекторной цепи все составляющие оказываются усиленными), и таким образом часть энергии вводится обратно из коллекторной цепи в цепь базы.

В схеме приемника имеется лишь один незнакомый элемент — цепочка R_1C_3 . Она служит для плавного изменения степени (принято говорить «глубины») обратной связи. Чем выше по схеме движок резистора R_1 , тем меньше общее сопротивление этой цепочки, тем в большей степени высокочастотная составляющая коллекторного тока замыкается на «землю». В крайнем верхнем положении движка коллектор окончательно заземлен по высокой частоте, и положительной обратной связи вообще нет. Такая регулировка нужна потому, что обратная связь должна быть как можно сильнее, но в то же время не должна быть слишком сильной.

Что скрывается за этим словом «слишком», мы узнаем чуть позже, в разделе «Превращение в генератор». А пока лишь отметим, что при слишком сильной положительной обратной связи приемник вообще перестает принимать и становится источником помех для всех соседних приемников. По этой причине, а также потому, что усилитель с положительной обратной связью не так-то просто наладить, такие каскады не получили распространения. Результаты, которые дает положительная обратная связь, можно получить другими, менее сложными и более спокойными средствами.

Следующий приемник собран по схеме I—V—3 (рис. 97—7). Первый каскад (T_1) — уже знакомый нам усилитель ВЧ. В его коллекторную цепь включена катушка L_3 — первичная обмотка высокочастотного трансформатора. Со вторичной обмотки этого трансформатора сигнал подается на детектор, а он, в свою очередь, включен непосредственно во входную цепь первого каскада усилителя НЧ (T_2).

Схема усилителя НЧ этого приемника еще не знакома нам ни в общем, ни в конкретном виде. Отличительная особенность усилителя в том, что в нем применена непосредственная межкаскадная связь, связь без разделительных конденсаторов (рис. 100). Первый каскад усилителя (транзистор T_2) собран по схеме с общим коллектором (ОК), а его нагрузкой является входная цепь следующего каскада — эмиттерный переход транзистора T_3 . По переменному току как будто все получается неплохо — входное сопротивление транзистора T_3 вполне может служить нагрузкой для T_2 . По постоянному току тоже все хорошо: коллекторная цепь транзистора T_2 — это своего рода резистор, через который с «минуса» подается смещение на базу T_3 , как оно и подавалось бы через резистор R_6 . Кстати, сам второй каскад усилителя (T_3) тоже собран по схеме ОК, и его нагрузкой также является входная цепь следующего, выходного каскада (T_4). И «резистором», через который подается смещение на базу T_4 , также служит коллекторная цепь

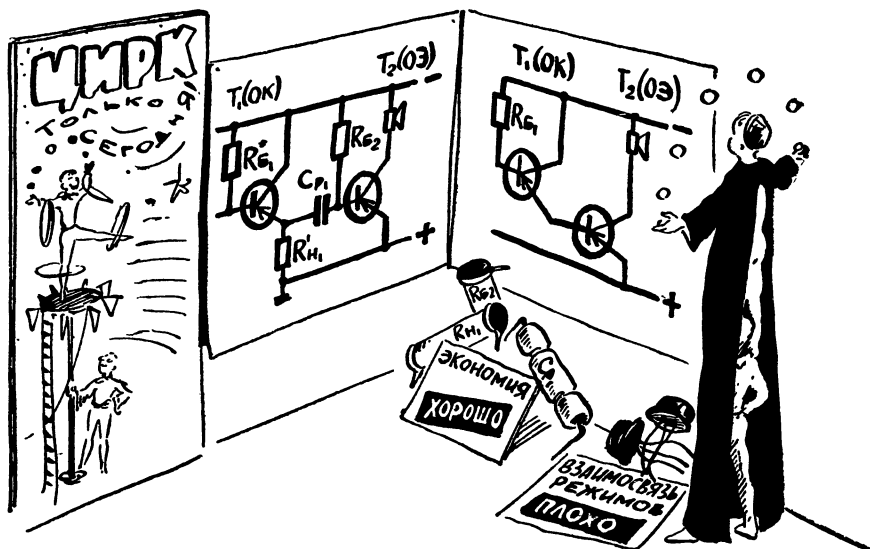


Рис. 100. В «составном транзисторе» входная цепь второго каскада входит непосредственно в первый каскад в качестве нагрузки.

предыдущего транзистора (T_3). Здесь, правда, для подгонки режима вводится еще и резистор R_2 .

Подобная схема — ее часто называют составным транзистором — имеет ряд достоинств, и среди них, конечно, минимальное число деталей. Так в нашем приемнике мы явно экономим два конденсатора и четыре резистора. Но у составного транзистора есть и недостатки (вы когда-нибудь видели схему, у которой были бы только достоинства?), и прежде всего — взаимосвязь режимов. Если, например, по каким-нибудь причинам изменится коллекторный ток T_2 , то изменится и смещение на базе T_3 , а значит и коллекторный ток этого триода, от которого в свою очередь зависит смещение на базе и коллекторный ток транзистора T_4 .

В следующей схеме также используется составной транзистор, но только уже из триодов разной проводимости.

Здесь приемник выполнен по схеме 1—V—1 (рис. 97—6). Особенность первого каскада в том, что контур включен последовательно в эмиттерную цепь триода. Мы когда-то отмечали (рис. 84), что если подключаться к контуру параллельно, то нагрузка должна иметь сопротивление побольше, а если включаться в контур последовательно, то сопротивление нагрузки должно быть поменьше. Потому что добротность ухуд-

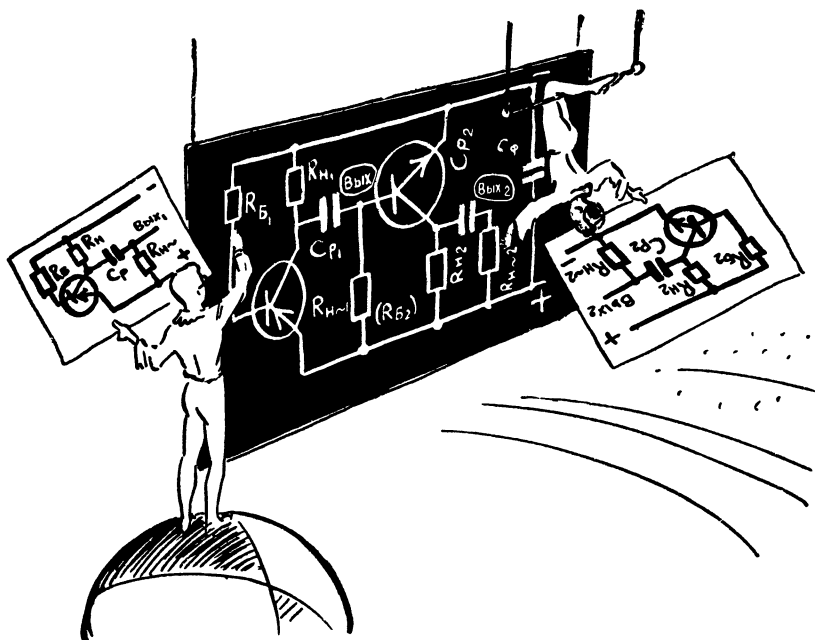


Рис. 101. В многокаскадный усилитель довольно просто включаются транзисторы разной структуры (разной проводимости).

шает малое параллельное (шунтирующее) сопротивление и большое последовательное сопротивление (Воспоминание № 19). Включение последовательного контура во входную цепь T_1 — это попытка (кстати, не самая удачная) преодолеть трудности, порождаемые низким входным сопротивлением транзистора.

Второй каскад — триодный детектор — собран на транзисторе со структурой $n-p-n$ по схеме с общим эмиттером. Эмиттер, как и должно быть у транзистора $n-p-n$, соединен непосредственно с «минусом» батареи, а сигнал на базу T_2 подается прямо с коллекторной нагрузки предыдущего каскада, с катушки L_2 . На этой катушке практически нет постоянного напряжения (рис. 38), во всяком случае оно не превышает нескольких милливольт. Поэтому можно считать, что на базе T_2 нет смещения и эмиттерный переход этого транзистора хорошо справляется с обязанностями детектора.

Нагрузкой T_2 служит входная цепь T_3 — эмиттерный переход третьего транзистора включен в коллекторную цепь T_2

так же, как обычно включается резистор нагрузки R_n . Таким образом усиленный сигнал из коллекторной цепи второго каскада попадает непосредственно во входную цепь третьего каскада, а смещение на базу T_3 подается через «резистор» — коллекторную цепь транзистора T_2 . Все это очень похоже на непосредственную связь двух триодов в предыдущей схеме. Но только там для того, чтобы создать непосредственную связь, мы вынуждены были включать первый транзистор «пары» по схеме ОК. Здесь благодаря применению триодов с разным типом проводимости непосредственная связь получается при схеме ОЭ, которая, как известно, дает большее усиление (рис. 74).

Магнитная антенна приемника выполняется так же, как в предыдущих случаях. Катушка L_2 намотана на кольце из феррита Ф-1000; внешний диаметр кольца 8 мм, обмотка содержит 100 витков провода ПЭЛШО 0,1. Налаживание приемника сводится к подбору резистора R_1 , сопротивление которого может быть в пределах 20—80 ком.

Следующие четыре приемника находятся на более высокой ступени: они позволяют без внешней антенны получить громкоговорящий прием сравнительно большого числа станций (рис. 97—5, 6, 7; рис. 45). Первый из них (97—5) — давний любительский приемник, собранный по схеме 2—V—3. Вы, конечно, удивлены — на схеме видно всего четыре транзистора. Как же на них может работать пять усилительных каскадов — два высокочастотных и три низкочастотных? А дело в том, что один из транзисторов работает в так называемой рефлексной схеме — он одновременно усиливает и высокую, и низкую частоту.

Сама возможность двукратного использования транзистора не должна вызывать никаких сомнений. Сначала транзистор усиливает высокочастотный сигнал, затем этот сигнал детектируется, и его низкочастотная составляющая вновь усиливается тем же транзистором (рис. 102).

Основная трудность состоит в том, чтобы разделить высокочастотные и низкочастотные токи во входной и выходной цепи. Это можно сделать с помощью простейших фильтров, например, с помощью конденсатора C'_ϕ , который замыкает высокочастотный сигнал сразу же после того, как он отработал на высокочастотной нагрузке — катушке, включенной в коллекторную цепь. Для низкочастотного коллекторного тока этих элементов — конденсатора C'_ϕ и катушки — практически не существует, так как емкость C'_ϕ слишком мала, чтобы замкнуть низкую частоту на «землю», а индуктивность катуш-

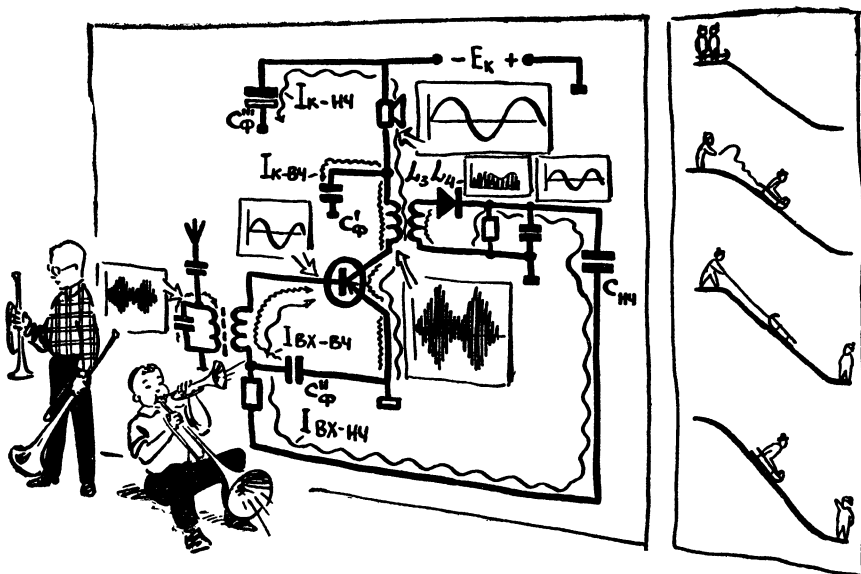


Рис. 102. Рефлексный каскад сначала усиливает высокочастотный сигнал, а затем низкочастотный сигнал.

ки слишком мала, чтобы низкочастотный ток создал на ней ощутимое напряжение. Аналогично катушка связи с магнитной антенной, включенная в цепь базы, безболезненно пропускает на вход транзистора низкочастотную составляющую, поступающую с детектора. А конденсатор $C''_ф$ замыкает на «землю» только высокочастотный сигнал.

В практической схеме приемника рефлексным является второй каскад (рис. 97—5). С его высокочастотной нагрузки — с катушки L_5 — сигнал подается на детектор и прямо с него обратно в цепь базы того же транзистора. Высокочастотные составляющие продетектированного сигнала даже не удаляются из детекторной цепи, и поэтому в этом рефлексном каскаде ко всему еще возможна некоторая обратная связь по высокой частоте. Низкочастотной нагрузкой каскада служит резистор R_3 .

Два последующих каскада усилителя НЧ выполнены уже, по-видимому, привычной схеме (рис. 82). Отличительная особенность — подача смещения на базу транзистора T_4 прямо с коллектора транзистора T_3 . Благодаря этому осуществляется некоторая термостабилизация (подробнее о ней будет рассказано дальше) обоих каскадов: если при нагревании ме-

няется режим транзистора T_3 , то в нужную сторону сдвигается смещение двух последних транзисторов.

Высокочастотные катушки L_3 , L_4 , L_5 намотаны на восьми-миллиметровых кольцах из феррита НЦ-2000, причем первые две катушки, естественно, намотаны на общем кольце. Катушка L_3 содержит 90 витков, L_4 — 10 витков и L_5 — 200 витков провода ПЭЛШО 0,12.

Схема приемника приведена нами в том виде, в каком она была опубликована в литературе десять лет назад, и при этом в ней сохранены даже не очень «красивые» схемные решения. Так, например, по-видимому, следовало бы разделить высокочастотные токи во входной цепи транзистора рефлексного каскада и устранить таким образом случайную обратную связь. Необходимо было изменить схему детектора, так как в приведенной схеме нет «законного» пути для постоянной составляющей продетектированного сигнала. Возможный вариант схемы детектора (рис. 97—5') следует дополнить конденсатором на 2—3 тыс. $p\phi$, включив его параллельно цепочке $R'R''$.

Следующий приемник (рис. 97—8), собранный по схеме 2—V—2, тоже не молод, но он уже весьма близок к современным любительским приемникам. Из схемы по возможности исключены и те элементы, которые трудно изготовить, и те, которые затрудняют налаживание приемника. Все четыре усилительных каскада похожи друг на друга как две капли воды — везде (кроме, конечно, последнего каскада) нагрузкой служит резистор, везде смещение на базу подается от коллекторной батареи через резистор R_6 (рис. 75). Разница в элементах высокочастотных и низкочастотных каскадов лишь в емкости переходных (разделительных) конденсаторов. Детектор выполнен по очень удобной схеме с удвоением напряжения, которую, кстати, стоило бы ввести в предыдущую схему. Приемник очень прост, легко налаживается и неплохо работает. Единственный его недостаток — отсутствие термостабилизации.

Этот недостаток устранен в следующей схеме (рис. 97—9), которую, по-видимому, нет смысла подробно разбирать — все элементы нам уже знакомы. В схему введен регулятор громкости R_5 . Цепочка $R_{10}C_8$ — это так называемый развязывающий фильтр, который предотвращает паразитную связь между каскадами усилителя. Развязывающий фильтр, кстати, легко ввести в любую схему. Иногда такая мера может прекратить самовозбуждение усилителя, превращение его в генератор.

Еще один вариант схемы приведен на рис. 45. Здесь отличие в способе термостабилизации некоторых каскадов — ста-

билизация с помощью делителя хотя и требует нескольких дополнительных деталей, но зато дает лучшие результаты. Приемник смонтирован на фанерной панели, к которой приклеен громкоговоритель и трансформаторы. На двух боковых брусках закреплена магнитная антенна.

Если в вашем распоряжении нет красивой пластмассовой коробочки, то получившуюся жесткую конструкцию можно вставить в футляр, сшитый из заменителя кожи или из плотной материи.

В футляр устанавливаются также две соединенные последовательно батарейки КБС, от которых приемник может непрерывно работать сто — сто двадцать часов.

В приемнике применен еще не знакомый нам двухкаскадный усилитель НЧ, собранный на трех транзисторах. Со схемой этого усилителя, его достоинствами и недостатками мы познакомимся в следующем разделе книги. А пока — несколько общих заключительных замечаний по поводу приемников.

Как вы сами видели, существует большое многообразие схем простейших приемников, и все они во многом похожи. Схемные «фокусы» — положительная обратная связь, составные транзисторы, рефлексное усиление и др. — в простейших приемниках не всегда оправданны. Во всяком случае, начинающему любителю лучше собирать приемник по наиболее простым и надежным схемам без «фокусов». К их числу прежде всего относятся две последние схемы. Они просты в изготовлении и, что особенно важно, в налаживании.

Налаживание транзисторного приемника можно разделить на три части. Прежде всего нужно добиться, чтобы приемник начал «дышать», чтобы он хоть как-нибудь принял любую станцию. Если собранный приемник совсем не работает, то ищите ошибку в монтаже или неисправную деталь. Первую пробу приемника лучше производить, подключив к нему большую антенну, даже если приемник рассчитан только на внутреннюю магнитную антенну.

Следующий этап — подгонка режимов транзисторов. Обычно есть несколько элементов, влияющих на режим транзистора, но проще всего подбирать резистор, включенный в цепь базы и определяющий отрицательное смещение на ней. Иногда для подбора смещения вместо постоянного резистора включают переменный. Тщательно подобрав с его помощью наиболее выгоднейшее смещение, измеряют сопротивление переменного резистора, при котором такое смещение получилось, а затем включают в цепь базы постоянный резистор соответствующего сопротивления.

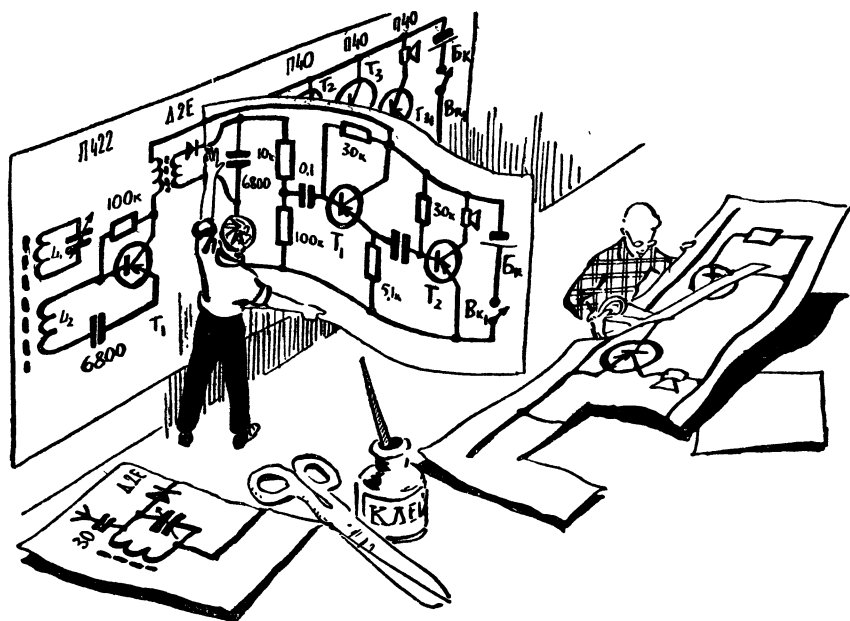


Рис. 103. При конструировании транзисторных приемников можно объединять узлы различных схем.

Подбор наивыгоднейшего смещения производится по двум показателям — по усилению каскада, которое, разумеется, должно быть как можно больше, и по потребляемому току, который должен быть как можно меньше. Усиление налаживаемого каскада можно оценивать на слух, по громкости звучания, а для контроля за потребляемым током в коллекторную цепь нужно включить миллиамперметр, который имеется в любом авометре. В заключение напоминаем: чем меньше сопротивление в цепи базы, тем больше «минус» на ней, тем больше коллекторный ток транзистора. Что же касается усиления, то от величины коллекторного тока, а значит, и от смещения оно зависит сложным образом. Очень часто, например, увеличение «минуса» на базе приводит к уменьшению усиления из-за того, что увеличивается постоянное напряжение на нагрузке и уменьшается напряжение на коллекторе. С другой стороны, слишком малый «минус» на базе заводит транзистор в область нижнего загиба входной характеристики, и при этом усиление, конечно, падает (см. раздел «Учитесь делать выводы»).

Третий этап налаживания — настройка входного контура. Здесь мы не будем давать конкретные рекомендации — всякий,

кто понимает, каким образом резонансная частота контура зависит от его индуктивности и емкости (Воспоминание № 18, рис. 49), легко догадается, когда нужно отматывать витки от контурной катушки, а когда доматывать, чтобы вогнать резонансные частоты контура в желаемый диапазон. Настройку контура удобно проводить, имея рядом хорошо настроенный приемник — по его шкале легко определить, какую станцию принимает ваш налаживаемый транзисторный приемник и насколько вы продвигаетесь «вверх» или «вниз», поворачивая ротор конденсатора настройки.

И, наконец, последнее замечание. При желании вы можете комбинировать схемы, элементы одной из них вводить в другую (рис. 103). В частности, можно ввести в любую из описанных схем экономичный и сравнительно мощный усилитель НЧ из последнего приемника или другой аналогичный усилитель, с которым вы познакомитесь в следующем разделе.

СКОЛЬКО СТОИТ ВАТТ?

Этот раздел полностью посвящен усилителям низкой частоты, которые входят составным элементом в приемники, а также используются в радиолах, радиоузлах, мегафонах, электронных музыкальных инструментах, магнитофонах и другой аппаратуре.

Для начала — несколько простейших и, если можно так сказать, вспомогательных схем. Первая из них (рис. 104—1) — это усилитель, позволяющий довольно просто построить электрогитару. Основа схемы — кристалл звукоснимателя (его можно купить в магазине в отделе запасных частей к приемникам), прикрепленный к верхней деке гитары с помощью клейкой ленты или простейшего зажима. Учтя, что кристалл — это довольно нежный элемент, его стоит завернуть в клейкую ленту, выпустив лишь два аккуратно подпаянных к выводам проводничка. Электрический сигнал, возникающий на кристалле под действием механических колебаний деки, усиливается двухкаскадным транзисторным усилителем и подается на вход звукоснимателя какого-либо «большого» приемника или на вход специально построенного транзисторного усилителя НЧ.

Трудности включения кристалла звукоснимателя в транзисторный усилитель связаны с тем, что этот кристалл имеет очень большое внутреннее сопротивление, обычно несколько мегом. И если к такому высокоомному генератору — кристаллу подключить низкоомную нагрузку, например, входную цепь транзистора, включенного по схеме ОЭ, то на этой нагрузке

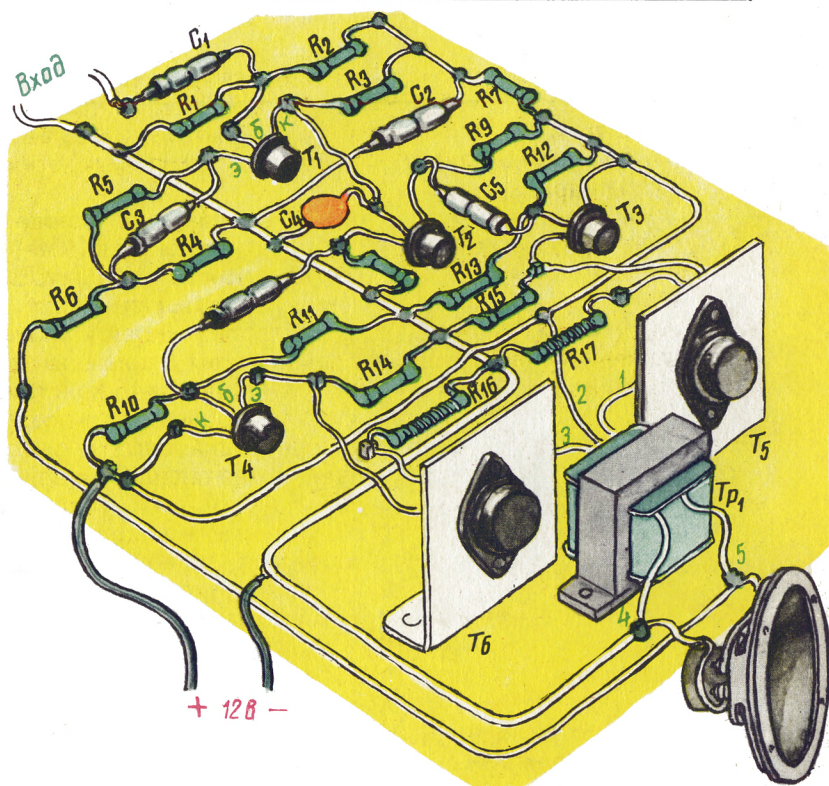
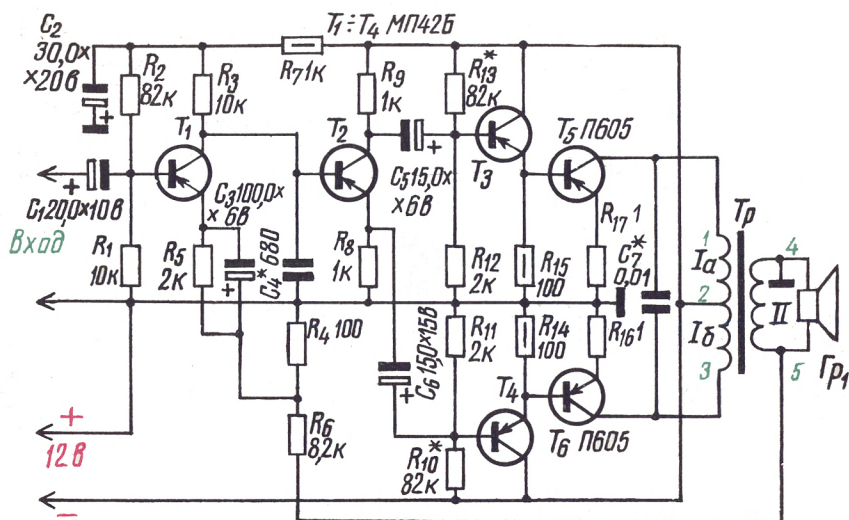


Рис. 110. Усилитель НЧ с выходной мощностью 2,5—3 вт.

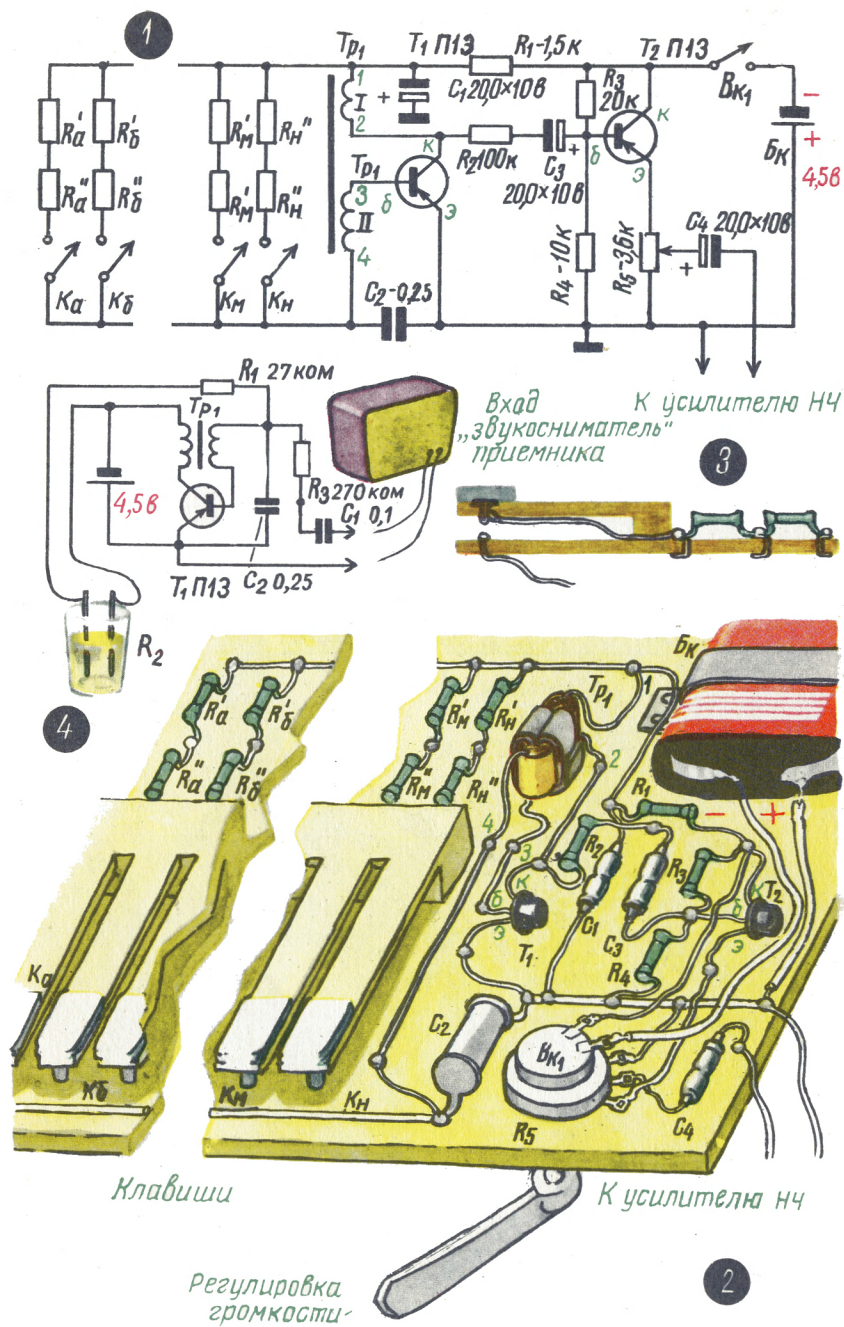


Рис. 111. Простейший электроорган.

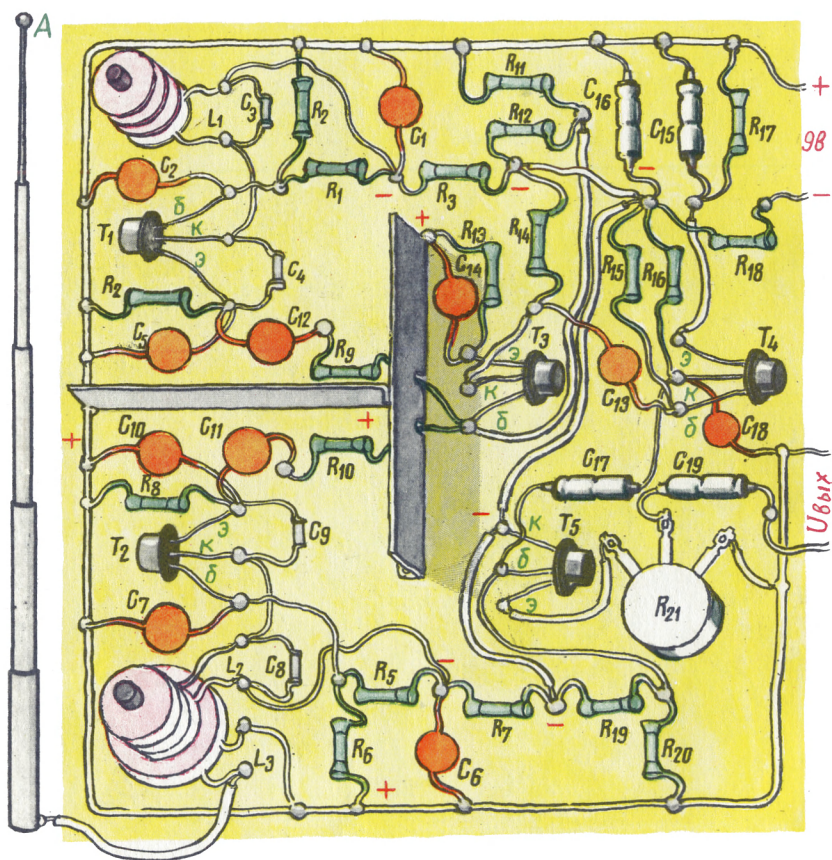
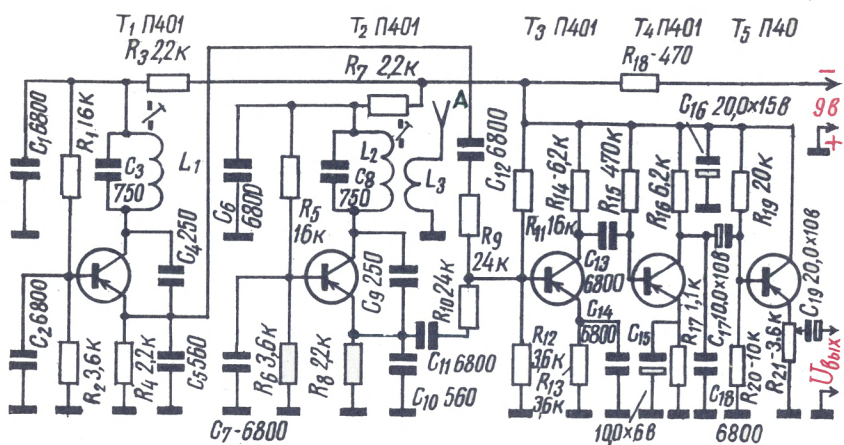


Рис. 112. Электромузыкальный инструмент терменвокс.

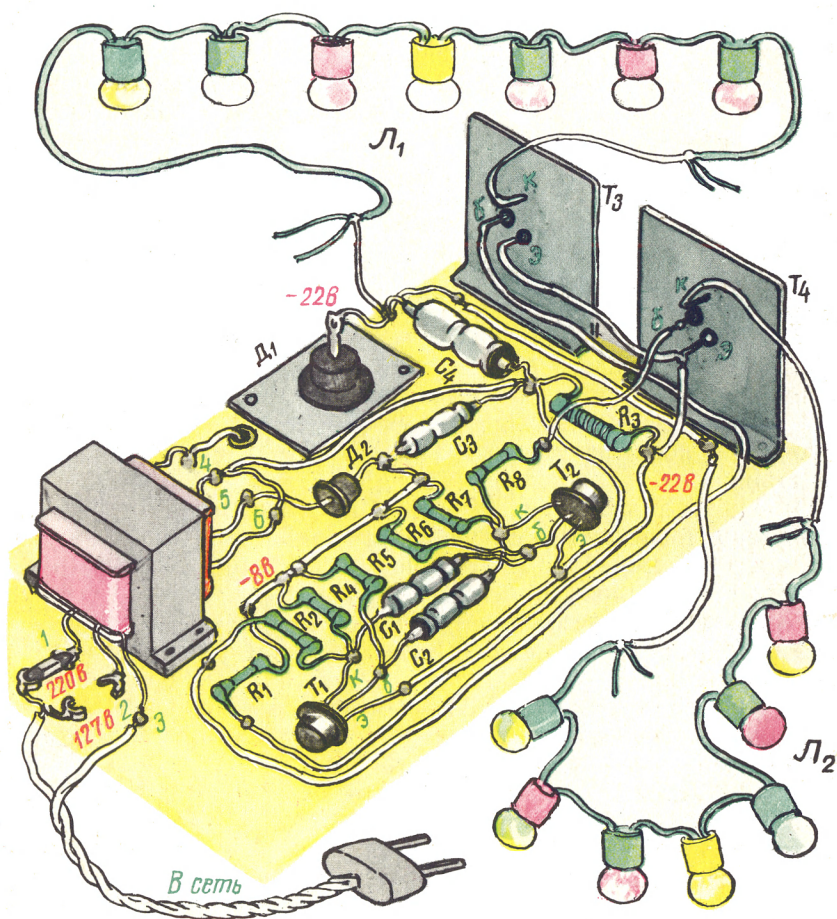
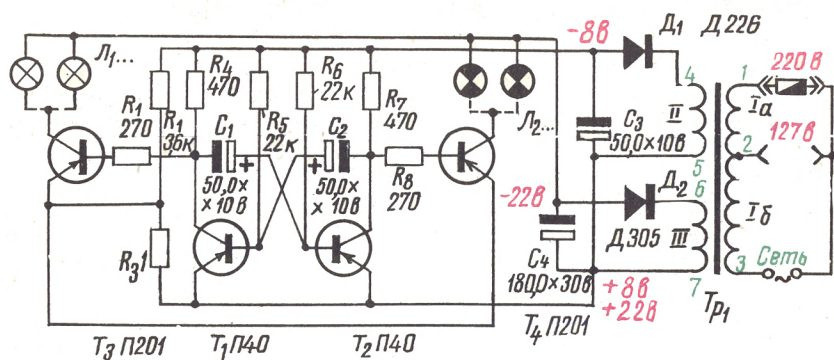


Рис. 113. Переключатель елочных гирлянд.

будет действовать лишь ничтожная часть напряжения, развиваемого кристаллом. Основная часть этого напряжения останется на внутреннем сопротивлении кристалла.

Для согласования кристалла с усилителем его первый каскад (T_1) выполнен по схеме ОК, которая, как вы помните, имеет высокое входное сопротивление. Постоянное напряжение, которое неизбежно появляется на нагрузке R_3 первого каскада, служит смещением для второго каскада, собранного по схеме ОЭ. Резистор R_4 представляет собой элемент отрицательной обратной связи, которая повышает стабильность второго каскада.

Этот усилитель может быть использован в качестве входного блока транзисторной радиолы. С его помощью, например, можно включить кристаллический звукосниматель ко входу любого транзисторного усилителя НЧ, имеющего низкое входное сопротивление (рис. 104—7).

Другая схема (рис. 104—5) — это так называемый микшер: простой блок, с помощью которого можно подключить к усилителю НЧ несколько микрофонов и звукосниматель. Микшер позволяет менять уровень сигнала от каждого из этих источников, не влияя на остальные.

Весьма простой однокаскадный усилитель (рис. 104—4) позволяет подключить динамический микрофон ко входу звукоснимателя сетевого приемника. Если включить микрофон без такого усилителя, то он не обеспечит достаточной громкости звучания. Сигнал от микрофона значительно (обычно в двадцать — пятьдесят раз) меньше, чем сигнал от звукоснимателя, на который рассчитан усилитель НЧ приемника. Особенность схемы — питание коллекторной цепи от выпрямителя, к которому подводится напряжение 6,3 в с накальной обмотки приемника.

Две другие схемы (рис. 104—2, 3) представляют собой простейшие однокаскадные усилители НЧ, работающие от угольного микрофона. Микрофон включен так, что необходимый для его питания постоянный ток получается прямо от элементов усилительной схемы. В первой схеме необходимую величину этого питающего тока подбирают с помощью резистора R_3 , во второй схеме — с помощью резистора R_3 . Каждый из резисторов шунтирует микрофон, и чем меньше такое шунтирующее сопротивление, тем меньшая часть общего тока достается микрофону.

Чтобы перейти к следующей группе усилителей НЧ — к двухтактным усилителям, — нам придется остановиться на одном недостатке, общем для всех усилителей, с которыми мы встречались раньше. Если пользоваться житейской термиоло-

гией, то этот недостаток следовало бы назвать расточительностью.

До сих пор мы не говорили о том, в каких количествах расходуется энергия на создание усиленного сигнала, на создание «мощной копии». У нас, собственно говоря, и не возникало такого вопроса. Еще в самом начале своего пути, когда только искали скульптора, который мог бы вылепить мощный сигнал по образцу слабого, мы договорились, что поставщиком энергии для создания такого усиленного сигнала может быть батарея. При этом считалось очевидным, что батарея обладает большими запасами энергии и жалеть ее нечего — лишь бы создать усиленный сигнал.

Теперь же, когда цель достигнута, когда мы научились с помощью транзистора усиливать слабый сигнал, попробуем выяснить, какую энергию должен отдавать ее поставщик — коллекторная батарея. Попробуем выяснить, сколько стоит ватт усиленного сигнала, сколько ватт мощности постоянного тока должна за него заплатить батарея.

Сделав ряд допущений — предположив, что прямолинейный участок входной характеристики начинается прямо от «нуля», что на выходной характеристике тоже нет загибов, что в качестве коллекторной нагрузки включен элемент (например, трансформатор), на котором не теряется постоянное напряжение, — мы приходим к выводу, что в лучшем случае только половина потребляемой от батареи мощности переходит в усиленный сигнал. Об этом можно сказать иначе: к. п. д. (коэффициент полезного действия) транзисторного усилителя не превышает 50%. За каждый ватт мощности выходного сигнала приходится платить двойную цену — два ватта мощности коллекторной батареи (рис. 105).

Доказать справедливость этого вывода довольно просто.

Чтобы подсчитать мощность, потребляемую от батареи, нужно умножить ее постоянное напряжение E_K на потребляемый ток, то есть на коллекторный ток покоя $I_{K-п}$ (рис. 106). С другой стороны, амплитуда переменной составляющей коллекторного тока никак не может быть больше тока покоя, иначе транзистор будет работать с отсечкой. В лучшем случае амплитуда переменной составляющей равна току $I_{K-п}$, и при этом эффективное значение переменной составляющей коллекторного тока равно $I_{K\sim} \approx 0,7 \cdot I_{K-п}$.

Точно так же и амплитуда переменного напряжения на нагрузке не может быть больше напряжения батареи, иначе в какие-то моменты на коллекторе будет появляться не «минус», а «плюс». А это в лучшем случае приведет к сильнейшим искажениям. Таким образом, эффективное значение выходного

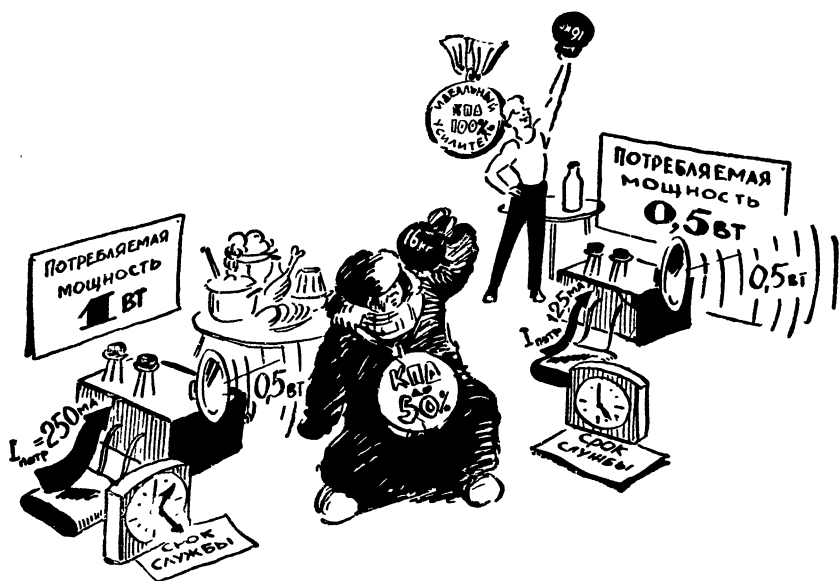


Рис. 105 Чем выше коэффициент полезного действия усилителя, тем меньшую мощность он потребляет для создания заданной выходной мощности.

напряжения $U_{н\sim}$ не может превышать $0,7 \cdot E_k$. Теперь остается только перемножить $0,7 \cdot I_{к-п}$ на $0,7 \cdot E_k$ и получить, что наибольшая эффективная мощность, которую может отдать усилитель, не превышает $0,5 \cdot I_{к-п} \cdot E_k$, то есть не превышает половины потребляемой мощности.

Решение это окончательное, однако оно подлежит обжалованию. Есть возможность ценой определенных жертв повысить коэффициент полезного действия усилителя, перейти рубеж пятидесяти процентов к. п. д.

Чтобы повысить коэффициент полезного действия, нужно, чтобы усилитель создавал более мощный сигнал при той же потребляемой мощности. А для этого нужно, не увеличивая тока покоя $I_{к-п}$ и постоянного напряжения E_k , повысить переменные составляющие коллекторного тока $I_{к\sim}$ и напряжения на нагрузке $U_{н\sim}$.

Что же мешает нам повысить эти две составляющие? Искажения. Мы можем увеличить и ток $I_{к\sim}$ (для этого достаточно, например, повысить уровень входного сигнала), и напряжение $U_{н\sim}$ (для этого достаточно опять-таки увеличить входной сигнал или увеличить сопротивление нагрузки для

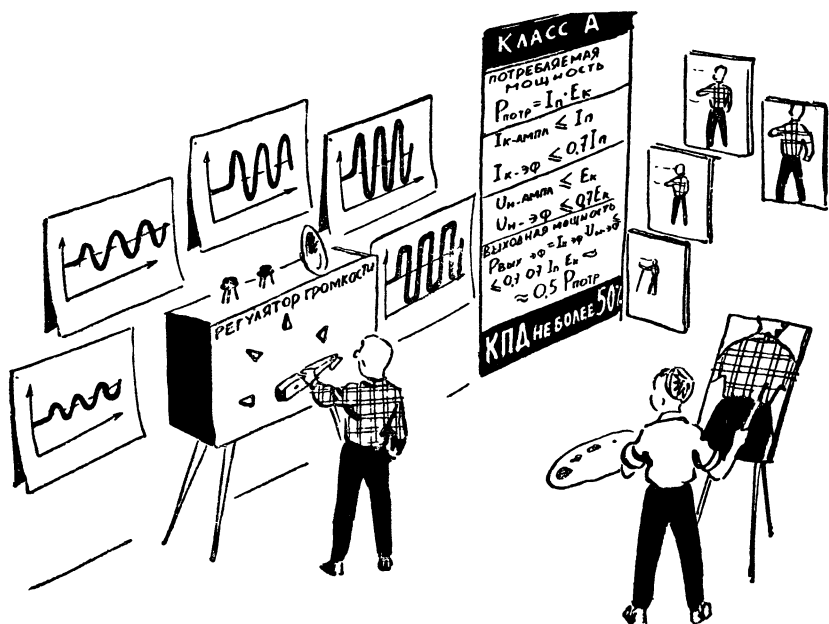


Рис 106. Выходная мощность однотактного усилителя, работающего в классе А, ограничена искажениями, а его к. п. д. не превышает 50 процентов.

переменного тока). Но и в том и в другом случае исказится форма сигнала, окажутся срезанными его отрицательные амплитуды.

И хотя такая жертва кажется недопустимой (кому нужен экономичный усилитель, если он выдает бракованную продукцию?), мы все же пойдем на нее. Во-первых, потому, что возникшие искажения удастся ликвидировать. И, во-вторых, потому, что, допустив искажения (а потом избавившись от них), мы сумеем перевести усилитель в более экономичный режим и поднять его коэффициент полезного действия.

Усиление без искажений, когда амплитуда переменной составляющей коллекторного тока не превышает тока покоя I_{k-p} , называется классом усиления А. Одиночный усилитель, работающий в классе А, называется однотактным усилителем.

Если при усилении часть сигнала «срезается», если амплитуда переменной составляющей коллекторного тока больше, чем I_{k-p} , и в коллекторной цепи происходит отсечка тока, то мы получаем один из классов усиления АВ, В или С. При уси-

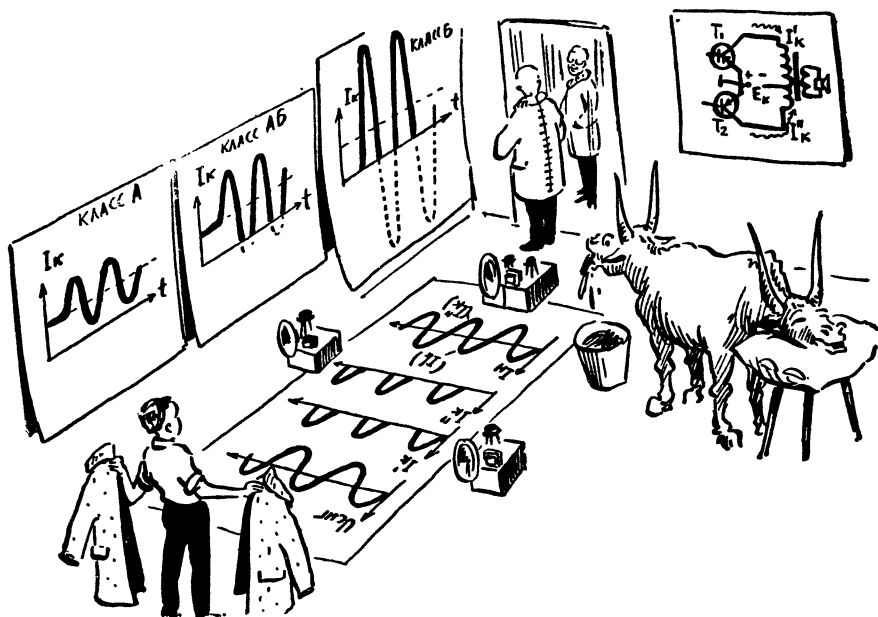


Рис. 107. Двухтактный каскад — это, по сути дела, два однотактных каскада, работающих на общую нагрузку.

лении в классе *В* отсечка равна полупериоду, то есть в половине периода в коллекторной цепи есть ток, а в другой половине периода тока нет. Если ток есть больше, чем в половине периода, то мы имеем класс усиления *АВ*, если меньше — класс *С*. (Чаше классы усиления обозначают латинскими буквами *A*, *B*, *C*.)

Представьте себе, что у нас есть не один, а два работающих в классе *В* одинаковых усилителя: один воспроизводит положительные полупериоды сигнала, другой — отрицательные. Теперь представьте себе, что оба усилителя работают на общую нагрузку. В этом случае мы получим в нагрузке нормальный переменный ток, получим неискаженный сигнал, как бы сшитый из двух половинок (рис. 107). Правда, для получения неискаженного сигнала из двух искаженных нам пришлось создать сравнительно сложную схему сшивания половинок (такая схема называется двухтактной), схему, по сути дела состоящую из двух самостоятельных усилительных каскадов. Однако, как это уже не раз бывало, наш проигрыш (в данном случае усложнение усилителя) приносит значительно больший выигрыш.

Общая мощность, которую развивает двухтактный усилитель, больше, чем мощность, которую дали бы в отдельности обе его половины. А «стоимость» одного ватта выходного сигнала оказывается значительно меньше, чем в одноклапном усилителе. В идеальном случае (ключевой режим) один ватт выходного сигнала можно получить за такой же ватт потребляемой мощности, то есть в идеальном случае к. п. д. двухтактного усилителя может достигать 100 процентов.

Реальный к. п. д., конечно, меньше: практически он составляет 60—70%. Но ведь в одноклапном усилителе, работающем в классе А, мы получали к. п. д., равный 50%, тоже только в идеальном случае. А реально одноклапный усилитель позволяет получить к. п. д. не более 30—40%. И поэтому в двухтактном усилителе каждый ватт выходной мощности обходится нам в два-три раза «дешевле», чем в одноклапном.

Для переносной транзисторной аппаратуры повышение к. п. д. имеет особо важное значение. Чем выше к. п. д., тем меньше расход энергии коллекторной батареи при одной и той же выходной мощности. А это, в свою очередь, означает, что чем выше к. п. д., тем реже нужно будет менять эту батарею или тем меньше может быть батарея при неизменном сроке службы. Вот почему в миниатюрной транзисторной аппаратуре, в частности в миниатюрных приемниках, где, казалось бы, нужно экономить вес и место, применяют двухтактные усилители, включая для этого в схему целый ряд лишних деталей.

Практическая схема двухтактного усилителя встречалась нам в одном из приемников (рис. 45). Здесь двухтактный выходной каскад работает на общую нагрузку — громкоговоритель Gp_1 . Он включен через выходной трансформатор, имеющий отвод от средней точки. Благодаря этому каждое плечо двухтактного каскада как бы работает на свою половину выходного трансформатора и через нее наводит свою половинку тока (здесь полезно вспомнить хорошо известное вам примечание на стр. 26) во вторичной обмотке, то есть в цепи громкоговорителя.

С нижней части делителя $R_{11} R_{12}$ на базы обоих выходных транзисторов T_4 и T_5 подается очень небольшое смещение. Таким образом эти транзисторы почти заперты и потребляют в «режиме молчания» очень небольшой ток покоя. Это значит, что усилитель работает в классе АБ. Можно было бы повысить экономичность усилителя, переведа его в класс В. Для этого нужно убрать смещение и запереть триоды, чтобы их отпирало лишь управляющее напряжение. Однако при работе в классе В появляются некоторые трудно устранимые искажения (из-за загиба входной характеристики), и этот класс в усилителях

НЧ используется реже. Класс *C* в этих усилителях вообще не используется из-за появления неустраняемых искажений.

Управляющее напряжение на выходные транзисторы подается с так называемого фазоинверсного каскада, выполненного на транзисторе T_3 по трансформаторной схеме. Есть и другие схемы фазоинверторов, но все они выполняют одну и ту же задачу — создают два противофазных напряжения, которые необходимо подать на базы транзисторов двухтактной схемы.

Если на эти транзисторы подать одно и то же напряжение, то они будут работать не через такт, а синхронно, и поэтому оба будут усиливать только положительные или, наоборот, только отрицательные полупериоды сигнала. Чтобы транзисторы двухтактного каскада работали поочередно, нужно подавать на их базы противофазные напряжения. Тогда если во время одного полупериода отпирающий «минус» будет на базе T_4 , а на базе T_5 будет запирающий «плюс», то во время следующего полупериода картина изменится и на базе T_5 будет «минус», а на базе T_4 «плюс». Таким образом, два противофазных напряжения будут поочередно отпирать транзисторы двухтактного каскада.

В фазоинверторе с трансформатором два управляющих напряжения получаются благодаря разделению вторичной обмотки на две равные части. А противофазными эти напряжения становятся потому, что заземлена средняя точка вторичной обмотки. Когда на верхнем (по схеме) ее конце появляется «плюс» относительно средней точки, на нижнем конце относительно этой точки оказывается «минус». А поскольку напряжение переменное, то «плюс» и «минус» все время меняются местами (рис. 108). Трансформаторный фазоинвертор прост и надежен, его практически не нужно налаживать.

Двухтактный усилитель для транзисторного приемника или небольшой радиолы можно собрать не только по схеме рис. 45, но и по одной из схем усилителя НЧ промышленного приемника. Например, по схеме приемников «Альпинист», «Нева-2», «Спидола» и др.

Желание избавиться от трансформаторов привело к созданию нескольких более сложных схем двухтактных усилителей. Одна из них приведена на рис. 104—6. Как видите, на этой схеме нет ни выходного трансформатора, с помощью которого осуществляется «сшивание» двух половинок сигнала, ни трансформатора фазоинвертора (его часто называют согласующим трансформатором), с помощью которого на двухтактный каскад подаются два противофазных управляющих напряжения. Как же решаются эти задачи в безтрансформаторном усили-

теле? В данном случае они решаются благодаря применению транзисторов с разной структурой — транзисторов типа $n-p-n$ и $p-n-p$.

Транзисторы $n-p-n$ в сравнении с транзисторами $p-n-p$, если можно так сказать, делают все наоборот (рис. 104—6, 109). В частности, на коллектор им нужно подавать не «минус», а «плюс». Отпирает эти транзисторы уже не отрицательное, а положительное напряжение. Это значит, что на таких разных транзисторах можно собрать двухтактный выходной каскад без всякого фазоинвертора и подавать на их базы одно и то же управляющее напряжение, один и тот же сигнал. Отрицательный полупериод этого напряжения будет отпирать транзистор $p-n-p$ (T_3), а положительный полупериод будет отпирать транзистор $n-p-n$ (T_4), и таким образом транзисторы будут работать поочередно.

В коллекторной цепи транзисторов с разной структурой токи тоже движутся в разных направлениях. И благодаря этому один из транзисторов создает положительную «половин-

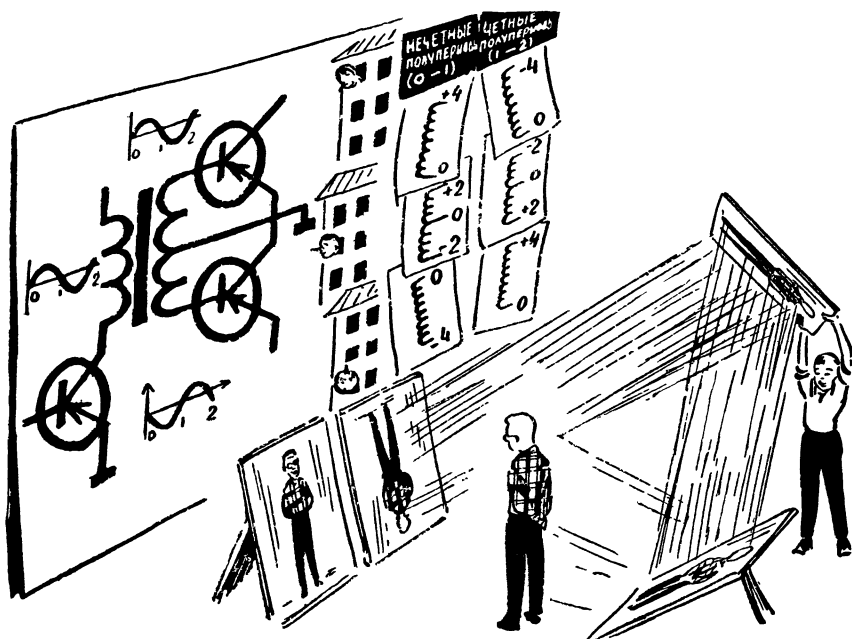


Рис. 108. Фазоинвертор создает два переменных напряжения, сдвинутых по фазе на 180° .

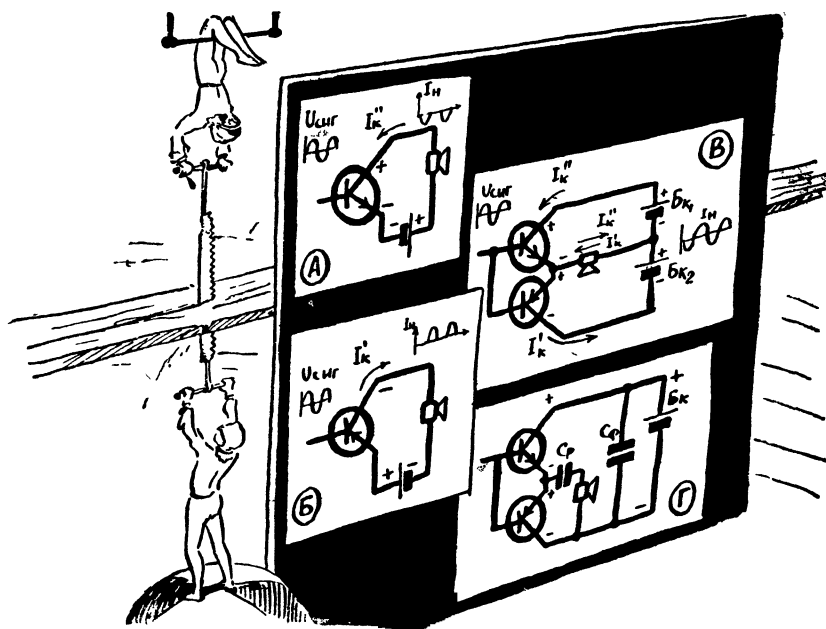


Рис. 109. Если в двухтактном каскаде работают транзисторы с разной структурой (проводимостью), то можно обойтись и без фазоинвертора.

ку» выходного сигнала, а второй транзистор — отрицательную. Однако это еще не дает права исключить из схемы выходной трансформатор: кроме «сшивания» сигнала, у него есть еще одна функция — согласование высокого выходного сопротивления транзистора с малым сопротивлением громкоговорителя (рис. 83). Кто же берет на себя эту роль выходного трансформатора? Никто. Просто выходной каскад собран по схеме ОК, а одна из главных ее особенностей — низкое выходное сопротивление. Таким образом, в какой-то степени пожертвовав усилением (схема ОК усиливает хуже, чем ОЭ), удастся обойтись без выходного трансформатора.

Несколько слов о «мелких» особенностях схемы (рис. 104—6).

В цепь эмиттера транзистора T_1 включено два резистора, причем только один из них зашунтирован конденсатором. Этот резистор R_4 выполняет уже знакомые нам обязанности в системе термостабилизации, а второй резистор — R_5 — является элементом обратной связи. Причем не только связи, охватывающей первый каскад, — на резистор R_5 через $R_{13}C_9$ подается

напряжение обратной связи с выхода усилителя и таким образом появляется цепочка обратной связи, охватывающая сразу все усилительные каскады.

Отрицательная обратная связь хотя и уменьшает общее усиление, зато в значительной степени снижает искажения, особенно те, что возникают в выходном каскаде в процессе «сшивания» сигнала. Одна из возможных причин таких искажений — некоторая неодинаковость параметров транзисторов, работающих в двухтактной схеме. Из-за этой неодинаковости «половинки» выходного сигнала немного различаются и форма сигнала оказывается несколько искаженной.

Каким же образом отрицательная обратная связь снижает искажения, исправляет форму сигнала? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно вспомнить, что искажение формы сигнала, по сути дела, означает появление в сигнале новых гармоник, новых синусоидальных составляющих. Так было и при умышленном искажении формы — при выпрямлении переменного тока и детектировании. Так получается и при усилении.

По цепи отрицательной обратной связи новые, появившиеся в результате искажений гармоники подаются на вход усилителя в такой фазе, что они сами себя ослабляют. Мощность этих гармоник на выходе усилителя оказывается меньше, чем она была бы без обратной связи. Одновременно, конечно, ослабляются и полезные составляющие, из которых должен складываться неискаженный сигнал, но это дело поправимое. Чтобы скомпенсировать эту вредную деятельность отрицательной обратной связи, можно увеличить уровень сигнала, поступающего на вход усилителя, может быть даже добавив для этого еще один каскад.

Отрицательная обратная связь в усилителях НЧ, особенно в двухтактных усилителях, работающих в классах *АВ* и *Б*, находит очень широкое применение: отрицательная обратная связь позволяет сделать то, что никакими другими средствами не достигается, — она позволяет уменьшить искажения формы сигнала, уменьшить так называемые нелинейные искажения.

Отрицательная обратная связь позволяет выполнить еще одну важную операцию — осуществить регулировку тембра, то есть в нужном направлении изменить частотную характеристику усилителя. Эта характеристика показывает, как меняется усиление с изменением частоты сигнала.

Для идеального усилителя частотная характеристика — это просто прямая линия: усиление на всех частотах у такого усилителя одинаково. Но у реального усилителя частотная характеристика загнута, завалена в области самых низких и самых высоких частот. Это значит, что низшие и высшие частоты

звукового диапазона усиливаются хуже, чем средние частоты. Причины появления таких завалов частотной характеристики могут быть разными, но корень у них общий. Неодинаковое усиление на разных частотах получается потому, что в схеме имеются реактивные элементы — конденсаторы и катушки, сопротивление которых меняется с частотой.

Существует много способов исправления частотной характеристики, в том числе и введение частотно-зависимых элементов в цепь обратной связи. Пример таких элементов — цепочка $R_{13}C_9$ в нашем усилителе. Сопротивление этой цепочки с уменьшением частоты растет (Воспоминания № 13 и № 16), обратная связь уменьшается, и благодаря этому создается некоторый подъем частотной характеристики в области низших частот.

В усилителе имеется еще несколько цепей отрицательной обратной связи. Это конденсатор C_6 , соединяющий коллектор транзистора T_2 с его базой; резистор R_{12} , который подает на базы выходных транзисторов не только постоянное смещение, но еще и некоторую часть выходного сигнала; цепочка, которая создает обратную связь третьего каскада со вторым, но уже не по переменному, а по постоянному току (такая обратная связь повышает термостабильность усилителя).

Громкоговоритель включен в коллекторные цепи выходных транзисторов через разделительный конденсатор C_4 . Сопротивление звуковой катушки в данной схеме может составлять 6—10 ом. Усилитель развивает мощность до 100 мвт при напряжении входного сигнала около 30—50 мв.

Существует довольно большое число схем бестрансформаторных усилителей на транзисторах разной проводимости. В большинстве из них в выходном каскаде используют составные транзисторы, то есть в каждое плечо включают два транзистора. Отсутствие трансформаторов и уменьшение числа разделительных конденсаторов позволяет в таких усилителях получить очень хорошую частотную характеристику. Однако начинающему радиолюбителю этот выигрыш достается довольно дорогой ценой — бестрансформаторные усилители, да еще с составными транзисторами, не всегда просто наладить. И поэтому, если у вас еще нет большого опыта в налаживании транзисторной аппаратуры, лучше собрать усилитель по классической двухтактной схеме с трансформаторами (рис. 45).

Еще одна двухтактная схема с трансформаторами приведена на рис. 104—7. Главная особенность усилителя — фиксированное от отдельной батареи B_2 смещение на базу первого каскада T_1 . Благодаря этому коллекторный ток транзистора T_1 остается практически неизменным при уменьшении напряже-

ния коллекторной батареи вплоть до 3,5 в. С нижней части делителя R_4R_5 , включенного в эмиттерную цепь T_1 , подается смещение на базы транзисторов выходного каскада. И поэтому при уменьшении коллекторного напряжения смещение транзисторов T_3T_4 не меняется. В результате усилитель работает при пониженном напряжении, хотя и с меньшей выходной мощностью (при 3,5 в—20 мвт), но без искажений.

Ток, потребляемый от батареи B_2 , не превышает 500 мка.

В усилителе имеется простейший регулятор тембра R_6C_5 и цепь обратной связи R_8C_8 , снижающая искажения. Резистор R_9 необходим для того, чтобы при выключении B_2 (может случиться так, что BK_2 , разомкнет цепь на какие-то доли секунды раньше, чем BK_1) транзистор T_1 не оказался с «висящей базой» (рис. 89). Конденсаторы C_7C_6 — элементы отрицательной обратной связи, предотвращающие самовозбуждение на сверхзвуковых частотах. Ту же задачу выполняет конденсатор C_1 .

Трансформаторы Tr_1 и Tr_2 взяты от приемника «Альпинист» (таблица 12). Громкоговоритель с сопротивлением звуковой катушки около 6 ом.

При коллекторном напряжении 9 в усилитель развивает мощность 180 мвт и потребляет от батареи B_2 ток не более 20—25 ма. Если нужно повысить выходную мощность, можно включить в качестве T_3 и T_4 мощные транзисторы, например П201. В этом случае нужно уменьшить в два раза R_7 и подобрать R_5 с таким расчетом, чтобы общий коллекторный ток покоя T_3 и T_4 составлял 15—25 ма. Для мощных транзисторов нужен другой выходной трансформатор, например, с такими данными: сердечник сечением около 3,5 см² (Ш17×17); первичная обмотка 330+330 витков ПЭ 0,31, вторичная обмотка 46 витков ПЭ 0,51. С транзисторами П201 усилитель развивает выходную мощность 1,5—2 вт.

На рис. 110¹ приведена схема усилителя НЧ с выходной мощностью 2,5—3 вт. Его второй каскад — фазоинвертор с разделенными нагрузками. После него следуют два совершенно одинаковых эмиттерных повторителя (T_3 , T_4), каждый из которых подает сигнал на свое плечо двухтактного выходного каскада. Для громкоговорителя с сопротивлением звуковой катушки 5 ом выходной трансформатор может иметь следующие данные: сердечник сечением 3 см²; обмотка I — 2×200 витков ПЭ 0,33, обмотка II — 100 витков ПЭ 0,8.

Налаживание всех усилителей НЧ сводится к подбору режимов транзисторов. Для двухтактных схем желательно предварительно подобрать для обоих плеч транзисторы с близкими

¹ Рис. 110—113 см. на цветной вклейке между стр. 288—289.

параметрами: коэффициентом усиления по току β и обратным током коллектора $I_{к0}$. Если все детали исправны и схема собрана правильно, то усилитель, как правило, сразу начинает работать. И единственная серьезная неприятность, которая может обнаружиться при включении усилителя,— это самовозбуждение. Один из способов борьбы с ним — введение развязывающих фильтров (аналогичных $R_{14}C_5$ в схеме рис. 104—6), которые предотвращают связь между каскадами через источники питания (рис. 77). С другими способами борьбы с самовозбуждением мы познакомимся в следующем разделе книги, после того, как выясним некоторые подробности превращения усилителя в генератор.

ПРЕВРАЩЕНИЕ В ГЕНЕРАТОР

Человек, изучающий электронику, подобен туристу, плывущему мимо красивейших берегов Крыма или Кавказа и вынужденному наблюдать эти берега лишь с борта корабля. Человек, изучающий электронику, очень часто проплывает мимо изумительно красивых явлений природы, мимо очень важных, можно даже сказать — фундаментальных, научных проблем и не имеет возможности сойти на берег, чтобы познакомиться с ними. Иначе путешествие слишком затянется или даже изменится его конечный маршрут. (Последнее, кстати, совсем неплохо, но только не в начале пути. Есть немало примеров того, как радиоинженеры уходили в биологию, ракетостроение, математику, химию, медицину, геофизику, сельское хозяйство, астрономию и другие области. Обогащенные методами и идеями электроники, они открывали в этих областях науки новые направления или, подобно катализатору, резко ускоряли ход исследований.)

Мы с вами уже прошли мимо таких интересных и общих проблем как преобразование структуры вещества, универсальность гармонических (синусоидальных) колебаний, преобразование спектра сигнала, согласование генератора с нагрузкой, управление мощными потоками энергии с помощью слабых сигналов и др. Сейчас нам предстоит встреча еще с одним общим, универсальным явлением — с возникновением автоколебаний.

Мы часто встречаем механические автоколебания: вибрация самолетного крыла и автоколебания в гидравлических системах (вам наверняка приходилось слышать «поющий» водопроводный кран), и автоколебания далеких звезд, и автоколебания в мире атома, автоколебания при ядерных реак-

циях и электромагнитные автоколебания. Есть серьезные основания думать, что автоколебания играют важнейшую роль и в живой природе, что сама жизнь — это огромное многообразие разного рода, разной степени сложности биохимических автоколебаний.

Что же такое автоколебания? Энциклопедический словарь определяет их так: «...незатухающие колебания, которые могут существовать в какой-либо системе в отсутствие переменного внешнего воздействия, причем амплитуда и период колебаний определяются свойствами самой системы». Применительно к транзисторному устройству, где создаются автоколебания (вы уже, конечно, догадались, что именно такое устройство и называется транзисторным генератором), это определение нужно понимать следующим образом. Мы подводим к генератору только питающее постоянное напряжение, а он дает нам непрерывные, непрекращающиеся электрические колебания (конечно, когда батарея разрядится, то колебания прекратятся, но об этом сейчас не стоит говорить). Генератор создает в своих цепях переменный ток и переменное напряжение, частота и амплитуда которых зависят только от элементов самой транзисторной схемы.

Очевидно, это определение направило ваши мысли к колебательному контуру. Ведь в нем тоже под действием постоянной порции энергии, например под действием энергии, полученной при зарядке конденсатора, возникают электрические колебания. И частота этих колебаний тоже зависит только от элементов самой системы — от индуктивности L_k катушки и емкости C_k конденсатора (Воспоминание № 20). Однако собственные колебания в контуре постепенно затухают, и таким образом нарушается основной элемент определения — «...незатухающие колебания».

И все же мы обратились к колебательному контуру не напрасно. В сочетании с транзисторным усилителем он позволяет получить самый настоящий генератор автоколебаний.

Почему затухают колебания в контуре? Потому что часть энергии теряется на активном сопротивлении потерь R_k и постепенно оно отбирает и превращает в тепло или в излучения всю запасенную в контуре энергию. Отсюда следует: чтобы колебания в контуре стали незатухающими, нужно ликвидировать сопротивление потерь. Или каким-то образом его скомпенсировать.

Вы уже, конечно, вспомнили, что у нас в арсенале есть эффективное средство борьбы с сопротивлением — R_k . Это положительная обратная связь, которую мы уже применяли в регенеративном усилителе (рис. 99). Но только, если в уси-

лителе обратная связь не должна полностью компенсировать потери, в генераторе потери должны быть скомпенсированы полностью.

Здесь-то как раз и проходит граница между усилителем и генератором. До тех пор, пока в контуре еще есть сопротивление R_k , мы имеем усилитель. Но как только это сопротивление исчезает, как только обратная связь полностью компенсирует все потери, усилитель становится генератором, в нем происходит самовозбуждение. Это значит, что на вход усилителя уже не нужно подавать управляющий сигнал (когда-то его называли «возбуждением», и отсюда слово «самовозбуждение»). Как только в контур попадет порция энергии — а это может произойти при любом толчке тока, например при включении питания,— то в контуре возникнут колебания, которые благодаря достаточно сильной обратной связи станут незатухающими. Рожденный в контуре и усиленный транзистором сигнал вновь возвращается в контур, чтобы участвовать в управлении работой транзистора. Транзистор сам создает для себя управляющий сигнал, работает в режиме самовозбуждения, а значит, генерирует незатухающий переменный ток. И, конечно же, поставщиком энергии для него, как всегда, является коллекторная батарея.

Чтобы автогенератор давал электрические колебания с неизменной амплитудой, нужно решить чрезвычайно сложную задачу: нужно, чтобы вносимое в контур отрицательное сопротивление было в точности равно собственному сопротивлению потерь, чтобы в контур через цепь обратной связи поступало ровно столько энергии, сколько нужно для компенсации потерь. Не меньше и не больше, потому что, если ввести в контур хоть чуть-чуть меньше энергии, чем нужно, колебания рано или поздно затухнут. А если ввести хоть немного лишней энергии, то амплитуда колебаний будет расти.

Осуществить столь точную, ювелирную дозировку вводимой в контур энергии просто невозможно. Если даже в какой-то момент путем тщательнейшего подбора расстояния между контурной катушкой L_k и катушкой обратной связи $L_{св}$ удастся установить необходимый баланс, то уже через мгновение он по какой-либо причине окажется нарушенным. То ли легкая вибрация (например, из-за проехавшего по улице автомобиля) сдвинет катушки на какой-нибудь микрон, то ли напряжение батареи уменьшится на какой-нибудь микровольт, то ли сопротивление проводов увеличится на какие-то доли ома из-за легкого дуновения ветерка. Одним словом, автогенератор всегда находится в неустойчивом динамическом состоянии, и, для того чтобы амплитуда колебаний оставалась постоянной, нуж-

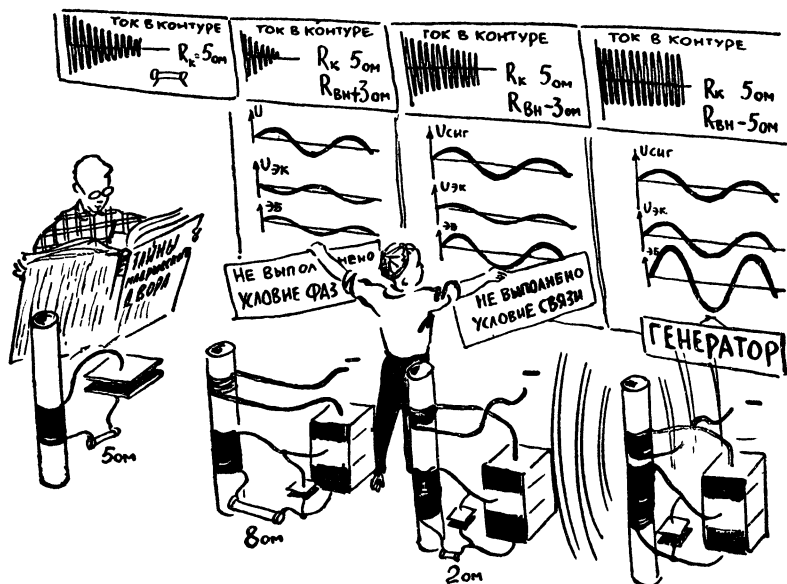


Рис. 114. Для получения автоколебаний необходимо выполнить два условия: условие фаз и условие связи
(Рис. 110—113 см. на цветной вклейке между стр. 288—289).

но ввести некое автоматическое устройство, которое все время регулировало бы степень положительной обратной связи.

Подобная задача уже возникала перед нами, когда мы создавали систему автоматической стабилизации режима транзисторного усилителя. Уже тогда мы отметили, какую большую роль играет в электронной аппаратуре малая автоматизация. Еще один пример простейшей схемы авторегулировки мы встречаем в генераторе незатухающих колебаний, например, в виде схемы, постепенно запирающей транзистор, с увеличением управляющего сигнала.

Итак, для того чтобы усилитель превратился в генератор и давал незатухающие электрические колебания, нужно выполнить два условия. Их обычно называют условием фаз и условием связи (рис. 114). Выполнить условие фаз — это значит подать из выходной цепи во входную сигнал именно в такой фазе, чтобы он компенсировал потери энергии. Проще говоря, в автогенераторе обратная связь должна быть положительной. Выполнить условие связи — значит подать из выходной цепи во входную сигнал настолько мощный, чтобы он полностью компенсировал все потери энергии во входной цепи.

Как мы только что видели по цепи обратной связи, энергию нужно передавать даже с некоторым избытком, в расчете на то, что система авторегулировки сама будет поддерживать нужный уровень поступающего во входную цепь сигнала.

Схема, которую мы до сих пор рассматривали, называется схемой с трансформаторной обратной связью: контурная катушка L_k и катушка обратной связи L_{oc} образуют своего рода трансформатор. Условие фаз в этой схеме выполняется только при определенном включении выводов катушек. И если генератор, собранный по трансформаторной схеме, почему-либо не работает, то прежде всего стоит предположить, что катушки включены неверно и условие фаз не выполняется — обратная связь получается не положительной, а отрицательной. В этом случае нужно поменять местами выводы одной из двух катушек и повернуть таким образом фазу напряжения, поступающего на вход генератора, на 180° . Если не выполняется условие связи, то следует сблизить катушки или увеличить число витков катушки L_{oc} .

Кроме генератора с трансформаторной обратной связью, существуют еще две схемы автогенераторов с колебательным контуром (очень скоро мы познакомимся с генераторами, в которых контура нет). Это так называемые трехточечные схемы (рис. 115) с емкостной или же с индуктивной обратной связью. Трехточечные схемы получили такое название потому, что в них транзистор подключается к контуру в трех точках и напряжение U_{oc} обратной связи снимается с некоторой части самого контура. В индуктивной трехточечной схеме U_{oc} снимается с части катушки L_k , а в емкостной схеме — с конденсатора C_k , который вместе с C'_k входит в контур. Общая емкость контура в этом случае определяется двумя последовательно соединенными конденсаторами (Воспоминание № 14).

Условие фаз в обеих схемах выполняется только при таком подключении контура к транзистору, когда в центре оказывается эмиттер, а по краям — коллектор и база. Если не выполняется условие связи, то в индуктивной схеме нужно несколько переместить среднюю точку подключения к контуру с таким расчетом, чтобы между базой и эмиттером оказалось большее число витков. При этом увеличится и напряжение обратной связи U_{oc} . В емкостной схеме в подобном случае нужно уменьшить емкость конденсатора C_k'' , с которого снимается напряжение U_{oc} , так как этот конденсатор вместе с C'_k образует своего рода делитель напряжения. Чем меньше C_k'' ,

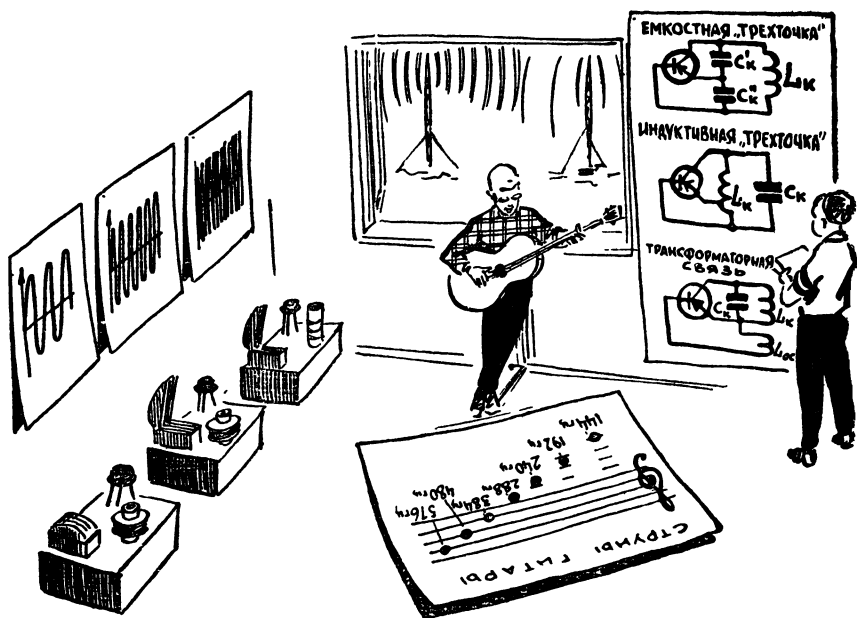


Рис. 115. Частота автоколебаний определяется параметрами электрической цепи, в частности индуктивностью и емкостью контура.

тем больше его емкостное сопротивление (Воспоминание № 13), тем бóльшая часть контурного напряжения оказывается напряжением обратной связи.

Частота колебаний автогенератора во всех случаях определяется данными деталей контура $L_K C_K$. Оговорка «в основном» необходима потому, что в контур входят еще и невидимые индуктивности, емкости и сопротивления. И прежде всего емкости коллекторного и эмиттерного переходов. Они суммируются с параметрами самого контура и таким образом влияют на частоту. В случае необходимости можно довольно просто изменить частоту колебаний, изменив для этого L_K или C_K (рис. 115).

Автогенератор с колебательным контуром при правильном выборе режима транзистора дает напряжение, довольно близкое к синусоидальному. Однако синусоидальное напряжение можно получить и без контура — в так называемом RC -генераторе. В самом упрощенном виде принцип действия этого генератора можно описать так: в нем создана цепь обратной связи, по которой проходят колебания разных частот, но только

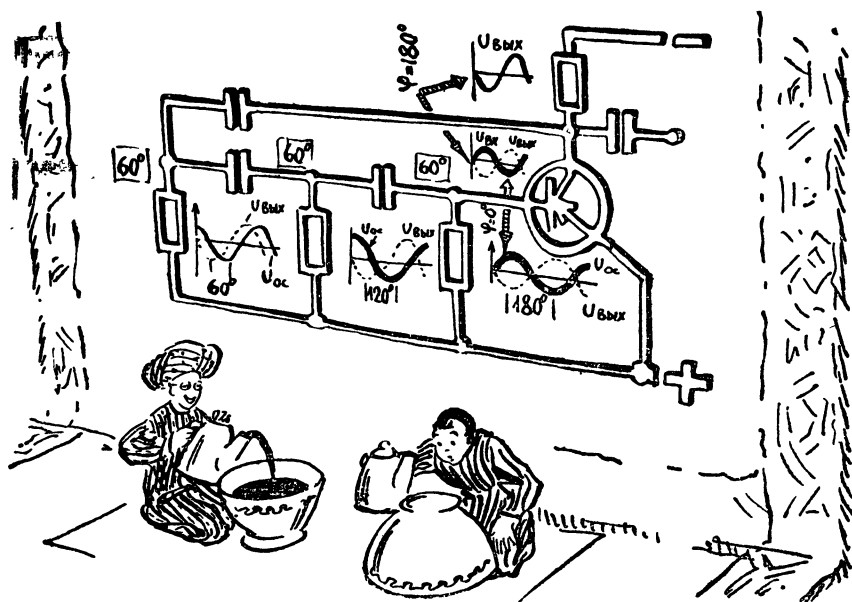


Рис. 116 В RC — генераторе для выполнения условия фаз используются фазовращающие цепочки из конденсаторов и резисторов.

для одной из них выполняется условие фаз, и именно на этой частоте происходит самовозбуждение (рис. 116).

В цепь обратной связи генератора входят три цепочки, каждая из которых включает резистор и конденсатор. Отсюда и само название RC -генератор. Мы уже знаем, что конденсатор создает сдвиг фаз между током и напряжением (Воспоминание № 13), а резистор никакого сдвига фаз не создает. Вместе они сдвигают фазу на некоторый угол φ , который лежит в пределах между 0 и 90° . Угол сдвига фаз зависит от двух факторов — от соотношения между R и C и от частоты (Воспоминание № 16). С увеличением частоты, например, емкостное сопротивление x_C уменьшается, его роль в общей последовательной цепи становится менее ощутимой, и угол сдвига фаз также становится меньше. На более низких частотах конденсатор становится главным действующим лицом, и угол сдвига фаз приближается к 90° .

Всегда существует такая частота, на которой угол сдвига фаз между током и напряжением, а значит, между напряжением, подводимым к RC -цепочке, и напряжением, которое с ней сравнивается, равен 60° . Если соединить последовательно три

такие цепочки, то они создадут на какой-то одной частоте, (обратите внимание — только на одной определенной частоте!) общий угол сдвига фаз 180° . Именно на этой частоте в RC -генераторе будет выполняться условие фаз, и именно эту частоту он будет генерировать. Если нужно изменить частоту генерации, то достаточно изменить данные RC -цепочек. При уменьшении сопротивления R и емкости C условие фаз будет выполняться для более высокой частоты, а при их увеличении — для более низкой.

Теперь настал момент несколько отвлечься от основной темы и выполнить данное в конце предыдущего раздела обещание: объяснить, как возникает самовозбуждение в усилителе низкой частоты.

В усилителе НЧ всегда существует обратная связь. Это может быть отрицательная обратная связь, которую мы вводим для уменьшения искажений. Это может быть и неизвестно какая обратная связь, которая появляется неизвестно каким путем — через источники питания, через общие цепи смещения, через внутренние сопротивления транзисторов и т. д. Вполне вероятно, что для какой-то частоты, а может быть, и для целой группы частот, элементы обратной связи создадут такой сдвиг фаз, что она окажется положительной. А если еще при этом будет выполняться необходимое для самовозбуждения условие фаз, то усилитель, естественно, превратится в генератор.

Устранить самовозбуждение усилителя можно, например, так: нужно добиться, чтобы в нем не выполнялось условие связи. А для этого, в свою очередь, нужно снизить усиление одного или нескольких каскадов, уменьшив, например, у них сопротивления нагрузки. Правда, такой способ борьбы с самовозбуждением трудно признать удачным, и, прежде чем прибегать к этой крайней мере, стоит поискать другие пути. Например, ввести дополнительные развязывающие фильтры; зашунтировать батарею конденсатором большой емкости; отсоединить цепи отрицательной обратной связи или, по крайней мере, изменить данные их деталей; поочередно замыкать выходные цепи транзисторов конденсаторами сравнительно небольшой емкости, по несколько тысяч пикофард; пробовать увеличить емкость переходных конденсаторов, и др.

Генерация может возникать и в усилителе ВЧ, причем здесь для выполнения обоих условий самовозбуждения не так уж много надо. Сигнал нужной фазы и нужного уровня может, например, попадать из выходной цепи во входную через какую-нибудь паразитную емкость, образованную двумя близко расположенными проводниками. Или через общее магнитное

поле двух неудачно расположенных катушек. К сожалению, генерация в усилителе ВЧ не всегда проявляет себя в виде специфического «писка». Может так случиться, что усилитель ВЧ возбуждается, на слух это не обнаруживается, а приемник в результате такого самовозбуждения не работает. Чтобы найти и устранить самовозбуждение усилителя ВЧ, нужно попробовать уменьшить усиление каскадов, а может быть, временно даже отключить один из них.

Устранение паразитного самовозбуждения усилителя во всех случаях — дело не простое и кропотливое. Оно требует терпения и, самое главное, понимания физических процессов, с которыми связано превращение усилителя в генератор.

Существует целый ряд генераторов, которые дают колебания не синусоидальной, а сложной формы, например прямоугольные импульсы, пилообразное напряжение, прерывистые, как бы модулированные колебания и т. п. Несмотря на изменение формы тока, принцип действия всех генераторов остается неизменным: положительная обратная связь приводит к тому, что электрические колебания, используя энергию коллекторной батареи, сами себя поддерживают, создают непрерывный процесс, в результате которого меняется коллекторный ток транзистора.

Один из весьма популярных генераторов колебаний сложной формы — это мультивибратор. Само его название, переведенное на русский язык, означает «генератор, создающий много разных колебаний». В распространенной схеме мультивибратора работают два транзистора, причем выход одного из них связан со входом другого (рис. 117). Это приводит к тому, что транзисторы поочередно открываются и запираются: если один из них запирается, то он отпирает своего запертого соседа, а тот, в свою очередь, открывшись, запирает своего избавителя, открываясь при этом сам. Процесс этот происходит непрерывно, чем-то напоминая перебрасывание мяча через волейбольную сетку (слова «отпирается» и «запирается» применительно к транзистору, как всегда, означают пропускание коллекторного тока под действием «минуса» на базе и прекращение этого тока под действием «плюса»). Частота колебаний, которые дает мультивибратор, зависит от того, насколько быстро происходит заряд и разряд конденсаторов C' и C . Изменяя емкость этих конденсаторов, а также сопротивление резисторов R'_6 и R_6 , через которые происходит заряд и разряд конденсаторов, можно в довольно широких пределах менять частоту колебаний.

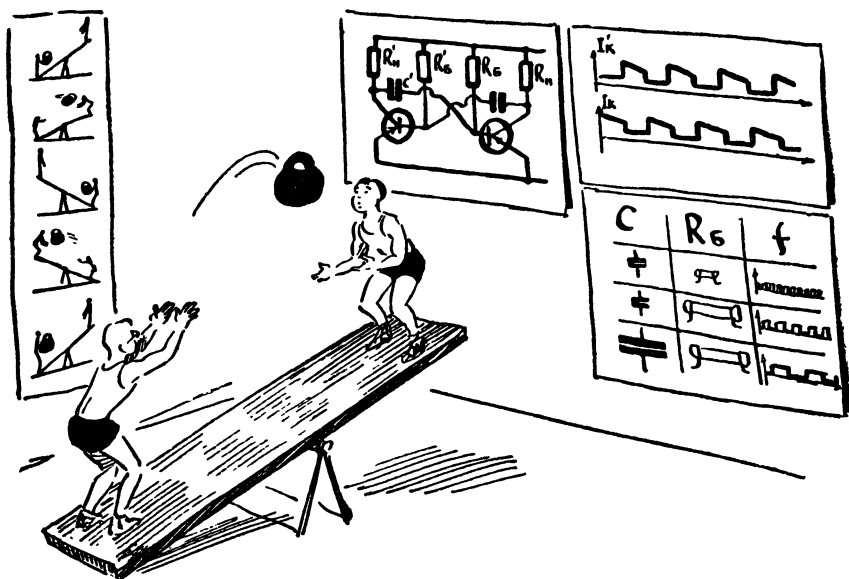


Рис. 117. В мультивибраторе колебания возникают в результате поочередного запирания транзисторов.

Рассмотрим несколько практических схем транзисторных генераторов.

Простейший генератор, выполненный по трехточечной схеме с индуктивной обратной связью (рис. 118—1), может заменить в вашей квартире электрический звонок. Роль контурной катушки с отводом в таком звонке выполняет автотрансформатор, намотанный на любом сердечнике сечением 3 см^2 (можно взять, например, сердечник от трансляционного громкоговорителя). Данные секций: *Iв* содержит 25 витков, *Iа* и *Iб* — по 35 витков провода ПЭ 0,45. Непосредственно к секции *Iв* подключен низкоомный громкоговоритель. Частоту колебаний можно менять, подбирая емкость конденсатора C_1 , который входит в колебательный контур.

Следующий генератор (рис. 118—2) дает прерывистые колебания звуковой частоты, чем-то напоминающие сигналы нашего первого спутника, знаменитое «Бип-бип-бип...». Сам генератор звуковой частоты собран по трехточечной схеме с емкостной обратной связью. В качестве катушки L_1 можно включить обмотку выходного или согласующего трансформатора.

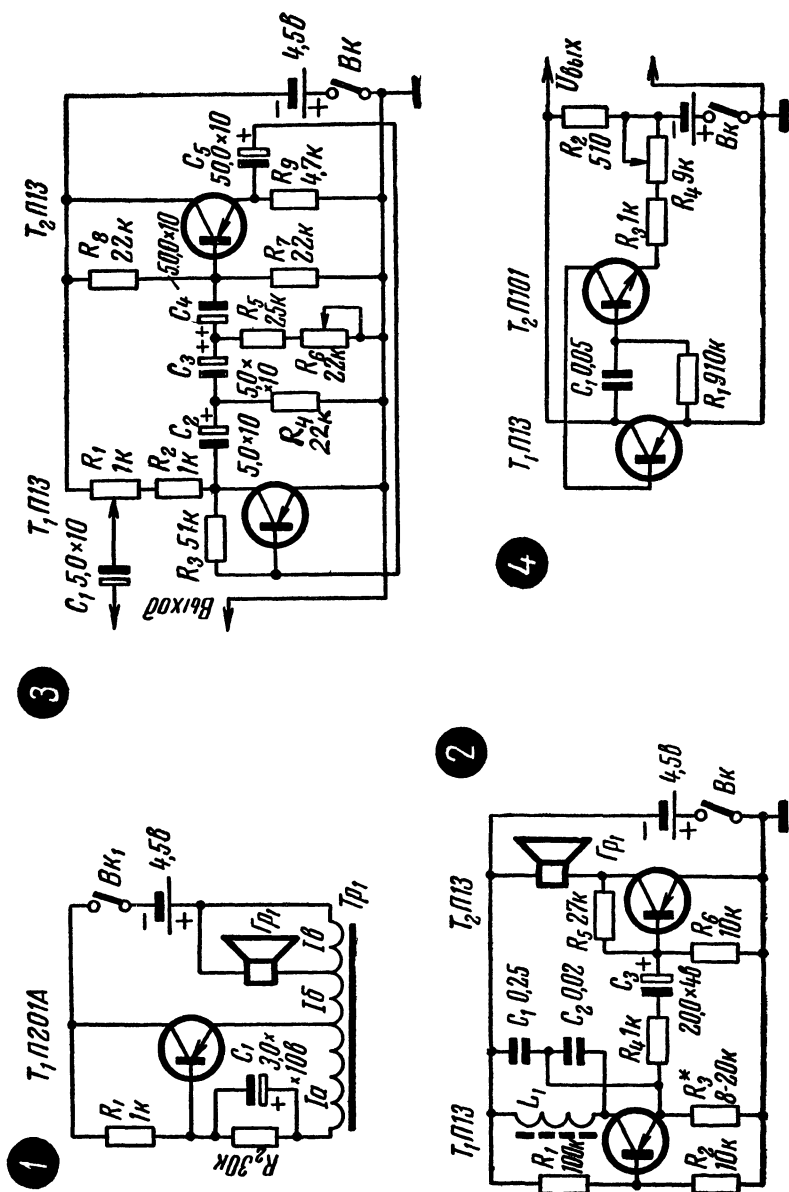


Рис. 118. Схемы транзисторных генераторов.

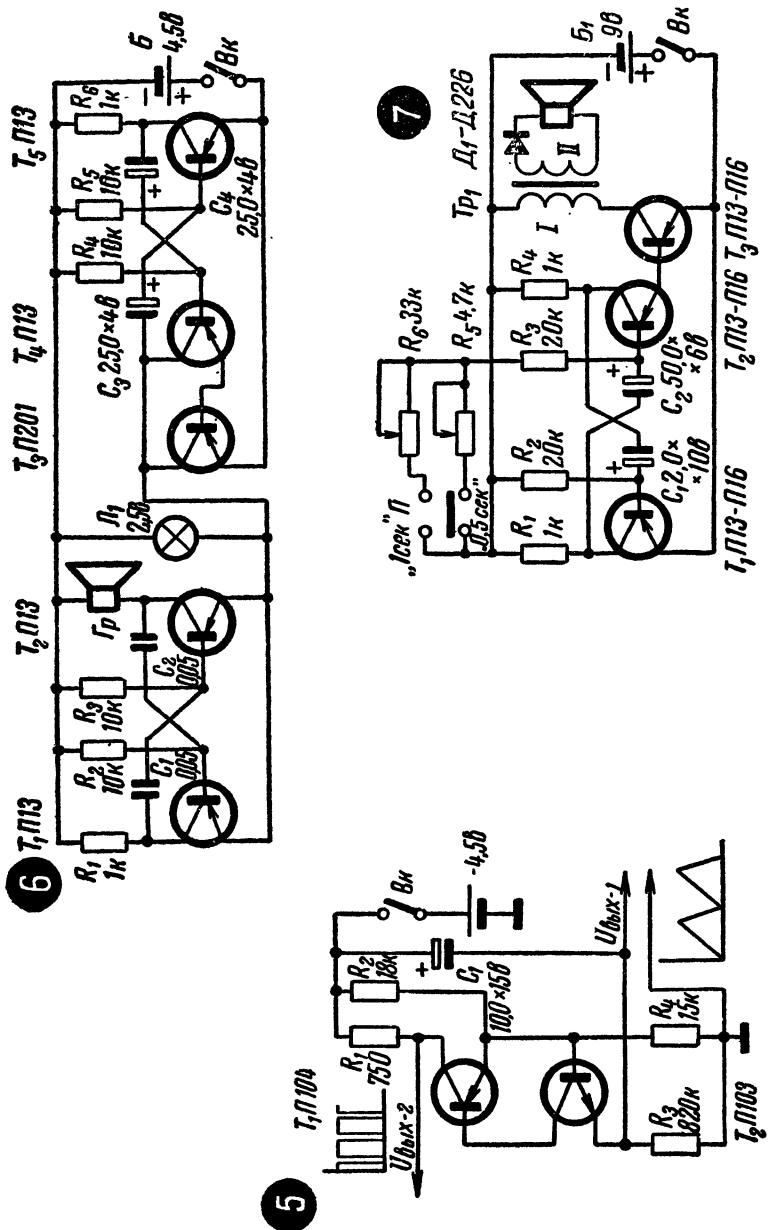


Рис. 118. Схемы транзисторных генераторов. (продолжение).

Прерывистая генерация получается благодаря периодическому запираанию транзистора T_1 напряжением, которое появляется на R_3^* . После того как транзистор заперется и колебания срываюся, запирающее напряжение падает, и транзистор вновь открывается. Частота отпираания транзистора, а значит, и частота появления «пакетов» звуковых колебаний зависят от данных зарядной цепочки R_3C_3 . Подбором этих деталей можно добиться того, что звуковые сигналы будут появляться один — три раза в секунду. Частота звуковых колебаний, то есть сам тон звука, в основном определяется деталями контура L_1C_2 . При налаживании генератора может оказаться полезным заземлить базу T_1 через конденсатор в несколько микрофард. На транзисторе T_2 собран усилитель, в коллекторную цепь которого включается телефонный капсульт или громкоговоритель с выходным трансформатором.

Периодический заряд конденсатора используется в другом, очень простом двухтранзисторном генераторе (рис. 118—5), который дает два «сорта» электрических сигналов — пилообразный и близкий к прямоугольному. В первый момент после включения оба транзистора заперты, а конденсатор C_1 через R_3 заряжается питающим напряжением. При этом запирающее напряжение уменьшается, и в какой-то момент транзисторы оказываются открытыми. Через них разряжается конденсатор, и весь процесс начинается сначала. При указанных на схеме величинах продолжительность одной «пилы» составляет около 3,5 сек. Чтобы уменьшить это время, то есть увеличить частоту колебаний, нужно ускорить процесс заряда конденсатора, уменьшив C_1 или R_3 . Особенность генератора — высокое выходное сопротивление, и его нужно подключать к усилителю с первым каскадом по схеме ОК.

Во многих практических схемах RC -генераторов используются два транзистора, так как при этом появляется запас усиления и легче выполнить условие связи. Сигнал поступает с выхода второго транзистора на вход первого через обычную линию передачи, состоящую из трех RC -цепочек, и каждая из них поворачивает фазу на 60° . При подсчете общего сдвига фаз нужно помнить, что на коллекторе и на базе одного и того же транзистора напряжения противофазны (когда на базе растет напряжение, на коллекторе оно уменьшается). Если же нагрузка включена в эмиттерную цепь (схема ОК), то на этой нагрузке напряжение совпадает по фазе с напряжением на базе (когда напряжение на базе растет, то увеличивается коллекторный ток и напряжение на эмиттерной нагрузке тоже увеличивается).

После этих предупреждений станет понятно, как получается необходимый сдвиг фаз в практической схеме RC -генератора, приведенной на рис. 118—3. Транзистор T_2 не поворачивает фазу обратной связи, транзистор T_1 поворачивает фазу на 180° и на столько же поворачивает фазу линии передачи, состоящая из трех RC -цепочек. Общий сдвиг фаз равен 360° , то есть равен нулю, и условие фаз выполняется.

Для приведенных на схеме данных частота колебаний составляет примерно 5—15 гц. Такие низкочастотные колебания используются в электромузыкальных инструментах для создания так называемого вибрато — своеобразной модуляции звука. Если уменьшить емкость и сопротивление RC -цепочек, то генератор будет давать более высокую частоту.

В качестве низкочастотного генератора радиолюбители чаще всего используют мультивибратор — он прост по схеме, не требует каких-либо сложных деталей, начинает работать без всякого налаживания и позволяет очень легко менять частоту колебаний. Два типичных мультивибратора вы найдете на рис. 118—6, где приводится схема игрушки «Спутник».

Мультивибратор, выполненный на транзисторах T_1 и T_2 , — это, по сути дела, самостоятельный блок, который дает колебания с частотой около 1 кГц. Увеличивая C_1C_2 или в крайнем случае R_3R_4 (сопротивление этих резисторов влияет не только на частоту, но и на режим триодов), можно уменьшить эту частоту вплоть до долей герца. Так, в частности, во втором мультивибраторе, собранном на транзисторах T_4T_5 , благодаря увеличению емкости разделительных конденсаторов до 25 мкФ частота понижена до 3 гц.

Второй мультивибратор является своего рода ключом, подающим питание на первый, «звуковой» мультивибратор. В результате, так же как и в схеме рис. 118—2 звук получается прерывистым и напоминает сигналы первого спутника. Периодическое включение «звукового» мультивибратора происходит потому, что он фактически является коллекторной нагрузкой одного из транзисторов (T_4) «ключевого» (правого по схеме) мультивибратора. Когда этот транзистор заперт, то на нагрузке, то есть на «звуковом» мультивибраторе, нет питающего напряжения (при $I_k=0$ напряжение $U_n=I_kR_n$ также равно нулю). Когда же транзистор T_4 отпирается, то сопротивление его падает и напряжение источника почти полностью поступает на коллекторную нагрузку — на «звуковой» мультивибратор. Поскольку этот мультивибратор вместе с сигнальной лампочкой от карманного фонаря потребляет сравнительно большой ток — больше 100 мА, — то в схему пришлось ввести еще один, уже довольно мощный транзистор П201 (T_3). Он

помогает транзистору T_4 выполнять трудную работу и легко пропускает нужный ток. Этот транзистор можно назвать полупроводниковым реле, которое, получив команду от своего управляющего транзистора (T_4), подает питание на «звуковой» мультивибратор.

Еще одно применение мультивибратора — электронный метроном (рис. 118—7), то есть генератор, отбивающий для музыканта ровный такт во время репетиций.

Частоту следования импульсов можно менять скачкообразно переключателем $П_1$ или плавно одним из резисторов R_5 или R_6 (в зависимости от положения переключателя). Этот же мультивибратор с усилителем T_3 , если резко уменьшить емкость переходных конденсаторов, можно использовать как самостоятельный звуковой генератор, например, для обучения азбуке Морзе или в простейшем электромузыкальном инструменте. Для увеличения выходной мощности можно в качестве T_3 включить транзистор П201.

Очень простой мультивибратор можно собрать на транзисторах разной проводимости (рис. 118—4). Частоту следования импульсов и их продолжительность здесь легко менять в широких пределах: с увеличением C_1 и R_1 возрастает длительность импульсов, а с увеличением C_1 и R_2 возрастает продолжительность пауз между ними. При указанных на схемах величинах частота повторения импульсов оказывается очень низкой — около одного импульса в секунду.

Простой электромузыкальный инструмент «поющий стакан» (рис. 111—4) можно собрать на основе так называемого блокинг-генератора.

Так же как в знакомом нам генераторе синусоидальных колебаний с трансформаторной обратной связью (рис. 114), энергия из выходной цепи во входную передается через трансформатор. Однако самовозбуждение блокинг-генератора не связано с собственными синусоидальными колебаниями в контуре. Колебания в блокинг-генераторе возникают в результате довольно сложных лавинообразных процессов, которые приводят к периодическому запираению и отпираению транзистора. И, как это уже не раз бывало в других знакомых нам генераторах, частота колебаний определяется данными зарядной RC -цепочки.

Выходное сопротивление блокинг-генератора довольно велико, и его можно подключать лишь к усилителю НЧ с высокоомным входом, например ко входу звукоусилителя лампового приемника или радиолы. Для подключения блокинг-генератора к транзисторному усилителю НЧ нужно ввести дополнительный первый усилительный каскад по схеме ОК или применить

готовый блок усиления, схема которого приведена на рис. 104—1. Роль зарядного резистора выполняет вода, налитая в стакан и включенная в цепь с помощью двух длинных электродов из тонкой жести или из толстой проволоки.

Если поднимать или опускать эти электроды или один из них, то объем воды, включенной в цепь, будет меняться, а значит, будет меняться и частота колебаний блокинг-генератора. Элементы цепи подобраны таким образом, чтобы генератор работал в диапазоне звуковых частот и чтобы, перемещая один из электродов, можно было бы исполнять простейшие мелодии. В качестве Tr_1 можно взять БТК (блокинг-трансформатор кадровый) от любого телевизора.

На изменении сопротивления зарядной цепочки основано изменение тона в другом простейшем клавишном музыкальном инструменте (рис. 111—1). Сопротивления, определяющие тот или иной тон, образованы двумя резисторами, например R'_a и R''_a , чтобы подбором меньшего сопротивления легче было бы осуществить точную настройку инструмента. Еще проще подгонять частоту генератора, если в зарядную цепь включить переменные резисторы. Настройку генератора нетрудно сделать с помощью рояля. Ориентировочно сопротивление $R'_a + R''_a$ должно составлять $150 + 200 \text{ ком}$, а каждое следующее должно быть меньше примерно на 10 ком .

Клавиши легко изготовить самому из тонкой и упругой стальной, латунной или гетинаксовой пластинки, закрепив на ней простейшие контакты (рис. 111—3).

После того как электромузыкальный инструмент настроен и налажен, можно попытаться сделать более богатым его звучание, ввести несколько цепей формирования тембра. Изменение тембра — это всегда изменение формы сигнала, или, иначе говоря, его искажение. Поэтому в систему формирования тембра могут, например, входить диоды, срезающие половину сигнала. Или диоды, работающие в режиме ограничения (рис. 27—9). Формирование тембра в электромузыкальных инструментах лишь расширяет наш список возможных «профессий» полупроводникового диода, но еще далеко не завершает этот список.

ПРЕКРАСНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Если вы построите приемник по одному из приведенных в этой книге описаний и захотите, не меняя основной схемы, ввести в приемник коротковолновый диапазон, то знайте — это напрасная затея.

На первый взгляд может показаться, что, для того чтобы принимать короткие волны, нужно лишь изготовить новый колебательный контур с очень небольшой индуктивностью. Резонансная частота контура при этом резко увеличится, и если правильно рассчитать индуктивность катушки, то можно вогнуть частоту настройки контура в границы коротковолнового диапазона. Однако такая мера, как это ни странно, ничего не даст — контур будет настраиваться на коротковолновые станции, а принимать их вы наверняка не будете.

Причин здесь несколько. На коротких волнах, то есть на частотах от нескольких $M\mu$ до нескольких десятков $M\mu$, все наши усилительные схемы не работают или в лучшем случае работают плохо. Начинают сказываться паразитные емкости, которые не играли почти никакой роли на средних и длинных волнах, то есть на частотах меньше или немного больше чем $1 M\mu$. Из-за тех же паразитных емкостей возникают обратные связи, и усилитель, как правило, возбуждается. Но даже если в результате долгого, кропотливого налаживания удастся миновать эти неприятности и провести сигналы коротковолновых станций от антенны до детектора, то и в этом случае пользоваться приемником все равно нельзя будет, потому что контур пропустит в приемник сразу очень большое число станций.

На коротких волнах даже очень хороший контур не в состоянии отделить нужную станцию не только от соседней, но и от соседей этой соседней станции. Понять это нетрудно. Радиовещательные станции отстоят друг от друга на 10 кгц : если одна станция работает, например, на частоте 700 кгц , то уже на 710 кгц или 690 кгц может работать другая станция. Сравнительно небольшой интервал — 10 кгц — на длинных волнах составляет примерно 2—7% резонансной частоты. Такое отличие частот, такое отклонение от резонанса хороший контур может легко заметить, и поэтому на длинных волнах он обладает неплохой избирательностью, неплохо ослабляет соседние мешающие станции.

На средних волнах дело уже обстоит хуже: здесь частота соседней мешающей станции отличается от резонансной частоты всего на 0,7—2% (это вполне понятно — с переходом от длинных волн к средним резонансная частота контура повышается, а расстояние до соседней станции остается таким же, каким и было, — 10 кгц). Вот почему на средних волнах избирательность оказывается значительно хуже, чем на длинных.

Ну, а что касается коротковолнового диапазона, то здесь входной контур любого из наших приемников, по сути дела,

вообще не обладает никакой избирательностью. На КВ диапазоне частота соседней станции отличается от резонансной частоты всего на 0,05—0,2%, и заметить такое различие контур не в состоянии. Практически он сразу может пропустить в приемник без заметного ослабления двадцать—пятьдесят радиовещательных станций, не считая множества «морзянок», промышленных и атмосферных помех.

Если вы захотите в порядке «психологического практикума» найти выход из создавшегося трудного положения, то наверняка прежде всего предложите два решения. Решение первое: можно увеличить число колебательных контуров. Решение второе: можно ввести положительную обратную связь и с ее помощью улучшить добротность контура, сделать его резонансную кривую более острой.

К сожалению, практически ни одно из этих двух решений не приемлемо. Увеличив число контуров, вы страшно усложните приемник: ведь каждый контур — это самостоятельная катушка, отдельная секция переключателя диапазонов и, что страшнее всего, отдельный, но в то же время связанный с остальными конденсатор настройки (все контуры должны перестраиваться одновременно поворотом одной ручки!). Но даже если бы мы создали столь громоздкую многоконтурную систему настройки, то и она не решила бы проблему перевода наших простейших приемников на короткие волны. Что же касается положительной обратной связи, то на коротких волнах она крайне неустойчива и может лишь истрепать нервы владельцу приемника, но никак не обеспечить устойчивый, уверенный прием коротковолновых станций.

В этом месте, по-видимому, многие из вас хотят задать вопрос: если все так сложно и все так мрачно, то как же работают на коротких волнах такие, например, транзисторные приемники, как «Спидола», «Спорт-2», «Соната», «Сувенир» и другие? Ответ прост: в этих приемниках применен совершенно особый, еще не знакомый нам супергетеродинный принцип радиоприема.

Сущность его состоит в следующем. В каком бы диапазоне ни велся прием, какую бы станцию мы ни принимали, ее сигнал в приемнике прежде всего преобразуется в новый сигнал, имеющий стандартную, для всех случаев одинаковую частоту: 465 кГц. А дальше уже усиливается этот двойник сигнала принимаемой станции, усиливается сигнал промежуточной частоты (ПЧ). На промежуточной частоте происходит и очистка от мешающих соседних станций. Теперь их частоты и для средневолнового диапазона и для коротковолнового отличаются от резонансной (не забудьте, она всегда равна 465 кГц) на весьма

ощутимую величину — более чем на 2%. Но даже не эта цифра радует больше всего. Самое главное то, что промежуточная частота всегда одинакова, а значит, в усилитель ПЧ можно включить большое число раз и навсегда настроенных контуров.

После того как с таким блеском предстали перед нами достоинства супергетеродинного приема, остается доказать, что этот принцип в действительности может быть реализован, что можно сигнал любой принимаемой станции превратить в сигнал стандартной промежуточной частоты.

Нажмите две близкие клавиши рояля — сначала по отдельности, а затем вместе. Внимательно прислушавшись, вы обнаружите, что при совместном звучании клавиши создают какой-то низкий, хрипловатый и довольно слабый призвук, которого не дает ни одна из них в отдельности. Этот призвук появляется в результате одновременного искажения двух сигналов, в данном случае — двух самостоятельных звуков, которые дают две одновременно нажатые клавиши.

Дело в том, что наше ухо в какой-то степени ведет себя как полупроводниковый диод: оно имеет нелинейную характеристику (см. стр. 161) и слегка искажает форму звукового сигнала, искажает спектр звука. Когда в ухо попадает только один звук, то в результате искажений появляются его гармоники, составляющие с более высокими и всегда кратными частотами. Когда же искажениям подвергаются одновременно два звука, то, кроме гармоник каждого из них, появляются синусоидальные колебания с так называемыми комбинационными частотами — суммарной и разностной (промежуточной).

Поясним это числовым примером. Допустим, что нажата клавиша, издающая звук с частотой 440 гц («ля» первой октавы). В результате искажений этого звука появятся его гармоники — 880 гц, 1320 гц, 1760 гц и т. д. Аналогично звук с частотой 523 гц («до» второй октавы) даст гармоники 1046 гц, 1569 гц, 2092 гц и т. д. Когда же наше ухо подвергнет искажениям одновременно оба звука, то, кроме всех этих гармоник, появятся многочисленные комбинационные частоты и в их числе — синусоидальные колебания с суммарной частотой 963 гц ($523+440$) и разностной (промежуточной) частотой 83 гц ($523-440$).

Детально пояснить причину появления комбинационных частот довольно трудно: для этого нужны длинные математические выкладки и немало новых, сравнительно сложных понятий. Поэтому всем желающим убедиться в том, что разностная (промежуточная) частота действительно возникает, можно посоветовать лишь нажимать на две близкие клавиши

рояля и внимательно прислушиваться к их совместному звучанию.

Есть, правда, еще один способ удостовериться в том, что при одновременном искажении двух сигналов появляется разностная (промежуточная) частота: достаточно включить какой-нибудь супергетеродинный приемник и убедиться в том, что он действительно работает. Лучшего доказательства существования промежуточной частоты и не придумаешь. Потому что в супергетеродине сам сигнал принимаемой станции, как правило, перестает существовать уже в первом каскаде. А дальше усиление, отделение от помех и детектирования производится с рожденным в самом приемнике сигналом промежуточной частоты.

Блок-схема супергетеродинного приемника приведена в верхней левой части рис. 119, листок А. Принятый сигнал с частотой $f_{\text{сиг}}$ подается на преобразователь частоты. Туда же подается вспомогательный сигнал с частотой $f_{\text{г}}$ от собственного маломощного генератора, расположенного в самом приемнике. Этот генератор называется гетеродином, а частоту его можно менять переключением катушек и изменением емкости конденсатора настройки. Преобразователь частоты соединен с усилителем ПЧ, все контуры которого раз и навсегда настроены на промежуточную частоту $f_{\text{пр}}$.

Мы уже говорили, что на коротких и даже на средних волнах входной контур может пропустить сразу несколько сигналов. Встретившись в преобразователе частоты с этими прошедшими через входной контур сигналами, переменное напряжение гетеродина создаст с ними разностные частоты. Но только одна из этих разностных частот, принадлежащая только одной, нужной нам станции, будет равна стандартной промежуточной частоте, на которую настроены все контуры приемника. И только эту разностную частоту усилитель ПЧ пропустит к детектору.

Если вы захотите принять другую станцию, то нужно будет изменить частоту гетеродина так, чтобы он создал сигнал стандартной промежуточной частоты уже с этой другой станцией. Изменяя частоту гетеродина, мы будем получать промежуточную частоту 465 кГц, то с одной, то с другой, то с третьей станцией, то есть будем перестраивать приемник с одной станции на другую.

Несколько слов о самом главном элементе супергетеродина — о преобразователе частоты. Этот элемент должен обязательно искажать форму сигнала так, как, скажем, наше ухо искажает звук. Без этих искажений в принципе не могут появиться новые составляющие, в том числе не может появиться

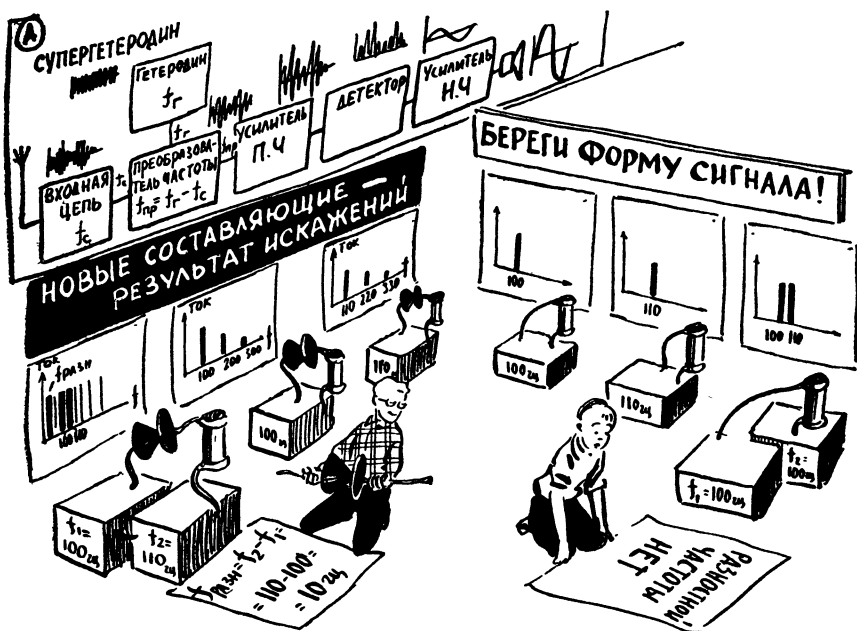


Рис. 119. При одновременном искажении двух сигналов возникают составляющие с разностной и суммарной частотами.

и разностная частота. Иногда роль преобразователя частоты выполняет диод, но чаще — транзистор, работающий где-то в районе загиба входной характеристики. Только в этом случае оба сигнала — поступивший из входной цепи и сигнал собственного гетеродина — будут искажаться и дадут разностную частоту.

Кстати, о слове «искажения». В данном случае его, по-видимому, нельзя считать удачным, хотя оно и правильно отражает все, что происходит с сигналами. Подобно тому, как наше ухо искажает звук с «хорошими намерениями» и в результате таких искажений у звука лишь появляется приятная тембровая окраска, так и преобразователь обычно не искажает, не портит низкочастотную огибающую принятого сигнала, не портит конечную продукцию приемника — звук. И когда дело касается создания промежуточной частоты, то никогда не говорят об искажении сигналов, а называют этот процесс преобразованием частоты.

Уделив так много внимания принципу супергетеродинного

приема, мы сейчас совершим резкий поворот и оставим в стороне практические схемы транзисторных супергетеродинов. Во-первых, постройка такого приемника связана со многими трудными для любителя операциями, в частности — с настройкой большого числа контуров. Во-вторых, каждый желающий построить транзисторный супергетеродин сможет воспользоваться одним из многих его подробных описаний, имеющихся в радиолюбительских брошюрах и журналах. И, наконец, третье. Совсем не обязательно строить приемник для того, чтобы на практике посмотреть, как осуществляется преобразование частоты. Понаблюдать за этим интересным процессом можно и в каком-нибудь другом электронном приборе, например в металлоискателе или электромузыкальном инструменте — терменвоксе.

Этот инструмент получил свое название по имени изобретателя — советского радиоинженера Льва Термена. Он построил терменвокс еще лет пятьдесят назад, и с тех пор этот родоначальник электронной музыки обошел весь мир. Лев Термен демонстрировал терменвокс Ленину, и, как рассказывают очевидцы этой демонстрации, Владимир Ильич проявил большой интерес к одному из первенцев электроники.

Принцип действия терменвокса поясняет рис. 120. Основа этого музыкального инструмента — два высокочастотных генератора и преобразователь частоты. Частоты генераторов f_1 и f_2 выбираются таким образом, чтобы разностная частота $f_{\text{разн}}$ лежала в звуковом диапазоне. Так, например, если $f_1 = 100 \text{ кгц}$, а $f_2 = 101 \text{ кгц}$, то разностная частота как раз и составит 1 кгц , то есть попадет в область звуковых частот. В дальнейшем электрические колебания разностной частоты усиливаются и превращаются в звук с помощью громкоговорителя. Один из генераторов терменвокса всегда дает постоянную частоту, а частоту второго генератора можно в небольших пределах менять. При этом меняется и разностная частота, то есть меняется высота звука. А именно это прежде всего и требуется от музыкального инструмента.

Необходимое изменение частоты одного из генераторов терменвокса осуществляется следующим образом. К контуру этого генератора подключают металлический штырь и приближают к нему руку. При этом создается некий конденсатор, одной обкладкой которого является штырь, а второй — рука. В контур вносится дополнительная емкость $C_{\text{вн}}$, которая зависит от расстояния между рукой и штырем. Перемещая руку относительно штыря, мы меняем емкость контура, а значит, и частоту генератора. Вместе с ней меняется разностная частота, меняется высота звука.

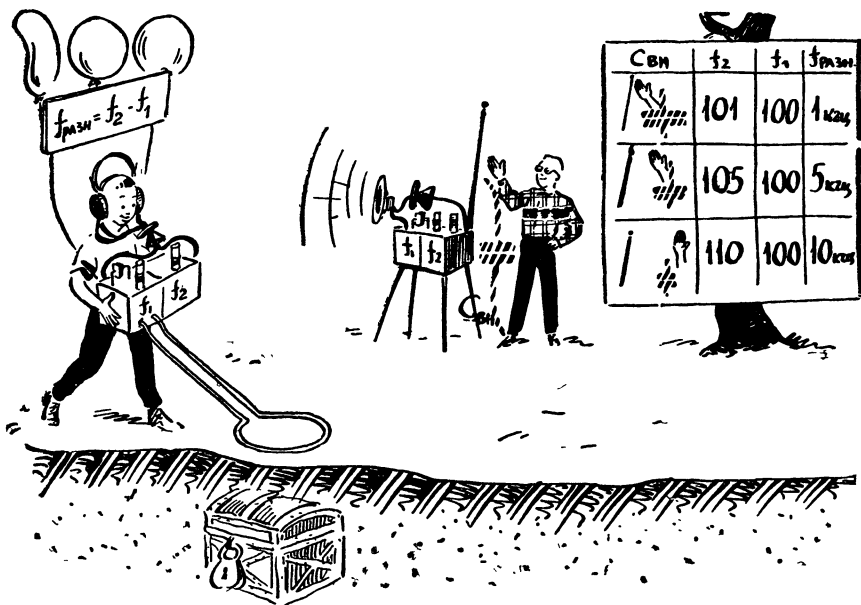


Рис. 120. В терменвоксе и металлоискателе используется изменение разностной частоты при расстройке одного из генераторов.

Практическая схема простого транзисторного терменвокса приведена на рис. 112. Генератор фиксированной частоты (T_1) собран по трехточечной схеме с емкостной обратной связью. В колебательный контур входят не только катушка L_1 и конденсатор C_3 , но еще и емкостный делитель C_4C_5 , подключенный параллельно контуру (один конец делителя соединен с контуром непосредственно, а второй — через «землю» и конденсатор C_1). Транзистор подключен к контуру так, чтобы выполнялось условие фаз: эмиттер соединен со средней точкой емкостного делителя, а к крайним точкам контура присоединены коллектор (непосредственно) и база (через конденсатор C_2). Остальные элементы генератора нам известны по предыдущим схемам — это резисторы термостабилизации и вызывающий фильтр.

Точно по такой же схеме собран и второй генератор (T_2), частота которого должна меняться. Связь контурной катушки со штырем осуществляется с помощью катушки связи L_3 .

Следующий каскад — усилитель высокой частоты, на который с обоих генераторов (с эмиттеров T_1T_2) подаются два высокочастотных напряжения с частотами f_1 и f_2 . Генераторы

соединены с входом усилителя ВЧ (T_3) через RC -цепочки (R_9C_{12} и $R_{10}C_{11}$), которые ослабляют взаимное влияние генераторов, препятствуют «затягиванию» частоты. Это явление состоит в том, что при небольшой разности между частотами f_1 и f_2 один генератор «навязывает» свою частоту другому, и в итоге оба они дают одну и ту же частоту. При этом разностная частота становится равной нулю, то есть звук просто исчезает. «Затягивание» препятствует приближению частоты f_2 к частоте f_1 , то есть препятствует получению достаточно низких звуков (50—80 $гц$). Чтобы предотвратить «затягивание», для каждого генератора часто делают собственный, так называемый буферный, усилитель ВЧ и уже с этих усилителей подают сигналы на детектор.

В данной схеме оба сигнала с общего усилителя ВЧ также подаются на триодный детектор (T_4), где в результате одновременного искажения этих сигналов и появляется разностная частота $f_{разн} = f_2 - f_1$. Детектор терменвокса называют так потому, что он работает с отсечкой тока во входной цепи. Отрицательное смещение, поступающее через R_{15} , почти полностью компенсируется положительным смещением, возникающим на R_{17} , и таким образом каскад оказывается почти без смещения. Однако этот явный детектор все же правильнее было бы назвать преобразователем частоты, так как именно этот процесс лежит в основе получения звука.

Сигнал разностной частоты выделяется на нагрузке детектора-преобразователя (R_{16}), в то время как высокочастотные составляющие с частотами f_1 и f_2 и их гармоники замыкаются накоротко через конденсатор C_{18} . Потенциометр R_{21} служит для регулировки громкости. На его оси можно закрепить длинный тонкий стержень и во время исполнения мелодий менять уровень громкости, слегка перемещая этот стержень свободной рукой.

Данные деталей: катушки L_1 и L_2 одинаковые и содержат по 240 витков провода ЛЭШО $5 \times 0,05$ (ПЭ 0,1). Они намотаны на стандартных четырехсекционных каркасах (рис. 45, ж) с небольшими ферритовыми сердечниками. Непосредственно к катушке L_2 примыкает катушка связи L_3 , которая намотана на трехсекционном каркасе и содержит три тысячи витков провода ПЭ 0,06. Катушки L_2 и L_3 могут размещаться на одной оси или на небольшом расстоянии закрепляться на общей монтажной плате.

Катушки могут быть намотаны на других каркасах и другим проводом. При изготовлении катушек главное — сделать одинаковыми L_1 и L_2 , обеспечить достаточно сильную связь между L_2 и L_3 , а также предусмотреть возможность подгонки частоты.

ты с помощью сердечников. Такая подгонка необходима для того, чтобы установить минимально возможную разностную частоту при наибольшем приближении руки к штырю. При удалении руки на большое расстояние разностная частота должна быть настолько большой, чтобы ее совсем не было слышно. Если нет возможности изготовить катушки с сердечниками, то для подгонки частоты генераторов можно подключить параллельно C_3 и C_8 подстрочечные конденсаторы. В качестве штыря удобно использовать телескопическую антенну.

Низкочастотный сигнал с выхода терменвокса можно подать на любой усилитель НЧ и, в частности, на вход «звукосниматель» любого приемника.

Налаживание терменвокса нужно начинать с проверки генераторов. Прежде всего следует убедиться, что генераторы дают незатухающие колебания. А для этого нужно включить вольтметр постоянного напряжения параллельно конденсатору C_1 (а затем C_6) и периодически замыкать контур накоротко. Если генерация была, то при замыкании контура она прекратится и постоянное напряжение на коллекторе (а именно его, по сути дела, измеряет вольтметр) несколько понизится.

Если окажется, что генератор не работает, то можно предположить, что не выполняется условие связи, так как условие фаз в трехточечных схемах при правильной их сборке выполняется всегда. Чтобы повысить напряжение положительной обратной связи, нужно увеличить емкостное сопротивление той части емкостного делителя, с которой это напряжение снимается. Практически нужно несколько уменьшить емкость конденсатора C_5 (или C_{10}), имея, конечно, в виду, что подобная мера приведет к некоторому увеличению генерируемой частоты. Усилить обратную связь можно и иначе — уменьшая емкостное сопротивление верхней части делителя, то есть увеличивая емкость C_{14} (C_9).

Если оба генератора работают, то дальнейшая накладка сводится к подгонке частот f_1 и f_2 , и в случае необходимости к подбору режимов усилителя ВЧ и детектора.

На том же принципе, что и «музыкальный супер» — терменвокс, — может работать другой распространенный прибор — металлоискатель (рис. 120). Контурная катушка одного из его генераторов выполняется в виде большой многовитковой «рамки» или «кольца». Если вблизи этой катушки оказывается стальной предмет, то ее индуктивность изменится и одновременно, так же как в терменвоксе, изменяется разностная частота на выходе преобразователя. По этому изменению частоты и можно судить о приближении «рамки» к стальному предмету.

Подобные, по сути дела, очень простые приборы во время

войны широко использовались в нашей армии в качестве миноискателей и спасли многие тысячи человеческих жизней.

Металлоискатель можно смело отнести к тому классу электронной аппаратуры, который принято называть «электроникой в народном хозяйстве». С несколькими другими представителями работающей деловой электроники мы познакомимся в следующем разделе.

К Л Ю Ч И К А В Т О М А Т И К Е

О том, что электронные приборы могут выполнять многие сложные операции, которые всегда считались монополией человека, сейчас уже знают все. Значительно меньше людей знает, как именно это делается.

Сейчас мы познакомимся с несколькими транзисторными схемами, которые могут наметить для вас путь в тайны электронной автоматики. Это схемы для выполнения простейших логических операций «и», «или», «не» и схема для выполнения одной из арифметических операций — деления на два. Чтобы вам было интереснее знакомиться с этими схемами, мы в итоге применим их в весьма полезном электронном приборе — в переключателе елочных гирлянд. Это будет «умный» переключатель, умеющий логически «рассуждать» и «знающий» арифметику.

Когда вы нажимаете кнопку лифта, то наверняка не думаете о том, что и лифт, прежде чем сдвинуться с места, обязательно должен немного «порассуждать».

«Я могу разрешить движение,— как бы говорит один из автоматов лифта,— если закрыта дверь шахты, если закрыта дверь кабины, если пассажир весит не менее двадцати пяти килограммов и с достаточной силой давит на пол,— маленьким детям одним в лифте ездить не разрешается. Но, конечно, перегружать лифт тоже нельзя: в случае перегрузки я не разрешу включить мотор, и никакие просьбы, никакое хлопанье дверью не поможет. Если все эти мои требования выполнены, то я дам разрешение на подъем, но только после того, как будет нажата одна из кнопок: если пассажир не нажал кнопку, то он еще не решил, куда ему ехать и ехать ли вообще. Мне безразлично, какая именно кнопка будет нажата,— пусть об этом думает другой автомат, которому поручено доставлять пассажиров на нужный им этаж. Мое же дело — безопасность, и, пока я не удостоверюсь, что все в порядке, лифт с места не сдвинется».

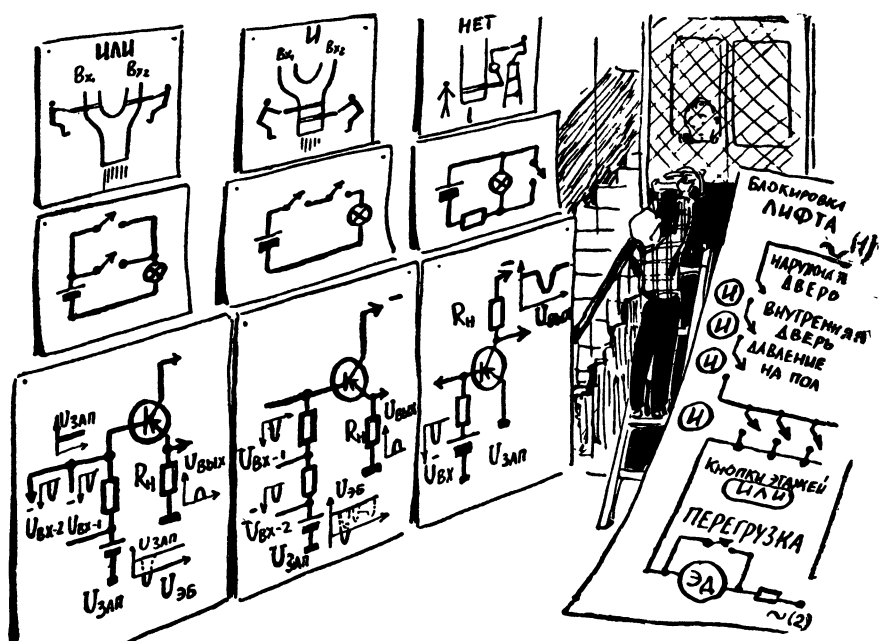


Рис. 121. Логические элементы «и», «или», «не» широко используются в автоматике.

В правой части рис. 121 приведена упрощенная схема блока безопасности, которая, по сути дела, производит подобные «рассуждения». Через этот блок подается питание на двигатель лифта. Первые три верхних (по схеме) выключателя выполняют операцию «и» — цепь будет замкнута только в том случае, если замкнут *и* первый, *и* второй, *и* третий выключатель. Если хотя бы один из них разомкнут, то включение двух других не имеет смысла.

Следующая группа выключателей, связанная с кнопками этажей, тоже участвует в операции «и», но внутри этой группы выполняется операция «или»: цепь будет замкнута, если замкнут *или* первый, *или* второй, *или* третий выключатель этой группы, то есть независимо от того, на какой этаж осуществляется подъем.

Наконец, последний выключатель, предохраняющий двигатель от перегрузки, выполняет операцию «не». По сравнению со всеми остальными выключателями он «действует наоборот». Если все выключатели для нормальной работы должны быть замкнутыми, то выключатель, выполняющий операцию «не»,

должен быть разомкнутым. В противном случае он просто замкнет двигатель накоротко, и тот, конечно, работать не будет (что касается автоматики лифта, то это не реальный, надуманный пример, нужный лишь для того, чтобы пояснить работу схемы «не»).

Знакомство со схемой блокировки лифта у некоторых из вас наверняка вызовет недовольство. Стоит ли такие простые схемы и такие простые операции связывать со столь сложным и высоким понятием, как «логические рассуждения»?

Начав подробно разбираться в этом вопросе, мы автоматически включились бы в философскую дискуссию о возможностях мозга и машины, в дискуссию, которая не затихает вот уже лет двадцать. Конечно, было бы интересно поспорить на эту тему, но мы не можем позволить себе подобную роскошь. Философская дискуссия может отвлечь нас от намеченной цели — от создания переключателя елочных гирлянд. Поэтому вместо подробного общего ответа на поставленный вопрос мы сделаем лишь два коротких конкретных замечания.

Утром, перед тем как уйти в школу, вы также наверняка проделываете логические операции «блокировки». Вы отправляетесь в путь лишь в том случае, если надеты *и* рубашка, *и* брюки, *и* туфли, *и* носки (как правило, безразлично, какие у вас носки: *или* синие, *или* черные, *или* коричневые), если вложены в портфель *и* книги, *и* тетради, *и* карандаши. Вы уйдете в школу лишь в том случае, если свет *не* горит, газ *не* включен и дело происходит *не* в воскресенье. Как видите, ваши логические рассуждения в этом случае очень напоминают те «рассуждения», которые выполняет блок безопасности рядового лифта. Так почему же в одном случае слово «рассуждения» принято писать в кавычках, а в другом случае — без них?

И второе замечание: элементы «*и*», «*или*» и «*не*» в нашем примере выполняли довольно простую совместную операцию потому, что они входили в довольно простую схему. В сложных схемах такие элементы могут проводить длинные и очень запутанные логические «рассуждения», выполняя для принятия окончательного решения многие тысячи взаимосвязанных логических операций. Даже ненамного усложнив схему блокировки лифта, ненамного увеличив число логических элементов, можно построить такой, например, автомат, который будет играть в известную игру «крестики и нолики». И при этом никогда не будет проигрывать.

Логические элементы могут быть основаны на самых разных физических процессах. Это могут быть и гидравлические системы — трубы с заслонками, и уже знакомые нам выключ-

чатели и схемы, состоящие из реле, диодов или транзисторов (рис. 121).

Чтобы получить транзисторную схему «или», нужно запретить транзистор сравнительно небольшим напряжением, чтобы любой попадающий на его вход импульс отпирал триод. Если при этом подавать импульсы от двух источников, то такая схема выполнит с этими импульсами операцию «или». На выходе транзистора — на эмиттерной нагрузке R_E — будет появляться выходной сигнал *или* под действием входного сигнала $U_{вх-1}$, *или* под действием входного сигнала $U_{вх-2}$.

Для получения схемы «и» нужно подать на базу такое запирающее смещение, чтобы один импульс не мог открыть транзистор и чтобы для его отпирания понадобилось совместное действие *и* напряжения $U_{вх-1}$, *и* напряжения $U_{вх-2}$. Наконец, схему «не» можно получить, если включить нагрузку не в эмиттерную цепь, как в двух предыдущих схемах, а в коллекторную. При этом увеличение «минуса» на базе будет приводить к уменьшению «минуса» на коллекторе. То есть, по сути дела, схема в ответ на импульс напряжения будет реагировать понижением напряжения.

Одна из самых важных схем электронной автоматики — это так называемый триггер (рис. 122), который осуществляет деление на два. Триггер широко используется в вычислительных машинах, и различные сочетания триггеров позволяют производить самые различные математические операции, такие, как сложение, умножение, возведение в степень, извлечение корня, логарифмирование и др.

По своей схеме триггер очень напоминает мультивибратор: в нем также работают два транзистора и коллектор одного из них связан с базой другого. Главное отличие триггера лишь в том, что в нем не происходит «самовольного» переключения транзисторов, и если уж один из транзисторов заперт, а другой открыт, то никакие внутренние силы не могут вывести триггер из этого устойчивого состояния. Для того чтобы триггер переключился, нужно подать на его вход откуда-нибудь «с стороны» отпирющий импульс.

Каждый отпирющий импульс переводит триггер из одного устойчивого состояния в другое. Если, например, до появления отпирющего импульса триод T_1 был закрыт, а триод T_2 открыт, то под действием внешнего импульса картина переменится на обратную — открытым окажется T_1 , а закрытым T_2 . Под действием следующего импульса триггер опять «перебросится» в первоначальное состояние, и транзистор T_2 опять окажется открытым, а T_1 закрытым и т. д. Триггер может находиться в устойчивом состоянии сколь угодно долго, потому что

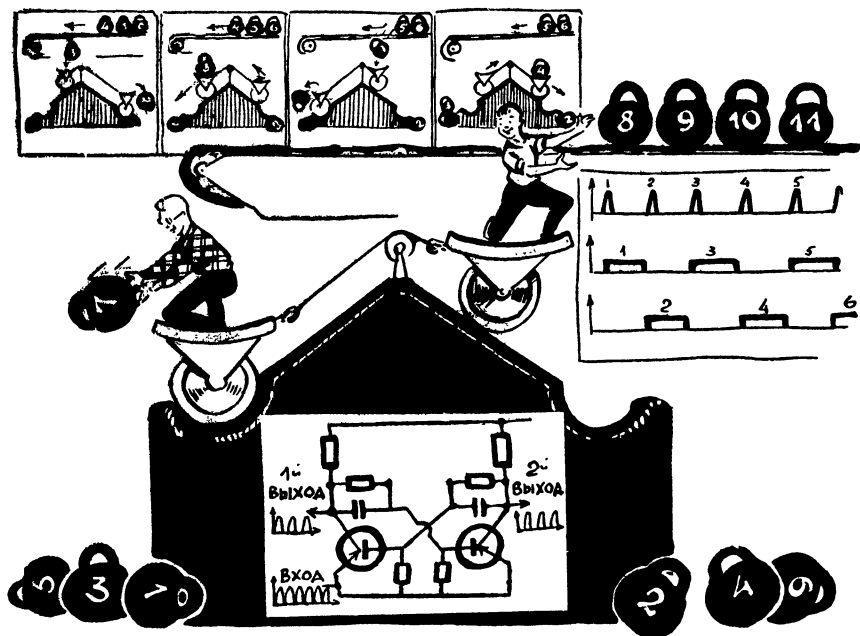


Рис. 122. Триггер, переходя из одного устойчивого состояния в другое, может выполнять операцию «деление на два».

коллекторы и базы транзисторов связаны не только по переменному току через емкость, как в мультивибраторе, но еще и по постоянному току через резисторы. Если один из триггеров окажется открытым, то «минус» на его коллекторе почти исчезнет (из-за падения напряжения на нагрузке). При этом исчезнет и постоянное отпирающее смещение на втором транзисторе, и он заперется (постоянным напряжением, которое создает открытый транзистор на общем резисторе R_0) и будет находиться в таком запертом состоянии до тех пор, пока не пройдет следующий внешний отпирающий импульс. На первый транзистор отпирающий импульс не повлияет — тот уже и без импульса открыт. А вот второй транзистор, который был закрыт, под действием отпирающего импульса откроется. Как только второй транзистор откроется, то «минус» на его базе исчезнет и одновременно исчезнет «минус» на базе первого транзистора. Теперь уже он окажется закрытым и будет дожидаться очередного отпирающего импульса.

Из этого краткого описания можно сделать такой вывод:

триггер делит на два частоту поступающих на его вход отпирающих импульсов. То есть один из транзисторов триггера будет открываться только от четных импульсов, второй — только от нечетных. Если, например, на вход триггера поступает двадцать импульсов в секунду, то на каждом из двух выходов триггера будут появляться чередующиеся импульсы с половинной частотой — десять импульсов в секунду. Ну, а если эти импульсы подать еще на один триггер, то мы получим деление на четыре: первый триггер разделит частоту входных импульсов на два, второй еще на два, а дважды два, как известно, четыре. С помощью цепочки триггеров можно осуществить деление на 8, 16, 32, 64 и т. д.

На рис. 123 приведена схема переключателя елочных гирлянд, который поочередно включает четыре группы лампочек, причем две из них «мигают» в два раза реже, чем две другие. Основа переключателя — тактовый генератор отпирающих импульсов. За ним следуют два триггера, один из которых делит частоту тактового генератора на два, а второй — еще на два. Каждый из транзисторов обоих триггеров управляет работой другого, мощного транзистора — своего рода транзисторного реле, которое и включает свою гирлянду.

Гирлянда лампочек является нагрузкой мощного транзистора. Когда транзистор открыт, то сопротивление его коллекторной цепи очень мало, все питающее напряжение, по сути дела, приложено к гирлянде, и лампочки горят. Когда же мощный транзистор заперт, то напряжение на нагрузке (на гирлянде) равно нулю, и лампочки не горят.

Роль тактового генератора выполняет уже знакомый нам мультивибратор (T_2T_3). Элементы его схемы подобраны так, что тактовая частота составляет примерно один герц. То есть отпирающий импульс появляется примерно раз в секунду. С тактового генератора сигнал подается на так называемую дифференцирующую цепочку R_1C_5 . Она превращает прямоугольный импульс в два остrokонечных импульса, так как ток в цепи конденсатора, а значит, и напряжение на R_1 появляется только во время изменения напряжения, проводимого к этой цепочке (рис. 25). Поэтому остrokонечные импульсы на выходе дифференцирующей цепочки будут созданы только передним и задним фронтом прямоугольного импульса, который идет с мультивибратора.

Отрицательный остrokонечный импульс отпирает триод усилителя (T_4), и после усиления сигнал подается на вход первого триггера (T_5T_6).

С коллекторной нагрузки каждого из транзисторов триггера постоянное напряжение подается на базу транзисторного

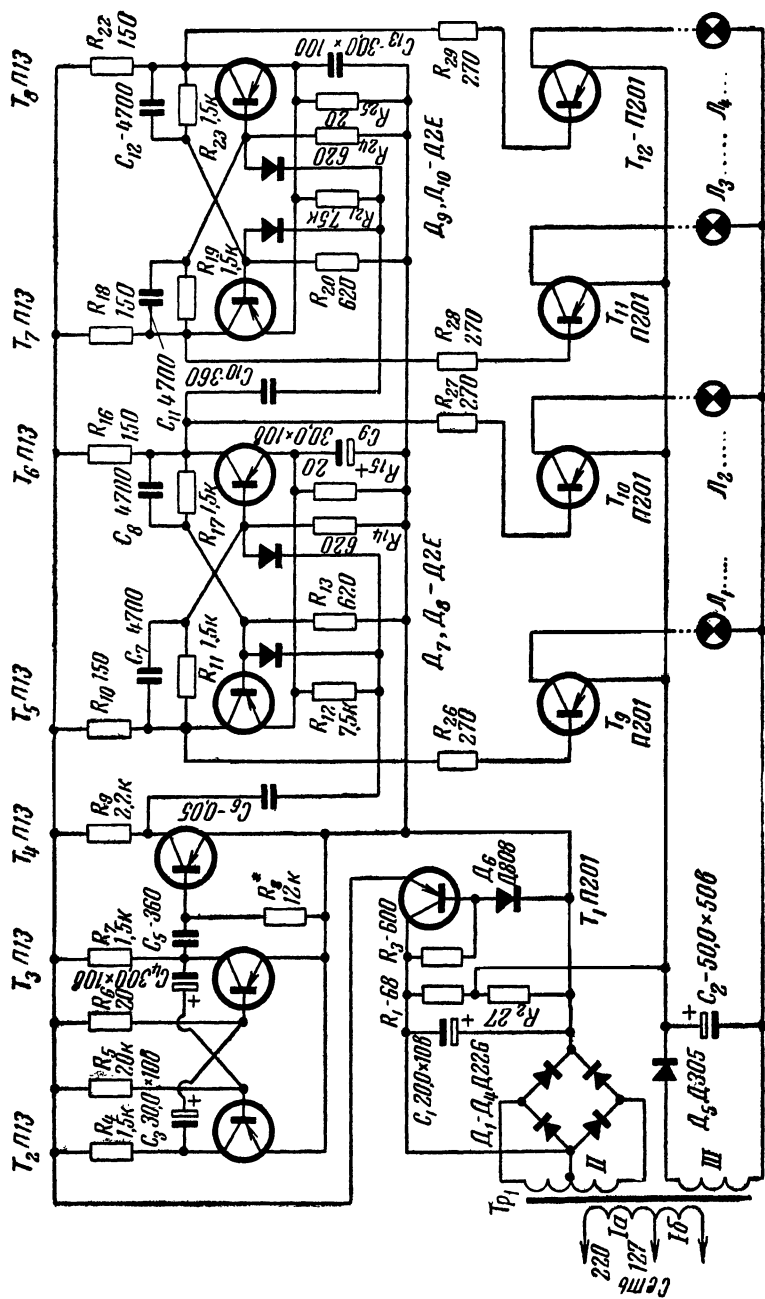


Рис. 123. Переключатель гирлянд с триггерами.

реле ($T_9 T_{10}$), в котором работает мощный триод, например, П201. На эмиттер этого мощного триода всегда подается отрицательное (относительно общего провода) напряжение с делителя $R_1 R_2$. Это напряжение приложено «плюсом» к базе и поэтому запирает мощный транзистор. Необходимо сравнительно большое отрицательное напряжение, чтобы его отпереть, и именно такое отпирающее напряжение поступает с триггера. Когда какой-нибудь транзистор триггера закрыт, то на его коллекторе оказывается сравнительно большой «минус» — почти полное питающее напряжение, которое и отпирает мощный триод. Поскольку «минусы» на коллекторах появляются поочередно и держатся довольно долго — около одной секунды, — то и мощный транзистор оказывается открытым целую секунду в ожидании следующей «переброски» триггера.

Аналогично действует и следующий триггер, но он уже включает свои транзисторы-реле в два раза реже, и они остаются включенными по две секунды.

В коллекторную цепь мощных транзисторов включены гирлянды лампочек, которые зажигаются только при отпирании транзисторов (рис. 52). Таким образом, эти гирлянды мигают с частотой переключения триггеров.

Чтобы система работала устойчиво, питание на тактовый генератор импульсов и на триггеры подается с простейшего стабилизатора напряжения, в котором используются один транзистор T_1 и стабилитрон D_6 . Это кремниевый диод, специально устроенный так, что он работает в области электрического пробоя (рис. 19), сопротивление которого поэтому сильно меняется при изменении приложенного напряжения. Причем сопротивление это меняется таким образом, что напряжение на диоде остается почти неизменным. В данном случае это напряжение управляет триодом (T_1), и ток через него остается неизменным при изменениях подводимого напряжения, потому что коллекторный ток практически зависит только от управляющего напряжения (рис. 57), а оно стабилизировано.

Питающее напряжение около 8 в для управляющей части (тактовый генератор, усилитель импульсов, триггеры) получают от мостикового выпрямителя, к которому подводится переменное напряжение 6,3 в. Потребление тока в этом блоке невелико, и обмотка II силового трансформатора Tr_1 может быть намотана сравнительно тонким проводом 0,3—0,5 мм. Напряжение на исполнительную часть (мощные транзисторы) подается с отдельного выпрямителя, который не должен давать более 20 в, то есть подводимое к выпрямителю эффективное переменное напряжение не должно быть больше 14 в. Ограни-

чение связано с тем, что сам транзистор П201 не допускает большего напряжения между коллектором и эмиттером (см. таблицу 10). Можно, конечно, применить транзисторы с более высоким допустимым коллекторным напряжением (например, П214, допускающие напряжение на коллекторе до 65 в) и тем самым повысить напряжение, подводимое к исполнительному блоку. А это, в свою очередь, позволит включать в каждую гирлянду большее число последовательно соединенных лампочек.

Вообще число лампочек подбирается таким образом, чтобы полностью использовать подводимое напряжение. В данном случае, когда это напряжение составляет 20 в, в каждую гирлянду нужно включить четыре лампочки на 6,3 в, или шесть лампочек на 3,5 в, или, наконец, восемь лампочек на 2,5 в.

Без дополнительного теплоотвода для транзистора П201 допустимый ток коллектора составляет 1,5 а. Это позволяет в коллекторную цепь каждого триода включить параллельно несколько групп последовательно соединенных лампочек. Так, например, если применены лампочки, потребляющие ток 0,3 а, то можно соединить параллельно пять групп таких лампочек (для спокойствия лучше четыре) или десять групп (лучше восемь) лампочек, потребляющих ток 0,15 а. Уменьшить число параллельных групп можно как угодно, так как транзистору от этого только легче.

Мы не приводим данных вторичных обмоток трансформатора. Число витков для них легко рассчитать, если известно число витков первичной обмотки, а значит, и число витков на один вольт (см. стр. 109). Общая потребляемая мощность для четырех переключающих транзисторов не превышает 60 вт. Мощные транзисторы работают поочередно, и каждая пара потребляет примерно 30 вт ($22 \text{ в} \cdot 1,5 \text{ а}$), а значит, трансформатор Tr_1 можно изготовить из небольшого силового трансформатора от сетевого приемника. С трансформатора удаляют все обмотки, кроме сетевой, и располагают на их месте обмотки II и III. Обмотку III нужно намотать довольно толстым проводом, диаметром 1,0—1,2 мм.

Выбор диаметра провода для обмотки III и диодов, заменяющих D_5 , нужно производить с учетом нагрузки мощных транзисторов. Совсем не обязательно давать им предельную нагрузку — 1,5 а. Вполне достаточно нагрузить каждый триод током до 0,6 а (например, две гирлянды по 0,3 а каждая).

С учетом среднего выпрямленного тока 3 а выбран диод D_5 для выпрямителя, питающего транзисторные реле, а значит, и сами гирлянды. Если под руками нет диода, рассчитанного на ток 3 а, то можно соединить параллельно десять дио-

дов, допускающих выпрямленный ток $0,3 \text{ а}$ (300 ма). При этом последовательно с каждым диодом нужно включить одинаковые резисторы по $3\text{—}5 \text{ ом}$ каждый (объяснение см. на рис. 27—15).

К переключателю можно добавить еще некоторое количество триггеров с мощными транзисторами и получить таким образом мигание гирлянд с периодом 4 сек , 8 сек и т. д.

Для переключателя с большим числом переключаемых гирлянд нужно намотать обмотку III более толстым проводом и подобрать диод D_5 , допускающий нужную величину выпрямленного тока.

Описанный нами переключатель для елки — это ближайший родственник гигантов электроники: электронных вычислительных машин. Попробуйте представить себе, что мы можем вводить в блок триггеров строго определенное число миганий лампочек. Тогда наш переключатель сам становится вычислительной машиной. Действительно, для того чтобы разделить какое-либо число на четыре, достаточно ввести это число в виде импульсов на вход блока триггеров и получить результат, подсчитав импульсы на выходе второго триггера. А чтобы умножить какое-либо число на два, нужно отсчитать соответствующее этому числу количество импульсов на выходе первого триггера, а затем определить, сколько импульсов за соответствующее время было подано на вход этого триггера с тактового генератора.

В действительности, конечно, в вычислительных машинах все происходит намного сложнее, но принцип остается тот же: числа представлены в виде электрических сигналов, в виде серий импульсов, и именно с этими сигналами машина производит всевозможные преобразования.

В электрических импульсах, включающих тот или иной элемент схемы, записана и программа действия машин. Например, вводятся в машину два числа A и B и дается такая программа: «Умножить число A на число B , затем прибавить число A к числу B , разделить первый результат на второй...».

Работая по этой программе, машина будет всякий раз при любых вводимых в нее двух числах выдавать вам значение результирующей емкости при последовательном соединении двух конденсаторов или результирующего сопротивления при параллельном соединении резисторов.

В виде чисел-сигналов вводятся в машину описания самых разных событий и их характеристики. Возьмем, к примеру, машину, играющую в шахматы. Для нее обязательно производят предварительную числовую оценку фигур. Ферзя, например, оценивают в 10 условных единиц, ладью — в 5 единиц,

пешку — в единицу и т. д. Имеют свои числовые оценки сдвоенная пешка, рокировка, давление на центральные поля и т. д. Положение фигур, правила их передвижения и само передвижение, правила снятия фигур и т. п. также выражаются комбинациями цифр. Поэтому и каждый ход сводится к операциям над числами, и результат этого хода также представляет собой число, которое легко может быть превращено в определенное положение фигур на доске.

Можно построить переключатель гирлянд, который будет иллюстрировать работу логических элементов «и», «или», «не». Основа такого переключателя (рис. 124) — два мультивибратора (MB_1 и MB_2), два тактовых генератора, генерирующих прямоугольные импульсы разной длительности, например с периодом 1,5 сек и 1 сек. На два транзисторных реле (TP_1 и TP_2) эти импульсы подаются непосредственно с мультивибраторов, а на остальные транзисторные реле — через логические элементы. Так, импульсы, поступающие на транзисторное реле (TP_3) через элемент «или», будут зажигать свою гирлянду под действием сигнала любого из мультивибраторов. Импульсы, отпирающие транзисторное реле (TP_5) через элемент «и», будут включать гирлянду лишь при появлении импульсов одновременно от двух мультивибраторов. Каждый из логических элементов можно снабдить еще и элементом «не», который будет включать соответствующее транзисторное реле (TP_4 и TP_6) тогда, когда основное реле (TP_3 и TP_5) будет выключаться. При желании можно усложнить схему и ввести в нее еще ряд логических элементов. Можно, например, ввести элемент «или» («или»₂), который будет зажигать гирлянду (L_7) от двух источников редко появляющихся импульсов («и» и «не»₂). На рис. 124 под блок-схемой переключателя приведен график появления импульсов в гирляндах лампочек. Изменяя длительность импульсов тактовых генераторов, можно получить самые причудливые мигания лампочек, лишенные, казалось бы, всякого порядка.

Мы не приводим детальную схему «логического» переключателя не только из-за ее громоздкости, но еще и потому, что ее легко составит каждый, кто разобрался в предыдущей схеме. Во всяком случае, основные элементы будущей схемы — мультивибраторы и транзисторные реле — нам уже известны. Логические элементы тоже построить нетрудно. Подав два сигнала на общий резистор и подобрав его величину так, чтобы под действием любого из этих сигналов на резисторе появлялось необходимое для мощного транзистора отпирающее напряжение, мы получим элемент «или». Уменьшив

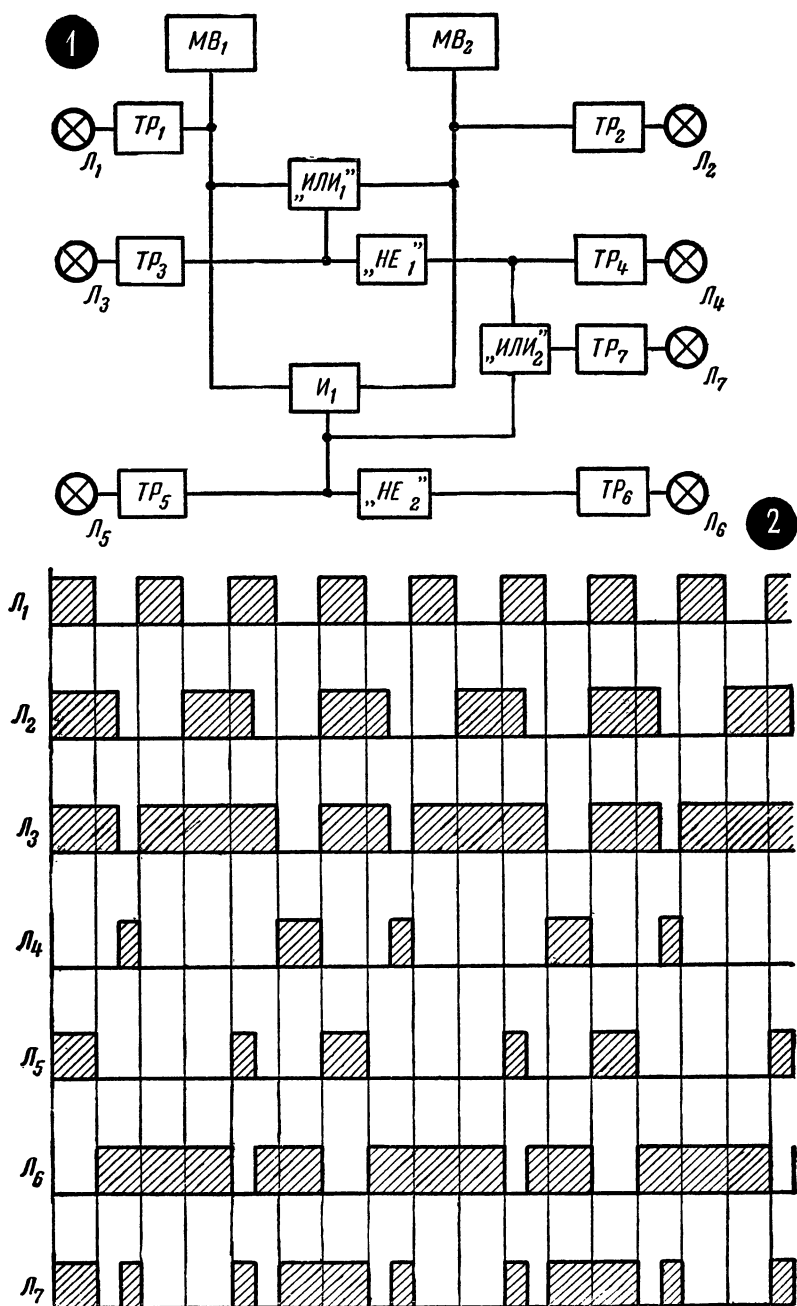


Рис. 124. Скелетная схема (1) и диаграмма (2) работы переключателя гирлянд с «логикой».

сопротивление резистора примерно вдвое и уменьшив тем самым отпирающее напряжение, можно добиться, чтобы оно достигало нужной величины лишь при совместном действии сигналов. Таким образом, мы получим элемент «и». Наконец, снимая отпирающее напряжение для транзисторного реле не с эмиттера, а с коллектора предыдущего каскада, можно получить элемент «не»: предварительно запертый постоянным напряжением мощный транзистор будет отпираться лишь тогда, когда прекратится ток в этом предварительном каскаде и на его коллекторе резко возрастет «минус».

Обе схемы «умных» переключателей хотя и не очень сложны, однако же и не очень просты. Во всяком случае, их налаживание требует понимания принципов работы транзистора, суммирования и вычитания напряжений и токов в сложных цепях, взаимного влияния элементов, входящих в единую электрическую цепь, и т. д. и т. п. Для тех, кто захочет начать с более простого переключателя, на рис. 113 приводится схема, которая не «рассуждает» и не «считает», а просто переключает две группы лампочек. В этой схеме мощные транзисторы (T_3T_4), способные переключать гирлянды лампочек, работают непосредственно от мультивибратора (T_1T_2). Собрав два таких мультивибратора с разными периодами импульсов, можно получить довольно эффектную систему переключения и от нее уже постепенно (например, добавляя триггеры или логические элементы) двигаться к более сложному, более «умному» переключателю.

Данные трансформатора и самих гирлянд такие же, как для переключателя по схеме рис. 123.

Во всех схемах, о которых шла речь в этом разделе, транзисторы работают в ключевом режиме — они либо полностью заперты, либо полностью открыты. Транзистор в таком режиме действительно напоминает ключ (выключатель), замыкающий либо размыкающий электрическую цепь. Транзистор-ключ — один из самых популярных элементов электронной автоматики.

То, что было рассказано о применении транзисторов в автоматике, можно рассматривать лишь как приглашение заняться этой интересной областью. Каждый, кто захочет принять такое приглашение, сможет двинуться дальше под парусами богатой любительской литературы по электронной автоматике. Мы же на этом закончим знакомство с транзисторными ключевыми схемами и тем самым вообще закончим свое путешествие, считая, что первый шаг в транзисторную электронику сделан.

ФИНИШ, КОТОРЫЙ МОЖНО СЧИТАТЬ СТАРТОМ

Что же можно сказать в конце нашего долгого пути?

Оглядываясь назад, можно отметить, что путь этот прошел по многим интересным территориям. Мы увидели немало конкретных практических транзисторных схем и, что особенно важно, познакомились с некоторыми общими принципами построения схем, с важными для транзисторной техники физическими процессами, с главными законами электрических цепей.

В то же время нужно честно признать, что многие важные и интересные проблемы нам так и не удалось внимательно рассмотреть. Всем известно, что «нельзя объять необъятное», но, оказывается, и «объятное» объять не так-то просто.

Хорошо было бы, например, подробнее остановиться на том, что такое генератор тока и что такое генератор напряжения (см. стр. 222). Первое из этих условных названий относится к электрической цепи, в которой сопротивление нагрузки R_n значительно меньше, чем внутреннее сопротивление генератора R_r . Второе название относится к цепи, где, наоборот $R_n \gg R_r$.

Само название «генератор тока», если его понимать буквально, не отражает всего, что происходит в цепи, потому что никак не может быть так, чтобы генератор давал нагрузке только ток: раз в нагрузке есть ток, то, значит, на ней действует и какое-то напряжение. Название «генератор тока» лишь подчеркивает следующую важную особенность — в электрической цепи, в которой $R_r \gg R_n$, как бы ни менялось сопротивление нагрузки R_n , через нее все равно будет идти один и тот же ток. То есть в цепи генератора тока, а значит, в цепи подключенной к нему нагрузки величина тока практически не зависит от самого сопротивления нагрузки.

Объясняется это, кстати, довольно просто. Ток в цепи, в которую входят два последовательно соединенных резистора (в данном случае R_r и R_n), зависит от общего сопротивления цепи. А поскольку сопротивление одного из двух резисторов во много раз больше, чем другого (мы ведь назвали генератором тока именно такой генератор, внутреннее сопротивление которого R_r во много раз больше, чем сопротивление нагрузки R_n), то общее сопротивление цепи, а значит, и ток в ней в основном и будет определяться величиной R_r . Представьте себе, что к генератору с внутренним сопротивлением 100 *ом* поочередно подключают три разные нагрузки с сопротивлениями 1, 2 и 3 *ом*. Во всех этих случаях общее сопротивление цепи окажется примерно равным 100 *ом* и ток в цепи при замене

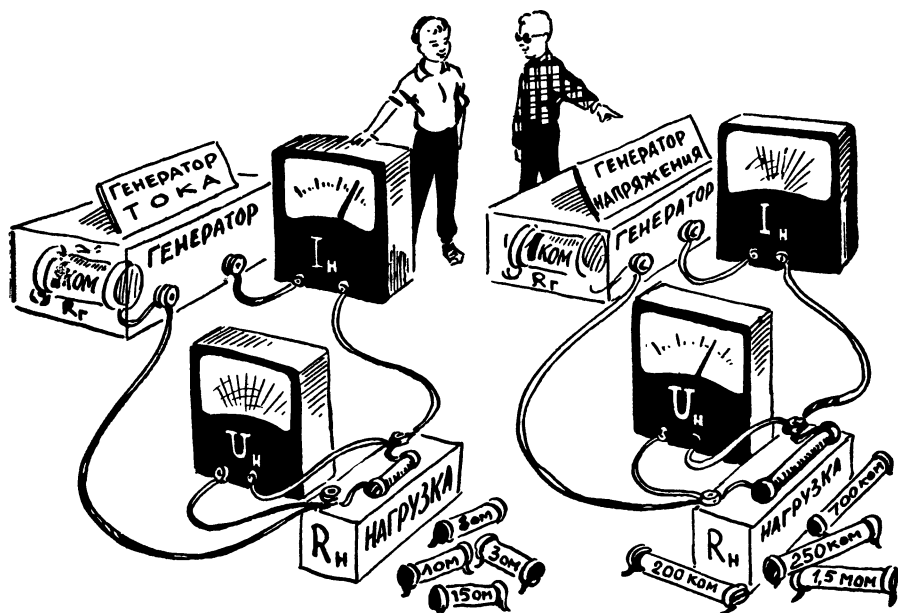


Рис. 125. Понятие «генератор тока» или «генератор напряжения» прежде всего отражает соотношение между сопротивлением генератора и нагрузки.

нагрузки не изменится. Именно в этом смысле подобный генератор и называют генератором тока.

Нам полезно было бы подробнее познакомиться с генератором тока именно потому, что он довольно часто встречается в транзисторных схемах. Возьмем, к примеру, простейшую цепь подачи смещения на базу от коллекторной батареи (рис. 76). Мы представили себе эту цепь как некий делитель напряжения, в который входит резистор R_b и сопротивление эмиттерного перехода R_{ex} для постоянного тока. Это действительно так: все напряжение коллекторной батареи делится между участками делителя, и та часть напряжения, которая достается эмиттерному $p-n$ -переходу, является для транзистора начальным отрицательным смещением. От смещения, то есть от отрицательного напряжения на базе, зависит коллекторный ток транзистора: чем больше это отрицательное напряжение, тем больше и коллекторный ток (рис. 64).

То, что входное напряжение, в частности напряжение смещения, стало в нашем рассказе о транзисторах главным действующим лицом, ни в какой степени не искажает истины — ко входу транзистора подводится некое напряжение, оно соз-

дает входной ток, а он, в свою очередь, вводит электрические заряды в базу. (В схеме ОБ все происходит в точности так; в схеме ОЭ число введенных в базу зарядов тоже определяется входным током, однако нужно умножить входной ток на коэффициент β , чтобы количественно подсчитать ток, который входит в базу.) Из базы заряды попадают в коллекторный переход и затем проходят по коллекторной нагрузке. Первопричиной всей этой длинной цепочки событий, как видите, является напряжение, подведенное ко входной цепи транзистора.

Однако в некоторых случаях для упрощения картины полезно забыть об этой первопричине и начинать все рассуждения прямо с тока, протекающего во входной цепи, именно его считая главным действующим лицом. Подача отрицательного смещения от коллекторной батареи — это как раз один из таких случаев.

Сопротивление резистора R_6 , через который коллекторное напряжение попадает на базу, во много раз больше, чем сопротивление $R_{вх=}$ эмиттерного pn -перехода. Это ясно хотя бы из того, что коллекторное напряжение составляет 5—10 в, а на базе должно остаться смещение всего 0,1—0,2 в. Подобное деление возможно лишь в том случае, если сопротивление верхней части делителя R_6 в несколько десятков раз больше, чем сопротивление его нижней части $R_{вх=}$. Такое соотношение сопротивлений позволяет рассматривать всю цепь смещения как цепь с генератором тока, внутреннее сопротивление которого R_6 , а нагрузка $R_{вх=}$.

Мы уже говорили, что в цепи генератора тока сама величина тока почти не зависит от сопротивления нагрузки и в основном определяется большим сопротивлением генератора, в нашем случае — сопротивлением резистора R_6 . Представьте себе, что в схеме, где смещение подается от коллекторной батареи через резистор R_6 , вы меняете транзисторы, и у них, в силу известного разброса параметров, оказываются различными сопротивления эмиттерного pn -перехода $R_{вх=}$. В этом случае ток в цепи, по сути дела, меняться не будет, так как небольшое сопротивление pn -перехода мало влияет на ток в цепи, куда включен резистор R_6 с большим сопротивлением.

Но если через какой-нибудь участок цепи проходит неизменный ток и меняется сопротивление этого участка, то неизбежно (согласно закону Ома — $U=I \cdot R$) будет меняться действующее на участке напряжение. Иными словами, при включении транзисторов с разными $R_{вх=}$ будет меняться напряжение на этих сопротивлениях, будет меняться начальное отрицательное смещение, которое подается на вход триодов.

Из всего сказанного так и хочется сделать вывод: «Это недопустимо! При смене транзисторов нужно менять и резистор R_6 , с тем чтобы всегда делить коллекторное напряжение в одной и той же пропорции. Смещение на базе всегда должно быть одинаковым!!!» Несмотря на кажущуюся логическую безупречность этого вывода, он все же неверен. Точнее, не совсем верен.

Напряжение смещения, которое мы подводим к транзистору, — это не самоцель. Мы подводим напряжение смещения для того, чтобы создать во входной цепи определенный ток, который затем попадет в коллекторную цепь и, по сути дела, определит все события, происходящие в транзисторном усилительном каскаде. Чтобы установить режим транзистора, нужно задать в его входной цепи определенное напряжение, и только поэтому нужно подвести к ней определенное напряжение. А если сопротивление эмиттерного pn -перехода у транзисторов окажется различным, то к ним придется подводить и разные напряжения — лишь в этом случае можно будет установить во входной цепи этих транзисторов один и тот же ток.

Из этого рассказа можно сделать несколько полезных выводов. Прежде всего, рассматривая процессы в схеме, о которой идет речь, и, что еще важнее, при ее налаживании, можно вообще исключить из рассуждений подводимое ко входу транзистора постоянное напряжение $U_{см}$ и сразу же учитывать ток смещения $I_{см}$ во входной цепи. А поскольку у нас генератор тока, то величина $I_{см}$ будет всегда одинаковой и режим транзистора всегда будет определяться лишь сопротивлением R_6 . Именно подбором этого сопротивления можно установить необходимый начальный ток во входной цепи, установить режим транзистора.

Все сказанное совершенно не противоречит тому, что говорилось раньше: мы рассматривали всю цепь подачи смещения как делитель напряжения, и из наших рассуждений также следовало, что режим устанавливается подбором резистора R_6 . От того, что мы перешли к иному описанию процесса, сам этот процесс не изменился: как и прежде, на эмиттерном переходе действует напряжение; как прежде, во входной цепи протекает ток. Перейдя к новому описанию, рассматривая всю цепь как генератор тока, мы лишь несколько упростили картину, нарисованную в своем сознании, сделали ее более удобной для мысленного анализа. Не думая ни о каком напряжении $U_{см}$, мы просто считаем, что нужно установить во входной цепи заданный ток $I_{см}$ (обычно задается ток коллектора $I_{к=}$, который зависит от $I_{см}$), а значит, нужно подобрать резистор R_6 , определяющий величину этого тока.

Следующий вывод носит более общий характер — он касается распространенного выражения: «транзистор — это прибор, управляемый током».

Иногда это говорится для того, чтобы подчеркнуть отличие транзистора от лампы, во входной цепи которой ток очень мал и которую поэтому считают усилительным прибором, управляемым напряжением. Разумеется, в работе лампы и транзистора есть различия, но вряд ли стоит пытаться описать их короткой фразой, которая к тому же относится лишь к одному из отличий, определяет его неточно (события во входных цепях транзистора и лампы характеризуются и током, и напряжением — этими двумя показателями единого процесса), а некоторые важные различия, в частности рекомбинацию зарядов в *pn*-переходах, не учитывает совсем.

Часто говорят о токовом принципе управления транзистором, имея в виду, что его входная цепь, в большинстве случаев обладающая малым сопротивлением, подключена к высокоомному источнику сигнала, то есть к генератору с очень большим внутренним сопротивлением $R_{\text{вых}}$ (имеется в виду сопротивление переменному току). В этих случаях выражение «прибор, управляемый током», опять-таки нужно для того, чтобы упростить картину, исключить из нее второстепенные детали и выделить главное. А главным в этом случае как раз и является высокое сопротивление генератора, с которого транзистор получает сигнал, и низкое входное сопротивление самого транзистора $R_{\text{вх}}$ (для переменного тока). Генератор сам определяет входной ток транзистора, а этот ток уже своим обычным порядком управляет работой всего усилительного каскада. Конечно, на входе транзистора, как всегда, действует управляющее напряжение, но для простоты дела его можно не учитывать.

Все описание работы транзистора и его характеристики мы в свое время строили на том, что ко входу подводится управляющее напряжение $U_{\text{об}}$, что именно оно создает входной ток и управляет выходным током. В том случае, когда входная цепь транзистора питается от генератора тока (то есть от источника с сопротивлением, значительно превышающим $R_{\text{вх}}$), можно все рассуждения сразу начинать со входного тока. А входное напряжение считать при этом «побочным продуктом» — каким оно получится, таким пусть и будет. Так, кстати, поступают довольно часто. И поэтому не удивляйтесь, если вы встретите семейство выходных характеристик, построенных не для разных напряжений $U_{\text{об}}$, а для разных входных токов — I_3 для схемы ОБ или I_6 для схемы ОЭ.

Этими характеристиками можно пользоваться довольно

часто, но не всегда. В тех случаях, когда источник сигнала обладает низким внутренним сопротивлением, его нужно рассматривать как генератор напряжения и все рассуждения о работе транзистора, как мы это и делали, начинать с того, что к его входу подводится напряжение $U_{эб}$.

«Цепь тока» и «цепь напряжения», «генератор тока» и «генератор напряжения», «прибор, управляемый током», и «прибор, управляемый напряжением», — все эти понятия отражают лишь соотношение сопротивлений в электрических цепях и зависимость событий в этих цепях от их элементов. Пользоваться неречисленными понятиями весьма удобно, но делать это можно лишь тогда, когда выяснено, почему в той или иной цепи ток или напряжение мало зависят от того или иного элемента и почему от другого элемента они зависят сильно. И во всех случаях, рассматривая электрическую цепь и при этом обращая внимание только на ток или только на напряжение, не забывая, что вы лишь упрощаете истинную картину, чтобы легче разобраться в происходящих событиях. И что на любом участке любой реальной цепи ток протекает под действием напряжения, или, если говорить иначе, наличие тока обязательно сопровождается появлением напряжения.

Поняв, что «генератор тока» и «генератор напряжения» создают лишь определенным соотношением сопротивлений, мы можем в случае необходимости и сами вводить в схему такие генераторы. Один из примеров искусственного генератора тока — это выпрямитель для зарядки аккумулятора (рис. 42—4, 5). Известно, что при зарядке нужно поддерживать заданную величину тока, которая определяется типом аккумулятора и его емкостью. Однако постоянство зарядного тока всегда находится под угрозой, и прежде всего на него покушается сам аккумулятор. В процессе зарядки его внутреннее сопротивление может резко меняться, и это влечет за собой опасные изменения тока в цепи.

Чтобы стабилизировать зарядный ток, выпрямитель искусственно превращают в генератор тока, включив в его цепь последовательный резистор с сопротивлением около одного ома. Эта величина во много раз превышает внутреннее сопротивление аккумулятора (обычно сотые доли ома), и поэтому он, по сути дела, оказывается подключенным к генератору тока. Теперь величина зарядного тока уже мало зависит от самого аккумулятора и практически остается неизменной.

Другой пример — включение выравнивающих резисторов последовательно с параллельно соединенными диодами (рис. 123). Диоды соединяют параллельно, если необходимый выпрямленный ток превышает допустимую для одного диода

величину. Соединив диоды параллельно, мы как бы разделяем между ними общий ток. Так, если нужно получить $I_{\text{вып}}=3 \text{ а}$, а в нашем распоряжении есть диоды, у которых $I_{\text{пр}}=0,3 \text{ а}$, то следует соединить параллельно десять (для безопасности лучше одиннадцать) таких диодов.

Однако прямое сопротивление $R_{\text{пр}}$ у разных экземпляров одного и того же типа диодов может резко отличаться, а в этом случае общий ток распределяется между диодами неравномерно. В итоге одни диоды недогружены, а другие могут перегреться и выйти из строя. А вслед за одним вышедшим из строя диодом в некоторых случаях (например, если в результате перегрева диода «отгорит» от кристалла один из выводов) могут выйти из строя и все остальные.

Чтобы избежать этой страшной картины, достаточно последовательно с диодами включить *одинаковые* резисторы по 3—5 ом каждый. Эта величина во много раз больше, чем прямое сопротивление плоскостного диода, и поэтому каждый диод окажется включенным в цепь генератора тока. Причем все генераторы будут одинаковыми, и общий ток распределится между ними равномерно, несмотря на разброс параметров диодов.

Теперь от общего разговора о генераторах тока вернемся к конкретной цепи, с которой мы начали этот разговор, вернемся к входной цепи транзистора.

Есть одно обстоятельство, из-за которого удобно вести разговор о напряжении на входе транзистора, причем даже в тех случаях, когда он включен в цепи генераторов тока, то есть в цепи источников постоянного или переменного напряжения с большими внутренними сопротивлениями. Дело в том, что при налаживании электронной аппаратуры значительно удобнее измерять напряжения, чем токи. Для измерения тока нужно разрывать цепь, так как амперметр включается в цепь последовательно, а для измерения напряжения этого делать не нужно. Поэтому везде, где только возможно, стараются указать режим транзисторного усилителя, отмечая, какие на том или ином участке цепи должны быть напряжения. Даже в генераторе тока, в цепи подачи смещения на базу через R_6 , часто ограничиваются указанием напряжения на базе, которое соответствует нормальному режиму для среднего по параметрам транзистора. Это напряжение, как уже неоднократно указывалось, обычно составляет 0,1—0,2 в.

И, наконец, последний вывод — предостережение против неверного вывода из того, что было только что рассказано. Может сложиться впечатление, что необходимый ток смеще-

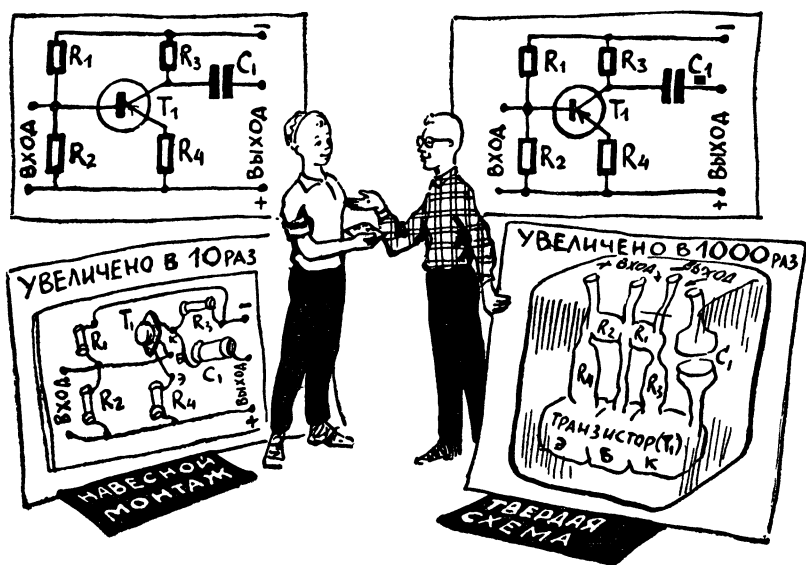


Рис. 126. В электронных приборах используются разные физические процессы для выпрямления, усиления, генерирования и других операций электрическими сигналами.

ния устанавливается сам по себе для всех триодов, так как величина этого тока определяется только сопротивлением резистора R_6 . Так действительно было бы, если бы транзисторы отличались только сопротивлением эмиттерного перехода $R_{вх}$. Но в действительности различие в параметрах транзисторов значительно «богаче», и поэтому при желании установить определенный коллекторный ток покоя $I_{к-п}$ величину R_6 довольно часто приходится подбирать. Так, в частности, чтобы в схеме ОЭ получить одну и ту же величину $I_{к-п}$, ток смещения у транзистора с коэффициентом $\beta=100$ должен быть в два раза меньше, чем для транзистора с $\beta=50$. В большинстве приведенных в книге схем резистор, определяющий смещение на базе, приходится подбирать довольно редко, так как в этих схемах смещение подается с делителя напряжения. Кроме того, в эмиттерную цепь транзистора включен резистор, который автоматически «подгоняет» смещение к заданной величине.

Мы с вами попробовали несколько подробнее разобрать лишь один вопрос, мимо которого с легкостью прошли раньше, и, как видите, узнали немало интересных и важных подробно-

стей о работе транзисторного каскада. Много важного и интересного можно было узнать, рассмотрев подробнее и другие, лишь слегка затронутые нами проблемы. Например, особенности работы транзистора на высоких частотах, влияние внутренних обратных связей, зависимость параметров транзистора от температуры и уровня сигнала, изменение параметров усилителя при смене транзистора, возникновение искажений в усилителях с отсечкой и многие другие. Одним словом, мы поднялись лишь на несколько ступеней по лестнице понимания транзисторных схем, и можно еще очень долго продолжать этот подъем, всякий раз открывая для себя новые горизонты.

Кроме того, у нас есть возможность продолжить путешествие в соседние, незнакомые пока области полупроводниковой электроники. Полупроводниковый диод и транзистор — это хотя и главные, но далеко не единственные представители большой семьи полупроводниковых приборов. Так, в частности, даже у простейшего диода есть немало ближайших родственников, обладающих интересными специальностями.

Фотодиод пропускает ток лишь в том случае, когда на него падает свет. Другой специальный диод — кремниевый стабилитрон — меняет свое сопротивление при изменении тока и тем самым стабилизирует «гуляющее» напряжение. Специальный диод — варикап — устроен так, что его емкость в сильной степени зависит от приложенного напряжения, и такой диод используют в качестве конденсатора переменной емкости. Наконец, туннельный диод попал в семейство диодов только потому, что у него всего два вывода. А по своим характеристикам туннельный диод — это самый настоящий усилительный прибор.

На некотором участке вольтамперной характеристики туннельный диод обладает отрицательным сопротивлением: при уменьшении подводимого к диоду напряжения ток через него растет. Это странное явление связано с очень тонкими физическими процессами в *pn*-переходе. Если туннельный диод, работающий в режиме отрицательного сопротивления, включить, например, в контур, то он скомпенсирует потери в контуре — разумеется, за счет энергии внешней батареи — и, по сути дела, полностью заменит транзисторный генератор.

Много интересных приборов входит и в семейство транзисторов. Это, в частности, фототриод, который не только превращает вспышку света в электрический импульс, но еще и усиливает его. Это и четырехслойные управляющие приборы, например, со структурой *n-p-n-p*, предназначенные специально для переключающих схем. Это, наконец, полевые (иногда го-

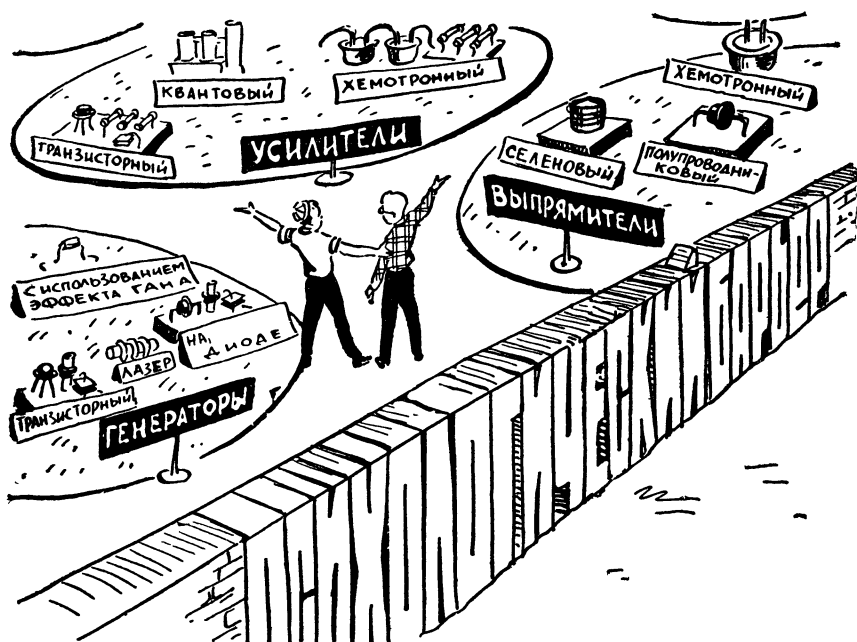


Рис. 127. В современных электронных приборах используется широкий «ассортимент» физических явлений.

ворят — каналные) транзисторы, в которых управление коллекторным током осуществляется «без касания» — с помощью электрического поля, как бы сужающего или расширяющего путь тока. Входная цепь такого транзистора почти не потребляет тока, и поэтому он обладает очень высоким входным сопротивлением.

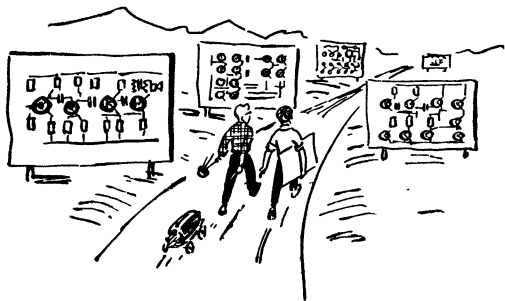
Развитие полупроводниковой техники пошло не только по пути создания новых приборов — новых диодов и транзисторов, — но и по пути создания в одном полупроводниковом кристалле целых электронных блоков. Представьте себе схему триггера, мультивибратора или простейшего усилителя НЧ с резистором в нагрузке. Из каких элементов состоят эти схемы? В них входят транзисторы, диоды, резисторы, конденсаторы и соединительные провода. А все эти элементы можно изготовить из полупроводникового материала. Чтобы сделать в кристалле конденсатор, нужно создать в нем две полупроводниковые зоны с высокой проводимостью, а между ними — участок полупроводника с низкой проводимостью. Дозируя примеси, можно получить в кристалле и резистор с нужным

сопротивлением или соединительную цепь с очень малым сопротивлением. И, конечно же, в полупроводниковом кристалле можно получить диод и транзистор.

А теперь представьте себе, что все эти элементы с помощью какой-то фантастической технологии созданы в одном кристалле, причем в таких количествах, с такими данными и при таком взаимном соединении, что в итоге образовалась нужная нам схема усилителя или генератора. Это значит, что в одном кристалле мы получили целый электронный блок, получили так называемую твердую интегральную схему.

Технология, которую мы назвали фантастической, в действительности существует. И с ее помощью ученые и инженеры уже научились создавать в небольшом кристаллике самые различные твердые схемы.

Как видите, финиш нашего долгого путешествия можно одновременно считать и стартом в новые интересные области — в область более сложных и совершенных транзисторных схем, в область более глубокого их исследования и в область новых направлений полупроводниковой техники и технологии. Однако продвижение вперед по всем этим интересным направлениям — это уже новые задачи, которые в этой книге решаться не будут. Потому что задача этой книги состояла лишь в том, чтобы помочь читателю сделать трудный первый шаг в транзисторную электронику. Первый шаг, но, хочется верить, не последний.



О Г Л А В Л Е Н И Е

Глава I. ТРЕБУЮТСЯ СКУЛЬПТОРЫ	
Слова, слова, слова...	5
Главная роль	9
Великолепная четверка	25

Глава II. ОТ ДИОДА ДО ТРИОДА

Маневры на границе	38
Все о диоде	44
Прибор скромных профессий	59
«Земля!»	78
От слов к делу	101
Здравствуй, транзистор!	125

Глава III. АБСТРАКТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Вечер воспоминаний	140
Рисунки на века	158
Учитесь делать выводы	179
«2+2=3»	189
Как читать радиосхемы	208
Наша цель — оптимизация	220
Фокусы с фазами	231
Бросок на юг	235

Глава IV. ТЫСЯЧА И ОДНА СХЕМА

«...Мама всякие важны!»	247
И все же приемник...	266
Сколько стоит ватт?	288
Превращение в генератор	303
Прекрасные искажения	318
Ключи к автоматике	328
Финиш, который можно считать стартом	341

Для среднего и старшего возраста

Сворень Рудольф Анатольевич

ШАГ ЗА ШАГОМ. ТРАНЗИСТОРЫ

Ответственный редактор *Э. П. Микоян*. Художественный редактор *Л. Д. Бирюков*.
Технический редактор *О. В. Кудряцева*. Корректоры *Т. Ф. Юдичева* и *Э. С. Ульянова*

Слано в набор 28/V 1970 г. Подписано к печати 20/II 1971 г. Формат 60×90¹/₁₆. Печ. л. 22,5.
(Уч.-изд. л. 20,95+4 вкл.=21,5). Тираж 100 000 экз. ТП 1970 № 560. А 00843. Цена 83 коп.
на бум. № 2.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Детская литература» Комитета по
печати при Совете Министров РСФСР, Москва, Центр. М. Черкасский пер., 1.

Текст отпечатан с матриц Сортальной книжной типографии Калининским Полиграф-
комбинатом детской литературы Росглавополиграфпрома Комитета по печати при Совете
Министров РСФСР, г. Калинин, проспект 50-летия Октября, д. 46. Заказ 371.

Цена 83 коп.